

На правах рукописи



Сускин Виктор Викторович

**Разработка и обоснование расчетной модели анализа безопасности пункта
глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «полигон
«Северный»**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель:

Уткин Сергей Сергеевич,
доктор технических наук.

Официальные оппоненты:

Спешилов Сергей Леонидович,
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»;

Зубков Андрей Александрович,
кандидат геолого-минералогических наук, акционерное общество «Сибирский химический комбинат».

Ведущая организация:

Федерально государственное бюджетное учреждение «Гидроспецгеология».

Защита состоится 23 июня 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <http://www.ibrae.ac.ru/contents/511/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.



В. Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Практика закачки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в глубокозалегающие пласты-коллекторы в нашей стране реализуется более 50 лет. Фундаментальные подходы к обоснованию безопасности, сформулированные в период становления данной технологии, постоянно поддерживались и развивались силами научных подразделений АО «ВНИИПромтехнологии» (А. И. Рыбальченко, М.К. Пименов, П.П. Костин и др.), ИФХЭ РАН (И.М. Косарева, Е.В. Захарова) и эксплуатирующих организаций (ОАО «СХК» – А.А. Зубков). Вплоть до появления монографии [Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. – 256 с.], деятельность соответствующих объектов захоронения ЖРО, равно как и вопросы обоснования безопасности, в открытой литературе системно не описывались. Однако наличие закрытых обоснований, выполненных, в том числе с применением расчетных методов программными средствами, позволяло считать проблему в определенной мере решенной. Рассмотрение, в том числе и зарубежными специалистами [Compton K. L., Novikov V. and Parker F. L. Deep Well Injection of Liquid Radioactive Waste at Krasnoyarsk-26. Volume I and Analysis of Hypothetical Scenarios. Volume II] новых ситуаций, в том числе связанных с вмешательством в далеком будущем, также не вызывало сомнений в приемлемости технологии захоронения ЖРО по критериям безопасности.

Принципиальные изменения в оценке актуальности проблемы обоснования безопасности рассматриваемой технологии произошли в последние 15 лет. Их инициировали:

- 1) ратификация в 2005 году Российской Федерацией Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами: предусмотренное конвенцией представление и рассмотрение регулярных национальных докладов сконцентрировалось на рассмотрении практики закачки жидких РАО;
- 2) вступление в силу в 2011 г. нового российского закона по обращению с РАО, который определил актуальность вопросов закрытия действующих пунктов захоронения ЖРО и статьей 30 которого стал запрет на создание новых подобных объектов захоронения;
- 3) формулирование ясной позиции органом государственного регулирования безопасности в форме замечаний и рекомендаций, в том числе прямо предусматривающие необходимость разработки так называемых постоянно действующих геофильтрационных-геомиграционных моделей для ПГЗ ЖРО, и замечания к условиям действия лицензии;
- 4) заключение специальной миссии МАГАТЭ, инициированной Российской Федерацией в 2013 г., сформулировавшей замечания к расчетному моделированию и рекомендации к обоснованию безопасности данной технологии удаления ЖРО.

Во всех случаях разработка современных расчетных моделей и развернутое обоснование долгосрочной безопасности пунктов глубинного захоронения (ПГЗ ЖРО) после их закрытия стали условием допустимости

дальнейшей эксплуатации объектов захоронения. Современность при этом предполагала многомерность компьютерных моделей, комплексный учёт максимального спектра существующих процессов, должное обоснование параметров и границ моделей, и минимальное количество допущений.

К настоящему времени на трех действующих объектах захоронения ЖРО изолировано свыше 60 млн м³ ЖРО. При этом еще в 2000 году (проект ПАСА) и позже в 2012-2013 гг. (миссия МАГАТЭ) в качестве референтного объекта оценки безопасности технологии удаления ЖРО в глубокозалегающие пласты-коллекторы был выбран полигон закачки ЖРО «Северный».

Таким образом, с учетом уже размещенных на захоронение объемов ЖРО и текущих объемов закачки, тема создания современных расчетных моделей для обоснования безопасности объектов захоронения ЖРО, является актуальной, а её практическая реализация для референтного объекта имеет значение для ПГЗ ЖРО «Северский» и «Димитровградский».

Как и в большинстве случаев обоснования безопасности пунктов захоронения РАО, ключевую роль играют процессы геофильтрации и геомиграции РАО в подземных водах, а также сорбция радионуклидов. Вышеуказанные обстоятельства стали отправной точкой для начала работ над диссертационным исследованием.

Целью работы являлось обеспечение безопасности и экологической приемлемости пункта глубинного захоронения ЖРО полигон «Северный» (Железногорский филиал ФГУП «НО РАО») на стадии его эксплуатации и закрытия путем разработки современной геофильтрационной-геомиграционной модели и обоснования ее параметров.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. анализ ранее созданных моделей объекта (границы моделей, моделируемые процессы, допущения и недостатки предшествующих разработок) и моделей подобных объектов для выбора подходов к моделированию и разработке новой модели, снижению консерватизма и расширению границ модели для последующих оценок дозовых нагрузок;
2. сбор, систематизация и анализ данных (геологических, гидрогеологических, геоморфологических, метеорологических и данных бурения) о территории расположения пункта захоронения, данных мониторинга (уровни подземных вод и концентрация загрязнителей в них) и создание единой базы фактических данных для верификации разработанной модели в рамках диссертационного исследования, а также для возможности ее дальнейшей актуализации и верификации по вновь полученным данным;
3. разработка трёхмерной геофильтрационной-геомиграционной модели, включающая:
 - обоснование границ, условий и параметров модели, в том числе оценку пространственной изменчивости фильтрационных параметров геологических слоёв,

- учет модели массопереноса в среде с двойной пористостью и обоснование ее геомиграционных параметров;
- 4. калибровка фильтрационных параметров и параметров двойной пористости модельных слоев и фильтрационных свойств Правобережного тектонического нарушения, а также верификация разработанной модели по всей совокупности фактических данных.

Научная новизна работы

1. Разработана геофильтрационная-геомиграционная модель для анализа и обоснования безопасности ПГЗ ЖРО полигон «Северный», в которой впервые:
 - расчетная область расширена до природных границ – мест естественной разгрузки подземных вод (региональных дрен и др.) по сравнению с предыдущими моделями объекта ввиду необходимости проведения на модели полного комплекса обоснования безопасности вплоть до предоставления данных для оценки дозовых нагрузок в местах потребления воды;
 - объединены моделируемые ранее в разных моделях процессы геофильтрации и геомиграции;
 - определены и обоснованы неоднородные фильтрационные параметры слоев модели (пластов-коллекторов и водоупорных горизонтов), основанные на гидродинамических скважинных исследованиях с последующей калибровкой модели, позволившие с приемлемой точностью воспроизвести стационарные условия и историю эксплуатации объекта.
 - впервые применена модель массопереноса в среде с двойной пористостью на объекте такого типа, и определены и обоснованы ее параметры;
 - проведен анализ неопределенностей и достоверности фактических данных с отбраковкой некачественных замеров, который позволил получить параметры модели, а также осуществить калибровку фильтрационной модели и выполнить эпигнозный расчет геофильтрационной-геомиграционной модели.
2. Впервые путем комплексного учета предшествующих исследований, создания модели, ее калибровки и верификации по фактическим данным сформировано отдельное программное средство (ПС) ГЕОПОЛИС.

Практическая значимость полученных исследований

Разработанная расчетная модель в составе ПС ГЕОПОЛИС аттестована Ростехнадзором для решения задач обоснования безопасности ПГЗ ЖРО полигона «Северный» на эксплуатационном и постэксплуатационном этапах, включая аварийные сценарии.

Современная расчетная модель обеспечивает:

1. выполнение условия действия лицензии: проводит численные оценки уже имеющегося объема ЖРО в геологической среде (совместно с верификацией расчетов по фактическим замерам в скважинах) и предоставляет исходные данные для оценки остаточной емкости пластов-коллекторов;
2. получение необходимых исходных данных для обоснования работ по закрытию данного объекта;

- проведение прогнозных расчётов на длительный период (долговременная безопасность);
- оценку времени достижения загрязняющими компонентами мест разгрузки подземных вод;
- расчет значений максимальной концентрации загрязнителей в подземных водах в любой точке модели и в местах разгрузки подземных вод в естественные дрены (исходные данные для проведения оценок дозовых нагрузок на население в местах естественного потребления воды и нахождения у водоемов);
- оценку долговременных последствий аварийных ситуаций различного генезиса (внешние и внутренние воздействия) на данном объекте и, возможно, аналогичных объектах (заколонные перетоки по стволам скважин, образование горизонтальных каналов ускоренной миграции, засуха/наводнение и др.).

Разработанная модель и полученные на ее основе результаты устраняют часть замечаний и учитывают рекомендации миссии МАГАТЭ к обоснованию безопасности технологии удаления ЖРО в глубокозалегающие пласты-коллекторы.

Личный вклад соискателя:

- проведение сбора, систематизации и анализа всей совокупности фактических данных, использованных при построении модели, а также сбор фактических скважинных данных мониторинга с отбраковкой некачественных замеров и объединением таких данных в единую базу;
- создание модели, калибровка и верификация модели по фактическим данным, подтвердившим корректность модели и ее консерватизм;
- обоснование параметров разработанной геофильтрационной-геомиграционной модели: проведение оценки пространственной изменчивости фильтрационных параметров геологических слоёв, применение комплексного метода систематизации фактических данных и обоснование параметров модели массопереноса в среде с двойной пористостью;
- проведение эпигнозного расчета на разработанной модели, в том числе верификационных расчетов для аттестации ПС в Ростехнадзоре.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная расчетная геофильтрационная-геомиграционная модель для обоснования безопасности ПГЗ ЖРО полигона «Северный», в частности:
 - расширенные границы модели по сравнению с предыдущими моделями объекта, учитывающие места разгрузки подземных вод пластов-коллекторов в естественные дрены;
 - учет в одной модели всего спектра ранее моделируемых процессов при предыдущих исследованиях на данном объекте;
 - верификация модели по фактическим данным, учитывающим более чем сорокалетнюю историю эксплуатации объекта (с 1967 г. по 2011 г.);
 - проведение калибровки модельных параметров, в том числе калибровки коэффициента фильтрации Правобережного тектонического

нарушения, являющегося важным звеном в обосновании безопасности данного объекта;

- анализ неопределенности и достоверности фактических данных, а также замечания и предложения к организации и ведению мониторинга.

2. Определены и обоснованы параметры модели:

- неоднородность фильтрационных параметров, обоснованная проведенной верификацией модели по фактическим данным;

- параметры двойной пористости, обоснованные по фактическим замерам концентраций нитрат-иона в наблюдательных скважинах.

3. Результаты геофильтрационных и геомиграционных эпигнозных расчетов, полученные с применением всего спектра ранее моделируемых процессов при предыдущих исследованиях на данном объекте, верифицированные по фактическим скважинным данным.

Достоверность полученных результатов

Достоверность разработанной геофильтрационной-геомиграционной модели и ее результатов расчета в составе ПС «ГЕОПОЛИС» для использования при обосновании безопасности ПГЗ ЖРО полигон «Северный» подтверждается верификацией модельных результатов по фактическим данным и прошедшей процедурой аттестации ПС в Ростехнадзоре с положительным заключением и выданным аттестационным паспортом. Результаты диссертации неоднократно докладывались на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на 17 международной конференции «Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Киото, 2019 г.), V международной научно-технической конференции «Информационные проекты и технологии ядерной энергетики» МНТК-НИКИЭТ (Москва, 2018 г.), 5 международной конференции «International Conference, Hydrus Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems» (Прага, 2017 г.), VI научном семинаре «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» (Снежинск, 2017 г.), X юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» (Москва, 2015 г.), XXII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2015 г.), VII съезде по радиационным исследованиям «Радиобиология, радиэкология, радиационная безопасность» (Москва, 2014 г.), XV, XVIII и XIX научных школах молодых ученых ИБРАЭ РАН (Москва, 2014, 2017 и 2018 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 5 статей в научных изданиях, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, 10 докладов на российских и международных конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 85 библиографических ссылок.

Общий объём работы составляет 133 страницы основного текста, включая 23 таблицы и 65 рисунков, в том числе графики.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её основная цель, задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, личный вклад автора, апробация и публикации.

Первая глава посвящена составу и особенностям технологий, применяемых в пунктах глубинного захоронения ЖРО. В первом разделе представлен опыт применения технологии закачки отходов в глубокие геологические слои в России и за рубежом. В основном это захоронения сточных вод, которые существуют в Германии, США, Великобритании, Японии и ряде других крупных государств. В России закачка жидких отходов применялась в химической и нефтяной промышленности. В атомной отрасли существуют три предприятия захоронения жидких радиоактивных отходов в глубокозалегающие слои – «Северский», «Дмитровградский» и «Железногорский» филиалы ФГУП «НО РАО».

Далее, в следующем разделе, приводится обзор предшествующих работ по моделированию пункта глубинного захоронения ЖРО полигон «Северный», который относится к «Железногорскому» филиалу ФГУП «НО РАО». Компьютерное моделирование такого сложного объекта было впервые проведено в конце прошлого века – в 1994 г (до этого моделирование проводилось только методом электрогидродинамической аналогии). В АО «ВНИПИпромтехнологии» был разработан специальный расчетный код и модель на его основе, с помощью которых был получен ряд выводов, в том числе вывод, что за 600 лет стабильные компоненты РАО, не взаимодействующие с породой, не достигнут границ горного отвода недр. В начале нового века имела место кооперация по моделированию полигона «Северный» между АО «ВНИПИпромтехнологии» и ИГЕМ РАН под эгидой международного института прикладного системного анализа (IIASA). В результате были созданы двумерные, однослойные модели. Один из основных выводов данной кооперации – быстро убывающая с течением времени скорость тепловыделения, то есть для долгосрочных прогнозов влияние тепловой конвекции не являлось существенным. Также был сделан вывод, что за 1000 лет не произойдет миграции отходов за пределы горного отвода недр, а также вывод, что наиболее точные и приближенные к реальности результаты расчета находятся примерно посередине между результатами моделирования без учета плотностной конвекции и результатами с ее учетом.

К 2009 году под руководством М. Б. Букаты в Томском политехническом институте была разработана модель, которая показала, что массоперенос актиноидов и других радионуклидов в подземных водах и породах объясняется химическими реакциями растворения-осаждения их окисных и гидроокисных минералов и дисперсией, тогда как сорбция и ионный обмен влияют на него незначительно. Годом позже в АО «ВНИПИпромтехнологии» была разработана

еще одна модель, которая давала возможность прогноза до 3000 лет, в результате которого несорбируемый нитрат-ион к 3000 году попадал в р. Кан, однако в концентрациях, ниже допустимых.

В целом материалы раздела показывают, что расчетные модели и реализующие их программные средства являются основным инструментом анализа долгосрочной безопасности объектов, а количество учитываемых процессов и иные параметры расчетных моделей существенным образом влияют на характер оценок безопасности. Анализ предшествующих моделей выявил их несовершенства и слабые места, в частности: отсутствие протяженности границ моделей до естественных дрен, что позволило бы проводить полный комплекс обоснования безопасности вплоть до оценок дозовых нагрузок в местах потребления воды, а также выполнять оценки долговременной безопасности; отсутствие применения модели двойной пористости и, как следствие, отсутствие обоснования миграционных параметров; отсутствие прозрачной и наглядной верификации моделей по фактическим скважинным данным (в первую очередь фильтрационной модели), подтверждающей корректность моделей и выполненных на их основе расчетов; отсутствие понятного обоснования принятых в моделях фильтрационных и миграционных параметров (не описанная в достаточной степени калибровка и отсутствие анализа чувствительности моделей).

Во второй главе диссертации представлены результаты анализа и систематизации данных о регионе размещения ПГЗ ЖРО полигон «Северный». При её подготовке учитывались рекомендации международных документов (SF-1, SSG-14, SSG-23), ориентированные на анализ и обоснование безопасности ПГЗ ЖРО с естественной ориентацией на гидрогеологический режим функционирования объекта. Ставилась задача систематизации всех необходимых для разработки полноценной модели данных с минимальными допущениями, которые окажут влияние на качество модели и верификацию эпигнозных расчетов.

Первый раздел представляет собой анализ природных условий местоположения объекта, которые могут влиять на безопасность и недоучет которых может внести определенные допущения и неточности в модель. Анализируются сведения о геологическом строении территории, которые впоследствии были учтены при построении расчетной модели, гидрогеологических условиях района расположения ПГЗ ЖРО, позволившие смоделировать гидрогеологическую ситуацию и обосновать границы модели. Также анализируются географические условия и гидрография района, позволившие установить граничные условия модели, типы и режимы захоронения отходов, в общих чертах дающие представление о том, как эксплуатация объекта была учтена в модели.

Далее, в следующем разделе, формируется перечень моделируемых процессов, имеющих место на территории размещения объекта. Это напорно-безнапорная фильтрация в нестационарном режиме (так как имеет место закачка/откачка), адвективный массоперенос с потоком подземных вод,

дисперсия и диффузия, сорбция радионуклидов, радиоактивный распад и двойная пористость среды – проницаемые каналы и непроницаемые блоки.

Особенный интерес представляет модель двойной пористости, в прошлом не применявшаяся в моделях данного объекта. В модели переноса в среде с двойной пористостью учитывается наличие проточной (*mobile – m*) и непроточной (*immobile – im*) зон в породе. В расчетном коде GeRa/V1, который служит расчетным ядром для модели ПГЗ ЖРО, использована так называемая модель сосредоточенной емкости при моделировании сред с двойной пористостью, в которой концентрация в непроточной зоне считается равновесной, то есть, динамика насыщения примесью непроточной зоны не учитывается. Решаемая система уравнений для насыщенной среды следующая:

$$\begin{cases} \varphi_m R_m \left(\frac{\partial C_m}{\partial t} + \lambda C_m \right) + \nabla (\bar{u} C_m) - \nabla D_m \nabla C_m + \zeta (C_m - C_{im}) = Q_s C_Q, \\ \varphi_{im} R_{im} \left(\frac{\partial C_{im}}{\partial t} + \lambda C_{im} \right) = \zeta (C_m - C_{im}), \end{cases}$$

где φ_m , φ_{im} – пористости проницаемой и непроницаемой зон соответственно [–]; \bar{u} – скорость фильтрации [LT^{-1}]; D_m – эффективный тензор диффузии-дисперсии в проточной зоне [L^2T^{-1}]; C_m , C_{im} – концентрации примесей [ML^{-3}]; Q – объемные источники-стоки [L^3T^{-1}]; C_Q – концентрация примеси в источнике-стоке [ML^{-3}], в случае стока равна C_m .

В третьем разделе уточняются границы области моделирования. Предшествующие модели данного объекта были ограничены горным отводом недр. В данной диссертационной работе границы разработанной модели привязаны к природным объектам – местам выхода коренных архейских пород на поверхность (непроницаемые границы модели), а также по региональным естественным дренам – рекам Енисей и Кан. Нижней границей модели также являются скальные архейские непроницаемые породы. Через верхнюю границу реализуется связь модели с атмосферой (испарение и инфильтрационное питание) и внутренними водотоками и водоемами (реками и болотами). Инфильтрационное питание территории реализовано неоднородным распределением инфильтрации по площади модели с учетом экспозиции и углов наклона склонов, типа рельефа, породами, преимущественно слагающими зону аэрации, и растительностью.

Завершает главу краткое описание систематизации всех исходных фактических данных по 179 скважинам, и создание единой базы данных, учитывающей сорокалетнюю историю эксплуатации полигона «Северный» с 1967 г. по 2011 г. (замеры концентрации 22 химических компонент и напора подземных вод в 152 скважинах), пригодной для дальнейшего наполнения фактическими скважинными данными по мере их поступления и применяющейся для верификации модели.

Таблица 1 – Сведения об имеющихся фактических данных в базе данных

179 скважин	15 нагнетательных	данные по закачке ЖРО в два пласта-коллектора	
	12 разгрузочных	данные по откачке воды из скважин обоих пластов-коллекторов	
	152 наблюдательные	концентрация и активность 22 хим. компонент; напор подземных вод	около 400 000 строк с фактическими данными

Проведенный анализ природных условий позволил определить граничные условия будущей трехмерной модели, определить необходимые для моделирования процессы, учет которых позволит создать полноценную трехмерную модель с достаточным набором процессов для решения задач обоснования безопасности и ряда эксплуатационных задач. Двойная пористость признана необходимой для учета в трехмерной модели. Собранные воедино в единую базу разрозненные фактические данные по 152 скважинам обеспечили возможность проведения дальнейших исследований (полноценной калибровки модели и обоснования приемлемости результатов расчетов). Также предстоит провести проверку корректности и отбраковку некачественных фактических данных.

Наиболее регулярный контроль химических компонент был отмечен по несорбируемому нитрат-иону и ^{90}Sr . В дальнейшем два этих компонента будут взяты для калибровки миграционной модели полигона «Северный». Несорбируемый нитрат-ион является основным маркером экологической безопасности, в том числе долгосрочной безопасности.

В **третьей главе** приведено описание разработки и параметризации фильтрационной модели и модели двойной пористости для данного объекта.

В начале главы рассматриваются особенности метода учета фильтрационной неоднородности по данным геологических скважин: приведено описание работы по оцифровке геологических колонок 107 скважин, пробуренных на территории расположения объекта атомной техники, и построенным на основе данных бурения карт неоднородных коэффициентов фильтрации для пластов-коллекторов. На основании результатов оцифровки было выделено 10 основных литологических разностей, определяющих фильтрационные свойства юрских отложений вблизи объекта. Для определения фильтрационных свойств каждой из литологических разностей были использованы данные 48 опытных откачек. Для каждого горизонта использовались лишь те скважины, в которых проводились откачки, которые соответствовали данному водоносному горизонту. Для I пласта-коллектора – 39 скважин с фактической водопроводимостью, определённой по откачке; для II – 25 скважин.

Среднее значение фактической проводимости для первого горизонта по всем скважинам – $42 \text{ м}^2/\text{сут}$, стандартное отклонение фактических значений проводимости от среднего значения для I горизонта составило – $30,4 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Среднее значение фактической проводимости для второго горизонта по всем скважинам – $24,3 \text{ м}^2/\text{сут}$, стандартное отклонение фактических значений проводимости от среднего значения для II горизонта составило – $9,3 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Эти данные использовались для отбраковки тех фактических проводимостей на полигоне в двух горизонтах, которые «лежат» за стандартным отклонением от среднего значения. То есть, для первого горизонта не учитывались при калибровке те скважины, фактическая проводимость в которых выше $72 \text{ м}^2/\text{сут}$ и ниже $12 \text{ м}^2/\text{сут}$, для второго горизонта не учитывались те скважины, фактическая проводимость в которых выше $34 \text{ м}^2/\text{сут}$ и ниже $15 \text{ м}^2/\text{сут}$. Это сделано в связи с сомнениями в корректности значений фактической проводимости в некоторых скважинах. Так, например, вызывает сомнение значение $0,21 \text{ м}^2/\text{сут}$ для скважины А-5, $1,03 \text{ м}^2/\text{сут}$ для скважины С-33 или $107,8 \text{ м}^2/\text{сут}$ для скважины А-26 (все скважины на I горизонт). Возможно, эти значения справедливы, то есть, для скважины А-26 действительно фактическая проводимость является достоверной. Но, судя по буровой колонке, такое высокое значение могли дать литологические разности среднезернистых и разномзернистых песков, которые в пределах I горизонта в этой скважине встречаются довольно часто. Видимо, это одна из локальных областей с крупными песками. Лишены логического обоснования низкие значения водопроводимости в скважине А-5: в отложениях I горизонта в основном присутствует литологическая разность конгломератов, гравелитов и песчаников, которая должна была бы дать высокое значение водопроводимости. Возможно, это просто ошибка расчёта водопроводимости. В отложениях I горизонта скважины С-33 встречаются угли. Очевидно, именно они занизили значение водопроводимости.

Тем не менее, учесть столь сложные геологические структуры по такому малому количеству скважин на такой обширной площади представлялось делом невозможным. Поэтому средние значения фактической проводимости и стандартные отклонения фактических значений проводимости от среднего были использованы для того, чтобы отсечь сомнительные замеры проводимостей на полигоне, которые лежали за пределами диапазона, определенного стандартным отклонением. Таким образом, общее число скважин для интерполяции по первому горизонту составило 29, для второго составило 19.

Известно, что проводимость (Т) горизонта равна сумме проводимостей отдельных его литологических разностей (прослоев), а проводимость отдельного прослоя – есть произведение коэффициента фильтрации (К) прослоя на мощность (m) прослоя. Таким образом, зная мощности литологических разностей внутри слоёв I и II для скважин, по которым была проведена откачка, были записаны уравнения для каждой скважины так, что сумма произведений коэффициентов фильтрации литологических разностей на мощность соответствующей разности есть проводимость, которая была определена по данным откачки. Для литологических разностей глин, суглинков и углей, которые имеют низкие коэффициенты фильтрации, значения коэффициентов фильтрации были выбраны по литературным данным. Значения коэффициентов фильтрации литологических разностей были найдены на основе

переопределённой системы уравнений (количество уравнений 48, неизвестных – 10). Неизвестные коэффициенты фильтрации были найдены с использованием оптимизационного кода PEST, добиваясь минимума функционала:

$$\sum_{j=1}^N (T_j - T_{\phi j})^2 = \min,$$

где T_j – водопроницаемость для скважины j , $T_{\phi j}$ – фактическое значение водопроницаемости для той же скважины.

После того, как параметры литологических разностей были определены, для скважин, по которым имелись буровые колонки и были известны слагающие их литологические разности, были оценены эффективные параметры коэффициентов фильтрации. В отличие от коэффициентов фильтрации литологических разностей, которые не зависят от направления, эффективные коэффициенты фильтрации могут различаться при фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлении. Расчет эффективных коэффициентов фильтрации модельных слоёв в вертикальном направлении и в горизонтальном направлении для каждой j -ой скважины проводился по формулам:

$$k_h = \frac{\sum_{i=1}^M k_i m_i}{\Delta z}, \quad k_v = \frac{\Delta z}{\sum_{i=1}^M \frac{m_i}{k_i}}, \quad \Delta z = \sum_{i=1}^M m_i,$$

где M – число литологических разностей, Δz – общая мощность слоя, k_h – эффективный коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, рассчитывается как среднее значение по высоте, k_v – эффективный коэффициент фильтрации в вертикальном направлении, рассчитывается как среднее гармоническое по высоте.

В том случае, если для скважины значение водопроницаемости было известно по данным опытных работ, значение эффективного коэффициента фильтрации в горизонтальном направлении принималось согласно:

$$k_h = \frac{T_{\phi}}{\Delta z}$$

Далее, данные по скважинам были проинтерполированы для получения неоднородных коэффициентов фильтрации в вертикальном и горизонтальном направлении.

Однако в ходе дальнейшего моделирования и детального изучения материалов о территории размещения полигона «Северный» стало понятно, что лучше соответствие модельных и фактических напоров достигается, если вводить зоны неоднородности в слоях модели с учетом анализа отчетов по эксплуатации полигона захоронения, в которых на основе опытных работ определялись места зон питания водоносных горизонтов и зон перетекания

между пластами-коллекторами. Это позволило откалибровать фильтрационную модель с приемлемой точностью (далее будут приведены численные оценки качества модели).

Дальнейшие исследования посвящены обоснованию выбора параметров модели массопереноса в среде с двойной пористостью. В начале раздела приводятся основные выводы, которые были получены при изучении трассерных испытаний по закачке трития на площадке MADE (Macrodispersion Experiment) базы Коламбус, в США. Расчетно-экспериментальными данными было показано, что модель двойной пористости адекватнее воспроизводит результаты эксперимента ввиду сложной неоднородной песчано-глинистой структуры слагающих территорию пород. Геологические условия территории расположения полигона захоронения схожи, также имеют сложное переслаивание песчаных и глинистых отложений, что позволяет говорить о корректности применения модели двойной пористости в данной работе. Далее, в этом же разделе, приведены результаты калибровки модели двойной пористости: значений мобильной, немобильной пористости и значения коэффициента массообмена между ними, позволяющие получить наиболее корректное сопоставление модельных и фактических результатов.

Значения мобильной пористости обоих эксплуатационных горизонтов при калибровке модели варьировались от 0,01 до 0,2. Оказалось, что при значении мобильной пористости, равном 0,02, результат более приближен к фактическим значениям концентрации нитрат-иона в скважинах, и в целом по модели наблюдается меньшее расхождение с фактическими данными именно при таком значении мобильной пористости для обоих пластов-коллекторов.

Значения немобильной пористости обоих эксплуатационных горизонтов при калибровке модели варьировались от 0,01 до 0,2, как и значения мобильной пористости. Для II эксплуатационного горизонта по результатам калибровки эта величина составила 0,11, для I – 0,05.

Значения коэффициента массообмена при калибровке модели варьировались от $1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ до $1 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$. Исходя из различных вариантов данного параметра, был сделан вывод, что при значении $K=1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ модельная кривая более приближена к фактической кривой в период с 1980 по 2010 год во II пласте-коллекторе. Увеличение значения коэффициента массообмена приводит к «задиранию» модельной концентрации и ухудшению общей оценки модели по нитрат-иону (окончательная оценка расхождения модельных значений с фактическими значениями по нитрат-иону приведена в четвертой главе диссертации). В I пласте-коллекторе ситуация более неоднозначная, однако значение параметра массообмена выбрано идентичным: именно при значении $K=1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ в скважинах модельная кривая нитрат-иона в среднем соответствует фактической кривой. А так как в модели в будущем предпочтителен консерватизм, то значение коэффициента массообмена между мобильной и немобильной зонами модели двойной пористости выбрано минимальным, равным $1 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ для обоих эксплуатационных горизонтов.

В третьем разделе исследуется влияние закачки в нагнетательную скважину на ближайшие к ней наблюдательные скважины во II пласте-коллекторе, что позволило установить взаимосвязь между нагнетанием и

наблюдениями, и обосновать значения мобильной пористости, в дальнейшем принятые в самой модели.

Выбран II пласт-коллектор, так как именно в нем есть продолжительные ряды наблюдений по скважинам, расположенным в непосредственной близости от нагнетательной скважины, в данном случае это скважины А-56, А-57, П-7 и нагнетательная скважина Н-8. Сравнивается концентрация в закачке в нагнетательной скважине и концентрация в наблюдательных скважинах, в особенности то время, когда концентрация в закачке была максимальной – 8 г/л, и время, когда в скважинах А-56, А-57, П-7 наблюдалась концентрация, равная 4 г/л (с учетом дисперсии фронт должен быть там, где значение равно половине от входной концентрации, то есть от 8 г/л). С учетом знаний этих времен получается, что от начала закачки до прихода фронта в, например, наблюдательную скважину А-57 прошел период времени от 7/3/1969 до 6/3/1970. Далее, с помощью аналитической формулы необходимо понять, в какой момент происходит приход фронта в наблюдательную скважину А-57 (оценить радиус влияния скважины нагнетания):

$$R = (Q \cdot t / (\pi \cdot m \cdot n))^{1/2}$$

Параметры, принятые в данной формуле, взяты из модели: средняя мощность пласта в районе скважины нагнетания и скважины наблюдения (m) составляет 91,2 м, активная пористость (n) – 0,02 (безразмерная). Далее были просуммированы дебиты (Q) в м³/сут, умноженные на количество дней в периоде (t), в течение которого происходила закачка с таким дебитом, вплоть до 6/3/1970. В результате подстановки данных в формулу радиус влияния скважины нагнетания получился равным 90,7 м, что практически соответствует расстоянию от нагнетательной до наблюдательной скважины, равному 92 м. Таким образом, подтверждается, что модельное значение активной пористости, равное 0,02, корректно, и было выбрано правильно.

Завершает главу непосредственно описание трехмерной геофильтрационной-геомиграционной модели ПГЗ ЖРО полигон «Северный» (рисунок 1): структура модели, граничные условия, начальные условия и параметры модели (фильтрационные параметры, полученные в результате калибровки модели на стационарный период (до начала закачки) и на нестационарный период (период эксплуатации полигона), емкостные, миграционные и сорбционные параметры).

Как уже было сказано выше, в ходе разработки модели, сопровождающейся изучением материалов о территории размещения полигона захоронения, стало понятно, что наилучшего сопоставления с фактическими данными удалось достичь в результате зонального задания коэффициентов фильтрации. Пример зон неоднородностей, введенных в слабопроницаемом слое, разделяющем два пласта-коллектора, приведен на рисунке 2, где арабскими цифрами обозначены разные зоны неоднородности. Зоны 1-3 обеспечивают питание I пласта-коллектора [Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. – 256 с.]; в зонах 4 и 5 коэффициент фильтрации повышен (зоны располагаются под рекой Б. Тель, места частичной разгрузки подземных вод I

пласта-коллектора в долину реки Б. Тель [Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. – 256 с.].

Проведенные исследования в третьей главе позволили установить несколько ключевых моментов, положительно повлиявших на качество модели. В первую очередь, это обоснованные фильтрационные параметры, учитывающие природные особенности (места питания и разгрузки подземных вод), что позволит в дальнейшем получить качественное сопоставление фактических и модельных напоров в скважинах. Исследование влияния закачки на концентрацию нитрат-иона в наблюдательных скважинах позволило установить параметры модели двойной пористости, которые в дальнейшем были подтверждены в результате калибровки трехмерной модели. Разработанная модель имеет обоснованные граничные условия с расширенными границами до природных мест разгрузки пластов-коллекторов, режим работы скважин нагнетания РАО и скважин откачки вод для поддержания пластового давления, обоснованные фильтрационные и емкостные параметры модели.

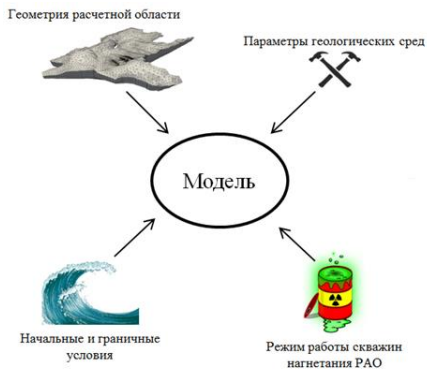


Рисунок 1 – Архитектура разработанной модели

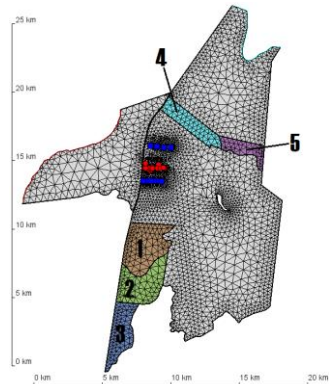


Рисунок 2 – Пример зон неоднородностей в разделяющем слое между горизонтами I и II

В **четвертой** главе представлены результаты анализа достоверности фактических данных, используемых при верификации разработанной модели, анализ чувствительности модели к фильтрационным свойствам Правобережного разлома, и, собственно, сама верификация разработанной модели.

Первый раздел посвящен анализу фактических данных и оценке их достоверности, отбраковке некорректных замеров фактического напора и концентраций, и рекомендациям по дальнейшей организации мониторинга, в частности указание на необходимость прокачки скважин тремя объемами воды перед пробоотбором, так как в скважинах из-за застойного режима может иметь место нитрат-редукция, способная привести к заметному снижению реальной концентрации нитрат-иона и неверному истолкованию фактического замера.

Однако, не стоит забывать о сложном геологическом строении территории расположения полигона – сложное переслаивание проницаемых песчаных и слабопроницаемых глинистых прослоев. То есть, низкие значения концентрации нитрат-иона могут быть связаны с обтеканием пластовой жидкостью локальных нефилтрующих прослоев. И в том, и в другом случае требуются дополнительные исследования, которые позволят сделать более обоснованные выводы о качестве результатов мониторинга.

Фактические величины концентраций нитрат-иона в некоторых наблюдательных скважинах позволяют усомниться в качестве замеров, например, в наблюдательной скважине П-20, расположенной ниже по потоку в сторону р. Кан. Исходя из анализа графиков закачки был сделан вывод о достаточно регулярном поступлении стабильно высокой концентрации нитрат-иона в нагнетательную скважину Н-8, являющуюся ближайшей нагнетательной скважиной во II горизонте к наблюдательной скважине П-20. Дебит закачки в скважину Н-8 выглядит весьма регулярным (3-4 месяца в году всегда присутствует закачка) и высоким: в среднем 250-300 м³/сут. Однако в наблюдательной скважине П-20, при этом, наблюдалось непонятное падение концентрации нитрат-иона после 1980 года при сохранении стабильного дебита закачки. Похожая ситуация наблюдается в ряде других скважин на II горизонт, а именно: в скважине А-18, которая располагается выше по потоку, скважине С-1 и скважине П-14. После 1980 года наблюдается снижение концентрации нитрат-иона в этих скважинах. Конкретно скважины П-20 и П-14 переведены на верхнюю часть II пласта-коллектора путем изоляции нижней части постановкой цементного стакана на глубине 170 м, что привело к снижению концентрации нитрат-иона (подтверждается наличие изолирующих свойств водоупорных прослоев). Предположительной причиной снижения концентрации нитрат-иона в остальных скважинах может быть их кольматация и разрушение фильтровых зон со временем. Воспроизвести данный эффект в модели представляется затруднительным. Стоит также отметить, что перед пробоотбором скважины не прокачивались.

В скважине С-1, например, расположенной ниже по потоку от нагнетательной скважины Н-7, ожидается наиболее существенное влияние режима работы скважины Н-7 на результаты замеров. Согласно графику изменения дебита закачки от времени в нагнетательной скважине Н-7, закачка прекратилась после 1994 года. Однако концентрация нитрат-иона в скважине С-1 упала ещё в 1980 году. Одиночные замеры в середине 2006 года, превышающие ПДК в воде в 10-30 раз, предположительно связаны с закачкой в нагнетательную скважину АН-31, также находящуюся недалеко от скважины С-1.

В наблюдениях по скважинам I пласта-коллектора также отмечаются нестыковки. Например, в мониторинговой скважине П-11, расположенной в зоне возможного влияния нагнетательных скважин Н-6, Н-11 (ближайшая), АН-16. На графике фактических данных измеренной концентрации нитрат-иона наблюдается резкий рост в 2009-2010 годах (до 80 г/л). Скважины Н-6 и Н-11 при этом работали без серьезных изменений режима, а АН-16 вовсе не

функционировала с 2006 года до осени 2010 года. То есть, этот рост не соответствует имеющимся исходным данным о закачке. Все подобные ситуации были проанализированы и описаны в этом разделе.

Далее, в следующем разделе, приведено описание калибровки фильтрационных свойств Правобережного тектонического нарушения. Стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам составляет наименьшее значение (3,2 %) при коэффициенте фильтрации, равном 10^{-5} м/сут, и такое же значение, при коэффициенте фильтрации, равном 10^{-7} м/сут. Однако было решено остановиться именно на наименьшем значении для наибольшей уверенности в непроницаемости разлома (по данным фильтрационных опытов, проводимых на территории расположения объекта, данное тектоническое нарушение характеризовалось, как непроницаемое). При коэффициенте фильтрации локального разлома, равном 10^{-3} м/сут, совпадение по скважинам хуже, относительная погрешность геофильтрационной модели составила 7,3 %.

Завершающий раздел отражает проведенную верификацию модели. В результате решения стационарной задачи стандартное отклонение модельных напоров от фактических по скважинам обоих эксплуатационных горизонтов составило 3,1 м. При максимальном перепаде фактических напоров, равным 97 м, относительная погрешность геофильтрационной модели по напору подземных вод составила 3,2 % (рисунок 3 – диагональный график напора по скважинам обоих эксплуатационных горизонтов).

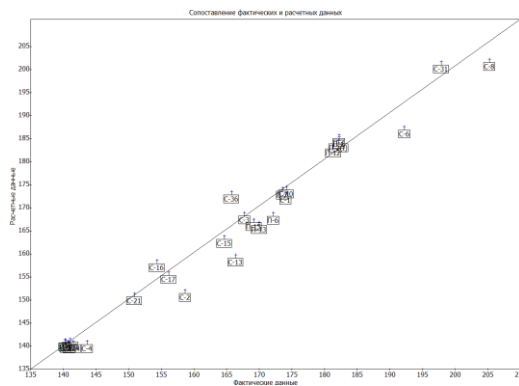


Рисунок 3 – График разброса напора по всем скважинам модели на стационарный период (02.01.1967, до начала закачки)

Для оценки качества решенной нестационарной задачи был применен широко распространенный подход оценки по масштабированному среднему квадратическому из ошибки (SRMS). Из 90 скважин модели на I и II эксплуатационные горизонты приходятся 80 скважин с имеющимися продолжительными рядами наблюдений. Из этих 80 скважин превышение значения SRMS, равного 10 %, наблюдается в 7 скважинах, что составляет около 9 % от общего количества скважин. Среднее значение SRMS по всем

скважинам составляет 5,4%. Рассчитывалась данная величина по нижеследующим формулам.

Среднее квадратическое из ошибки (Root Mean Square, RMS):

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2}$$

Масштабированный квадратный корень из среднеквадратичной ошибки:

$$SRMS = \frac{RMS}{\Delta H} \cdot 100\%,$$

где cal_i – i -ое расчетное значение, obs_i – i -ое наблюдаемое значение, N – количество значений.

На рисунке 4 приведено сопоставление модельного и фактического напора в двух скважинах (разные эксплуатационные горизонты) на нестационарный период.

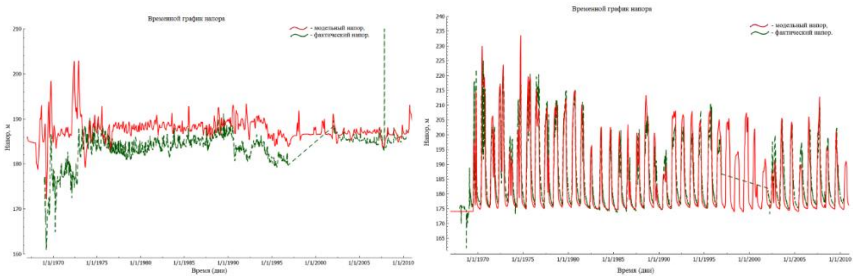


Рисунок 4 – Сопоставление модельного напора с фактическим напором для скважины I эксплуатационного горизонта (слева) и II эксплуатационного горизонта (справа)

Для миграционной модели получены консервативные решения, демонстрирующие превышение фактической концентрации нитрат-иона и активности ^{90}Sr в скважинах обоих пластов-коллекторов (рисунок 5).

Проведенная верификация модели позволила подтвердить приемлемость результатов фильтрационного моделирования: оценка качества модели показала невысокую ошибку расхождения модельных и фактических напоров в скважинах как на стационарный период (до начала закачки), так и на нестационарный период (воспроизведение истории изменения напоров в наблюдательных скважинах во время закачки ЖПО в пласты-коллекторы). Моделирование миграционной задачи показало консерватизм модели по нитрат-иону (модельные значения превышают фактические замеры в несколько раз) и консерватизм с запасом по расчетам миграции ^{90}Sr (модельные значения превышают фактические замеры на несколько порядков).

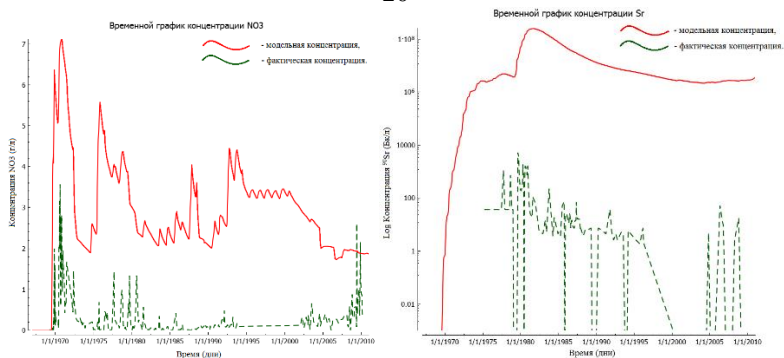


Рисунок 5 – Сопоставление модельной и фактической концентрации нитрат-иона (слева, II эксплуатационный горизонт) и активностей ^{90}Sr (справа, I эксплуатационный горизонт)

Консерватизм в модельных оценках характерен для подходов к радиационной защите и безопасности объектов использования атомной энергии. В данном случае, несмотря на чрезмерный консерватизм по ^{90}Sr , результаты таковы, что к 2010 г. ореол, соответствующий уровню вмешательства в питьевой воде (4900 Бк/м^3), далек от границ горного отвода недр. Модельная активность в скважинах, отстоящих от места закачки на 300 метров, превышает фактическую активность на порядки. Однако, ввиду неопределенности и недостаточной изученности возможного механизма коллоидного переноса, в данном случае предпочтительны именно консервативные оценки модели. Однако, даже с консервативными оценками, можно говорить о безопасности объекта по данному радионуклиду.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ:

Анализ предшествующих моделей объекта позволил сформулировать требования к новой разработанной модели, в которой:

1. объединены ранее моделируемые в разных моделях процессы геофильтрации и геомиграции;
2. впервые применена модель массопереноса в среде с двойной пористостью;
3. расчетная область расширена до мест естественной разгрузки подземных вод;
4. определены и обоснованы фильтрационные параметры и параметры двойной пористости слоев модели;
5. проведена калибровка модели по фактическим данным, в том числе калибровка фильтрационных свойств Правобережного тектонического нарушения;
6. проведена верификация модели по фактическим данным наблюдений за сорок лет эксплуатации объекта (с 1967 по 2011 г.);
7. выполнен эпигнозный расчет фильтрационной и миграционной задач.

Многочисленные и разрозненные фактические данные о территории расположения объекта (в том числе геологические карты и разрезы), данные об объемах закачки/разгрузки, а также около 120 буровых колонок скважин были собраны, оцифрованы, обработаны, систематизированы и использованы при построении модели. Данные мониторинга (уровни подземных вод и концентрации/активности химических компонент/радионуклидов) за сорокалетний период от начала работы полигона до 2011 г. собраны в единую базу данных, пригодную для дальнейшего наполнения, и насчитывающую около 400 000 строк с фактическими данными.

Предложенные и обоснованные фильтрационные параметры, и параметры двойной пористости адекватно позволяют решить эпигнозную задачу, что подтверждается невысокими численными значениями отклонений модельных расчетов от фактических замеров. При обосновании фильтрационных свойств пластов-коллекторов и водоупорных горизонтов территории размещения ПГЗ ЖРО были учтены зоны питания и перетекания между горизонтами, знания о которых были почерпнуты в ходе детального изучения отчетов об эксплуатации полигона за разные годы, а также из отчетов о детальных гидрогеологических исследованиях, проводившихся на территории расположения объекта.

В ходе разработки модели, обоснования и калибровки фильтрационных параметров и параметров двойной пористости, и проведенной верификацией модели по фактическим данным удалось существенно уточнить и конкретизировать диапазоны для параметров, определенные в [Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИзДАТ, 1994. – 256 с.]:

1. коэффициенты фильтрации пластов-коллекторов лежат в следующих диапазонах:

- для I пласта-коллектора от 0,1 до 0,5 м/сут;
- для II пласта-коллектора от 0,1 до 0,35 м/сут.

2. параметры модели массопереноса в среде с двойной пористостью следующие:

- для I пласта-коллектора активная пористость составляет 0,02, пористость блоков – 0,05;
- для II пласта-коллектора активная пористость составляет 0,02, пористость блоков – 0,11;
- коэффициент массообмена для обоих пластов-коллекторов принят равным $1 \cdot 10^{-5}$ сут⁻¹.

Применение двойной пористости позволило адекватнее решить эпигнозную задачу распространения загрязнений, в частности нитрат-иона

Коэффициент фильтрации Правобережного тектонического нарушения в ходе калибровки и верификации модели принят равным $1 \cdot 10^{-7}$ м/сут, что согласуется с полевыми фильтрационными исследованиями, проводимыми на территории расположения объекта, подтвердившими непроницаемость данного локального разлома.

Проведенный анализ фактических данных (скважинные замеры напоров подземных вод и концентрации загрязнителей) позволил выявить несовершенства в способе отбора проб концентраций и дать рекомендации по дальнейшей организации мониторинга.

Расширенные границы модели (до региональных дрен) позволяют использовать разработанную геофильтрационную-геомиграционную модель при обосновании безопасности полигона захоронения ЖРО (расчеты возможны вплоть до оценки дозовых нагрузок на население в местах естественного потребления воды и нахождения у водоемов).

Проведенные эпигнозные миграционные расчеты (до 2011 г.) распространения в обоих пластах-коллекторах несорбируемого нитрат-иона и ^{90}Sr показали консерватизм модели, однако, при этом, ореолы распространения обоих компонент не выходят за границы горного отвода недр.

Разработанная модель позволяет проводить прогнозные расчеты геомиграции загрязнителей в подземных водах и использоваться для решения ряда эксплуатационных задач, а также для расчетов долговременных последствий аварийных ситуаций на данной территории.

Разработанная модель прошла процедуру аттестации в Ростехнадзоре; с ее помощью будет закрыта часть основных вопросов условия действия лицензии (численные оценки уже имеющегося объема ЖРО в геологической среде, исходные данные для оценки остаточной емкости пластов-коллекторов, данные для оценки дозовых нагрузок в местах естественной разгрузки подземных вод и, соответственно, местах потребления воды населением и т.д.). Разработанная модель является ключевым индикатором программы работ по устранению замечаний миссии МАГАТЭ и позволяет выполнить следующие задачи, решаемые в ходе реализации программы: разработку программных средств для реализации математических моделей, их верификацию и аттестацию; обоснование критериев приемлемости ЖРО для захоронения на основе оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО. В 2022 году модель будет использована для выполнения долговременной безопасности в рамках обоснования материалов продления лицензии на эксплуатацию объекта. По результатам эпигнозных расчетов написана статья о геофильтрационном моделировании с обоснованием и верификацией выбранных геофильтрационных модельных параметров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Савельева Е.А., Сускин В.В., Расторгуев А.В., Понизов А.В. Моделирование пространственной неоднородности осадочного пласта в районе пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Горный журнал. 2015. № 10, с. 21-25.
2. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В., Никитин К.Д. Верификация моделей ненасыщенной фильтрации и переноса в зоне аэрации на примере расчетного кода GeRa. ВАНТ. Серия ММФП. 2017. № 1, с. 60-75.

3. Сускин В.В., Савкин М.Н., Уткин С.С., Коновалов В.Ю., Понизов А.В. Применение эмпирического и расчетного методов при оценке возможных нарушений нормальной эксплуатации на объектах захоронения жидких РАО // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 22—34. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-22-34.
4. Сускин В.В., Капырин И.В., Григорьев Ф.В. Оценка эффективности барьера «стена в грунте» при создании приповерхностных пунктов консервации и захоронения РАО // Радиоактивные отходы 2021 № 1 (14) С 96—105 DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-96-105.
5. **Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В. Программное средство «ГЕОПОЛИС»: геофильтрационное моделирование пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов полигона «Северный». Горный журнал. 2021. № 5, с. 91-97.**
6. Сускин В.В. Учёт влияния неоднородности при обосновании модели полигона захоронения ЖРО. Сборник трудов XV научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2014. с. 196-199.
7. Сускин В.В., Иванов В.А. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели полигона захоронения ЖРО «Северный». Тезисы докладов VII съезда по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность). 2014. с. 340.
8. Сускин В.В., Иванов В.А., Капырин И.В., Понизов А.В. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели пункта захоронения ЖРО «Железнодорожный». Тезисы докладов XXII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов». 2015. электронный сборник.
9. Иванов В.А., Капырин И.В., Расторгуев А.В., Савельева Е.А., Сускин В.В. Расчётный комплекс «Геополис» для обоснования безопасности пункта глубинного захоронения РАО. Сборник тезисов докладов 10-й юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». 2015. с. 62.
10. Неуважаев Г.Д., Капырин И.В., Болдырев К.А., Сускин В.В. Применение расчётного кода GeRa в практических задачах оценки безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов различных типов. Тезисы докладов VI научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. 2017. с. 17.
11. Suskin V.V., Kapyrin I.V., Rastorguev A.V. Modeling unsaturated groundwater flow and transport in the vadose zone using GeRa code. 5th International Conference, Hydrus Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems. ISBN: 978-80-213-2749-8. 2017, p. 44.

12. Сускин В.В., Савельева Е.А. Моделирование аварийных сценариев на полигоне захоронения ЖРО «Северный». Сборник трудов XVIII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2017. с. 142-144.
13. Григорьев Ф.В., Капырин И.В., Коньшин И.Н., Копытов Г.В., Сускин В.В. Развитие интегрального кода GeRa для обоснования безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. Сборник тезисов докладов V международной научно-технической конференции «Информационные проекты и технологии ядерной энергетики» МНТК-НИКИЭТ-2018, с. 182.
14. Сускин В.В., Капырин И.В., Расторгуев А.В. Возможности ПС ГЕОПОЛИС для моделирования ПГЗ ЖРО полигона «Северный». Сборник трудов XIX научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2018. с. 167-170.
15. Suskin V.V., Kapyrin I.V., Rastorguev A.V., Konovalov V.Yu. «THREE-DIMENSIONAL MODELLING OF THE LIQUID RADIOACTIVE WASTE INJECTION SITE "SEVERNYI" USING GEOPOLIS SOFTWARE» Book of abstracts of 17th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration 2019), pp. 143-144.

Сускин Виктор Викторович

Разработка и обоснование расчетной модели анализа безопасности пункта
глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «полигон
«Северный»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.04.2022 г.
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary.
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66