

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН «Институт
вычислительной математики и
математической геофизики Сибирского
отделения Российской академии наук»
(ИВМиМГ СО РАН), профессор РАН,
доктор Физико-математических наук



Марченко М.А

10.08.2022

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт
вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения
Российской академии наук»

на диссертацию Овчинниковой Анастасии Сергеевны на тему: «Численное моделирование процессов неизотермической многофазной фильтрации в задачах нефтедобычи с учетом различного взаимодействия фаз и фазовых переходов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность темы исследования

Численное моделирование процессов многофазной фильтрации применяется для решения многих классов научных и технологических задач и при определенной общности подходов должно учитывать специфику конкретной решаемой задачи. Процессы многофазной фильтрации в сложных нефтяных коллекторах имеют много особенностей. Создаваемые методы численного моделирования должны адекватно учитывать структуру реальных коллекторов, наличие множества добывающих и нагнетательных скважин, различные технологические аспекты, связанные, например, с использованием химических методов для увеличения нефтеотдачи на месторождениях вязкой нефти или на поздней стадии разработки нефтегазовых месторождений. Диссертационная работа Овчинниковой А.С. направлена на решение этих задач и поэтому является актуальной.

2. Структура и содержание работы

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (119 наименований) и 2 приложений. Общий объем диссертации – 152 страницы.

Во введении приведен достаточно полный обзор современного состояния темы исследования и существующих подходов к решению рассмотренной проблемы. Обоснована актуальность темы исследования, поставлены цели и задачи исследования, указаны основные научные результаты, их новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе диссертационной работы приводится математический аппарат, используемый для моделирования процессов неизотермической многофазной фильтрации сжимаемых фаз, сопровождающихся химическими реакциями, фазовыми переходами и процессами растворения газа и дегазацией. Предложена вычислительная схема для расчета теплового взаимодействия смеси флюидов и породы, в которой используется коэффициент, характеризующий скорость теплообмена между ними. Описывается способ оценки данного коэффициента.

Приводится описание метода линеаризации правых частей уравнения для давления и краевых условий для ускорения сходимости итерационного процесса, необходимого для расчета поля давления. Предложены специальные краевые условия, позволяющие исключить итерационный процесс для получения корректного давления вдоль ствола скважины с учетом гидростатического напора жидкости.

Во второй главе приводится конечноэлементная аппроксимация краевой задачи для давления с использованием несогласованных сеток с конечными элементами в виде шестигранников. Подробно описан алгоритм расчета изменений объемов фаз, образовавшихся в результате различных химических реакций, перемешивания фаз, фазовых переходов, изменения плотности фаз в зависимости от давления и температуры. Приводится алгоритм расчета поля давления и температуры с учетом итерационных процессов, используемых при решении нелинейного уравнения для давления. Подробно описаны алгоритм вычисления потоков фаз на основе полученного поля давления и алгоритм расчета нового состояния среды, включающий в себя вычисление новых компонентно-фазового состава и распределения температуры смеси флюидов.

В третьей главе представлены особенности разработанной подсистемы программного комплекса для моделирования неизоэнтальной многофазной фильтрации. Описана общая архитектура программного комплекса, описано взаимодействие разработанной подсистемы с другими компонентами комплекса. Подробно представлена схема работы подсистемы для моделирования многофазных течений, описаны используемые структуры данных.

Приводятся результаты моделирования процессов фильтрации для демонстрационной модели, отражающей основные особенности реального месторождения. Решена задача, где совместно с течением флюидов в коллекторе протекает несколько других сложных процессов, включая переход компонент из одной фазы в другую, химические реакции, сопровождающиеся образованием новой фазы и выделением тепла. При этом на каждом временном шаге контролировалось выполнение законов сохранения масс каждой компоненты и тепловой энергии в системе.

В четвертой главе представлены результаты верификации разработанных моделей и численных методов. Приведены результаты решения задач, имеющих аналитическое решение, а также результаты сравнения с расчетами, выполненными с использованием программного комплекса Tempest. Проведено сравнение результатов решения задач из сравнительного проекта SPE (Society of Petroleum Engineers – общество инженеров-нефтяников) с результатами участников этого проекта.

В пятой главе приводятся результаты применения разработанного численного метода для решения задачи автоадаптации модели нефтяного месторождения по истории его разработки. Показано, что расчетные и практические данные достаточно хорошо совпадают как в период, по которому выполнялась адаптация, так и в прогнозный период.

Приводятся результаты численных экспериментов по моделированию химических методов увеличения нефтеотдачи (с использованием технологий полимерного и ПАВ-полимерного заводнения) для месторождения высоковязкой нефти. Проведены исследования сходимости разработанной численной схемы при дроблении шагов по пространству и по времени. Приводятся результаты численных экспериментов по применению тепловых методов увеличения нефтеотдачи для модели месторождения сверхвязкой нефти.

В заключении приводятся основные результаты работы.

Представленные результаты диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора. Основные результаты диссертации были представлены на международных и российских научно-практических конференциях. Апробация результатов исследований, представленных в диссертации, проведена в достаточной мере. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 статей в изданиях, индексируемых в международных информационно-

аналитических системах научного цитирования Web of Science и/или Scopus, в том числе одна статья в журнале первого квартала. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Обоснованность и достоверность результатов, выводов и заключений

Верификации разработанного численного метода посвящена отдельная глава диссертационной работы. Были решены задачи, имеющие аналитическое решение, при этом полученные в результате расчетов решения отличались от аналитических не более чем на 0.05%. Также было проведено сравнение с результатами расчетов, полученных с использованием программного комплекса Tempest. Отклонение в накопленной добыче нефти составило порядка 2-3%. Еще одним этапом верификации являлось решение трех задач из сравнительного проекта SPE. В них моделировались различные процессы, включая процесс разработки нефтегазового месторождения, многофазную фильтрацию в высоконеоднородных средах, а также неизотермическую фильтрацию. Полученные с использованием предложенного численного метода характеристики нефтедобычи лежат либо между соответствующими результатами участников проекта SPE, либо близко к ним. Таким образом, подтверждается обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертационной работе.

Дополнительным критерием корректности разработанных процедур решения прямых задач является факт успешной апробации предложенных подходов при решении задач автоадаптации моделей реальных нефтяных месторождений.

4. Научная новизна

1) Предложена математическая модель неизотермической многофазной многокомпонентной фильтрации, учитывающая влияние гравитационных сил, сжимаемости фаз и породы, различные химические реакции, перемешивание фаз и фазовые переходы.

2) Предложенный численный метод трехмерного моделирования неизотермического многофазного многокомпонентного сжимаемого потока фаз на основе конечноэлементного расчета давления и явного переноса фаз на каждом временном шаге реализует новый подход для расчета насыщенностей фаз в ячейках сетки.

3) Предложена оригинальная вычислительная схема для расчета теплового взаимодействия матрицы-породы и смеси флюидов с использованием коэффициента, характеризующего скорость теплообмена между ними. Предложен способ оценки данного коэффициента.

5. Практическая значимость работы

Разработанные в данной диссертационной работе математическая модель и алгоритмы численного моделирования процессов неизотермической фильтрации позволяют решать практические задачи нефтедобычи в сложных средах с большим числом действующих скважин и могут использоваться для анализа и прогнозирования эффективности как традиционных способов разработки, так и процессов нефтедобычи при использовании методов увеличения нефтеотдачи пластов (химических и тепловых).

Разработанная Овчинниковой А.С. программная подсистема включена в состав программного комплекса для решения прямых и обратных задач многофазной фильтрации и использовалась при решении практических задач нефтедобычи, таких как построение цифровых моделей месторождений высоковязкой нефти Республики Татарстан.

6. Теоретическая значимость работы

Разработанная математическая модель и численный метод моделирования процессов многофазной многокомпонентной неизотермической фильтрации могут служить теоретической базой для дальнейшего развития методов моделирования течения многофазной смеси в пористых средах с использованием метода конечных элементов.

7. Рекомендации по использованию результатов работы

Разработанный Овчинниковой А.С. численный метод для моделирования процессов неизотермической многофазной фильтрации и реализующие его программные средства могут быть использованы в научно-производственных организациях и нефтедобывающих компаниях для гидродинамического моделирования различных процессов, протекающих в нефтяных коллекторах в ходе разработки месторождения.

8. Замечания по диссертации

- 1) Неясно, в чем преимущество рассмотренного подхода к расчету давления с использованием скважин увеличенного радиуса широко применяемого метода Писмана.
- 2) Диссертационная работа несколько перегружена большим количеством технических деталей разработанного численного метода. Возможно, следовало акцентировать внимание на ключевых аспектах математической модели.

9. Заключение

Диссертационная работа Овчинниковой А.С. «Численное моделирование процессов неизотермической многофазной фильтрации в задачах нефтедобычи с учетом различного взаимодействия фаз и фазовых переходов» представляет собой научно-квалификационную работу, посвященную решению актуальной научной и практической проблемы. Разработанные подходы и программы имеют существенное значение для развития методов моделирования различных процессов многофазной фильтрации и применялись для решения практических задач нефтедобычи.

Работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» и специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, поскольку в работе присутствуют результаты по всем трем составляющим специальности:

- 1) Математическое моделирование:
 - предложена математическая модель неизотермической многофазной фильтрации сжимаемых фаз с учетом различного взаимодействия фаз (химические реакции, перемешивание фаз, растворение газа и дегазация) и фазовых переходов
- 2) Численные методы:
 - разработаны алгоритмы численного трехмерного моделирования многофазного многокомпонентного сжимаемого потока фаз в условиях химических и тепловых воздействий на пластовую систему
- 3) Комплексы программ:
 - разработана подсистема программного комплекса, реализующая предложенный численный метод моделирования процессов неизотермической многофазной фильтрации.

Диссертационная работа Овчинниковой А.С. соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

- П.1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений
- П.3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий
- П.4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Автор диссертации, Овчинникова Анастасия Сергеевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа и отзыв на нее обсуждены и одобрены на объединенном семинаре ИВМиМГ СО РАН и кафедры вычислительной математики ММФ НГУ, протокол №47 от 09.08. 2022 г.

Отзыв подготовил главный научный сотрудник лаборатории «Вычислительной физики» ИВМиМГ СО РАН, д.ф.-м.н. по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ В.М. Свешников.

Отзыв утвердил

г.н.с. лаборатории вычислительной физики ИВМиМГ СО РАН,

д.ф.-м.н. по специальности

05.13.18 - Математическое моделирование,

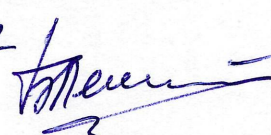
численные методы и комплексы программ

В.М. Свешников

Подпись В.М. Свешников

Ученый секретарь ИВМи

Л.В. Вшивкова

Получил в совет
12.08.22


с отзывом диаколлеса
15.08.2022 