

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВМиМГ СО РАН)

Просп. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090
Тел.: (383)330-83-53, факс (383)330-87-83, e-mail: director@sccc.ru
ОКПО 03533843, ОГРН 1025403656420, ИНН/КПП 5408100025/540801001

03.05.2023 № 15301/1-01-27

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИВМиМГ СО РАН,
д.ф.-м.н., профессор РАН
/Марченко М. А./
«28» апрель 2023 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Ануприенко Дениса Валерьевича

на тему «Эффективные методы решения задач фильтрации и пороупругости на неструктурированных сетках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Целью данной диссертационной работы Д.В. Ануприенко является разработка методов решения задач, возникающих при моделировании процесса течения подземных вод в условиях переменной насыщенности пористой среды с учетом упругих деформаций. Для полного описания фильтрации воды и воздуха в пористых средах требуются трехфазные модели, которые учитывают твердую, жидкую и газовую фазы. В данной работе используется модель Ричардса, где учет газовой фазы происходит через вводимые в уравнения коэффициенты, связанные с неполной насыщенностью пор водой в предположении, что вода является несжимаемой и не меняет свою вязкость.

Для построения вычислительной модели Ричардса в диссертации предлагается пространственная дискретизация на основе центрированного метода конечных объемов, используемого в рамках неструктурированных сеток с ячейками различной формы. Одновременно с использованием метода конечных объемов для уравнений

фильтрации был применен метод виртуальных элементов построения вычислительной модели для задачи пороупругости. Для численной реализации возникающих нелинейных систем, являющихся результатом чисто неявной аппроксимации по времени, проанализированы различные подходы. В частности, для задачи фильтрации рассмотрен подход, основанный на продолжении по параметру, а для задачи пороупругости рассматривается метод расщепления с фиксированными деформациями.

Актуальность темы исследования. В диссертации подробно изложена мотивация исследования с точки зрения ее актуальности. При этом в подтверждение актуальности проводится анализ современной литературы по теме исследования. Подход к обоснованию актуальности несколько необычный, но мы считаем его вполне приемлимым. При этом речь идет как о моделировании течений подземных вод с учетом различных гидромеханических факторов, так и о вычислительной технологии, использующей сложные сеточные описания объекта и сопутствующие методы построения алгоритмов, имеющие дело с дискретными системами с многими миллионами степеней свободы.

Содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 102 страницы, включая 19 таблиц и 29 рисунков. Список литературы содержит 164 наименования.

Во введении подробно аргументируется актуальность темы диссертации, указывается цель исследования, формулируются задачи, решение которых способствует достижению указанной цели, обсуждается научная новизна и практическая значимость результатов диссертации, кратко формулируется методология и методы исследования. Также приводятся аргументы о достоверности полученных результатов, дана информация об апробации работы, о личном вкладе соискателя в проведенных исследованиях.

В первой главе производится выбор уравнений, описывающих фильтрацию жидкости в деформируемой пористой среде с переменной, вообще говоря, сильно меняющейся насыщенностью. При этом поры заполнены водой или воздухом, хотя

наличие воздуха учитывается не непосредственно, а в результате некоторой гомогенизации модели. Тем не менее, представлена двухконтинуальная модель, когда в каждой пространственной точке определены параметры деформируемого скелета и жидкости. Основу модели фильтрации составляет уравнение Ричардса, а для описания деформирования пористой среды используется модель Био.

Вторая глава целиком посвящена пространственной дискретизации предложенной в первой главе дифференциальной задачи. Методической основой дискретизации является центрированный метод конечных объемов для задачи Ричардса и метод виртуальных элементов для задачи пороупругости. При этом дискретизация расчетной области основана на использовании неструктурированной сетки с ячейками различной формы.

В третьей главе рассматриваются подходы и методы решения дискретных нелинейных систем, к которым приводятся сеточные стационарные и нестационарные с аппроксимацией неявной схемой Эйлера уравнения фильтрации и пороупругости. Для задачи фильтрации детально рассмотрен метод продолжения по параметру, а для задачи пороупругости – метод расщепления с фиксированными деформациями.

В четвертой главе дано краткое описание программного комплекса, реализующего разработанную вычислительную модель, приведены результаты вычислений для ряда практических примеров. Описанные в данной работе методы реализованы на языке C++. Методы решения уравнения Ричардса включены в программный комплекс GeRa. Для сопутствующих средств, таких как работа с неструктурированными сетками, методы решения систем линейных алгебраических уравнений и пр., использовалась платформа INMOST, разрабатываемая в ИВМ РАН им. Г.И. Марчука. Эксперименты проводились с использованием MPI технологии распараллеливания на 140 ядрах кластера ИВМ.

Для проверки эффективности разработанных методов были проведены тесты на нескольких задачах: классической задаче о дамбе, двух задачах на реальных объектах (объектах А и Б), задаче о Кучинском полигоне твердых бытовых отходов. Кроме того, рассматривались примеры, иллюстрирующие работоспособность

различных элементов вычислительной технологии. В частности, проводились эксперименты для итераций Пикара и Ньютона, выяснялась эффективность различных корректоров в методе продолжения и предиктора первого порядка и пр. Рассматривались задачи о капиллярном барьере, о пласте с разломом, о глубинной закачке.

В заключении приведены основные результаты диссертации. Следует отметить, что диссертация хорошо «сбалансирована» с точки зрения специальности 1.2.2 – математическое моделирование (глава 1), численные методы (главы 2 и 3) и комплексы программ (глава 4). В каждой из глав имеются новые содержательные результаты. И, наконец, отметим, что работа прекрасно оформлена, написана ясным языком, содержательно проиллюстрирована.

Научная новизна. Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, являются новыми. Автором была предложена новая комбинация централизованного метода конечных объемов и метода виртуальных элементов для решения задачи фильтрации – пороупругости. Для задачи фильтрации разработан метод продолжения по параметру в виде процедуры типа предиктор–корректор. Для задачи пороупругости предложен метод итерационного расщепления.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретические результаты данной работы состоят в развитии новой алгоритмической базы для исследованного класса задач и могут быть использованы в научной работе в ИВМ им. Г.И. Марчука РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ИВМиМГ СО РАН, ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН и других научных организациях. Практическая значимость состоит в развитии программного комплекса, который может быть применен для оценки безопасности пунктов захоронения влияющих на подземные воды объектов. В частности, разработанный программный комплекс может быть использован организациями, занимающиеся подземной закачкой радиоактивных отходов – например, АО «ГНЦ НИИАР» (Дмитровград), АО «СХК» (Северск) и др.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации. Достоверность применяемых в работе математических методов не вызывает сомнений. Разработанные в ходе выполнения работ программные комплексы были

верифицированы на известных задачах механики сплошных сред для проверки адекватности результатов. В ходе работы над диссертацией соискатель активно участвовал во всероссийских и международных конференциях, представлял свои результаты в рецензируемых научных изданиях, включая международные.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, в том числе статья в журнале из первого квартиля. Материал диссертации полно представлен в опубликованных работах.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие **замечания:**

1). Было бы интересно протестировать модель Ричардса на предмет корректного описания физики процесса, поскольку предположения, используемые при выводе этих уравнений, могут влиять на точность результатов при моделировании фильтрации воды и воздуха в пористых средах. В частности, когда поры заполнены только жидкостью или только воздухом, модель Ричардса может давать неточные результаты. Также хотелось бы иметь представление о степени достоверности решения с точки зрения сделанных предположений в рамках упрощения модели пороупругости.

2). В диссертации следовало бы привести более детальную информацию по реальным объектам А и В для лучшего понимания процессов фильтрации в результате численного моделирования.

3). На наш взгляд, несколько неудобным для чтения оформлен список литературы – не по алфавиту, а по порядку упоминания источника. Такое оформление затрудняет анализ списка литературных источников.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки проделанной работы. Диссертация содержит новые результаты, имеющие научную и практическую значимость для решения широкого класса инженерных задач.

Заключение о диссертации. Диссертационная работа Ануприенко Дениса Валерьевича является научно-квалификационным исследованием, в котором предлагаются методы решения задач, возникающих при моделировании процесса

течения подземных вод в условиях переменной насыщенности пористой среды с учетом упругих деформаций. Работа отвечает паспорту научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Выносимые на защиту результаты работы обладают научной новизной, личный вклад автора в их получение не подлежит сомнению. Диссертация отвечает требованиям «Положения о присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ануприенко Денис Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация и автореферат Д.В. Ануприенко заслушаны и обсуждены на заседании семинара лаборатории Математических задач химии при участии главного научного сотрудника лаборатории Вычислительных задач геофизики д.ф.-м.н. Г.В. Решетовой 28 апреля 2023 года, протокол № 1 - 2023.

Полное название организации: ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН

Адрес: 630090, Новосибирск, Просп. Академика Лаврентьева, 6

Сайт организации: <https://icmmg.nsc.ru>

Электронная почта: director@sscc.ru

Телефон: +7 (383) 330-83-53

Зав. лабораторией Математических задач химии,
зав. кафедрой вычислительной математики НГУ
д.ф.-м.н., профессор


Юрий Миронович Лаевский

Подпись Ю.М. Лаевского удостоверяю

Заведующая отделом кадров ИВМиМГ СО РАН  Е.Ю. Трофимкина

