

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Меретина Алексея Сергеевича «Разработка термодинамически согласованных математических моделей и методов математического моделирования для анализа тепловых методов увеличения нефтеотдачи», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность. Диссертационная работа Меретина А.С. посвящена разработке термодинамически согласованной математической модели термопороупругой среды с учетом разрушения. Модель является обобщением классической теории Био за счет использования нового вида определяющих соотношений, позволяющих учитывать неизотермические эффекты, а также процессы разрушения среды. Моделирование разрушения среды выполнено с использованием допущений теории континуального разрушения. Решение системы уравнений модели производится с использованием вычислительного алгоритма, основанного на методе конечных элементов и реализованного в виде программного комплекса. Автор работы рассматривает модель в контексте ее применения к термическим методам воздействия на нефтяной пласт, для оценки эффективности которых требуется учитывать взаимное влияние различных физических процессов. В представленной диссертационной работе рассматриваются вопросы построения математических моделей термопороупругой среды с учетом разрушения и практические аспекты их использования для моделирования термических методов воздействия на нефтяной пласт. Результаты диссертации представляются **чрезвычайно важными и востребованными**. В работе приведены результаты сравнения работы программы с аналитическим решением и расчеты на примере постановок, характерных для процесса нефтегазодобычи.

Диссертационная работа является актуальной. Предложенная математическая модель и алгоритмы могут быть применены для анализа задач не только в геофизике, но и ряде других предметных областей, которые требуют анализа течений в пористых проницаемых средах с учетом расширенного комплекса эффектов, например, технологии доменного производства.

Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение и список литературы.

Во введении описана поставленная задача, рассмотрены основные подходы к её решению, обоснована актуальность задачи, описана научная новизна, достоверность и обоснованность результатов, а также приведен список публикаций автора.

В первой главе приведена физико-математическая модель термопоороупругой среды, учитывающая процессы разрушения. Выводится базовая система уравнений, основанная на законах сохранения массы, импульса и энергии. Система уравнений модели замыкается определяющими соотношениями. Вывод определяющих соотношений получен из второго начала термодинамики с использованием процедуры Колмана-Нолла. Таким образом гарантируется, что они обеспечивают выполнение принципа термодинамической согласованности.

Разрушение моделируется с использованием подхода континуальной механики разрушения. В рамках данной теории предполагается, что разрушение описывается некоторым параметром, называемым параметром повреждаемости, эволюция которого задана некоторым кинетическим уравнением. В диссертационной работе приведен обширный обзор различных моделей эволюции параметра повреждаемости, а также связанных с ним корреляций.

Во второй главе приведено описание вычислительного алгоритма для решения системы уравнений модели. Основными неизвестными в модели являются перемещения, давление и температура. Вычислительный алгоритм основан на методе конечных элементов, поэтому система уравнений приводится к слабой постановке. Для пространственной дискретизации используются тетраэдральные элементы Тейлора-Худа, имеющие второй порядок аппроксимации по перемещениям и первый по давлению. Система уравнений решается методом Ньютона, в качестве линейного солвера используется метод BiCGStab с предобуславливателем ILU. Для улучшения сходимости используются различные преобразования матрицы системы.

В третьей главе описан реализованный программный комплекс, основанный на разработанной модели и вычислительном алгоритме. Данный программный комплекс состоит из нескольких модулей. Модуль препроцессинга

отвечает за считывание входных данных, формирование расчетной сетки и инициализацию модели. В расчетном ядре производится сборка матрицы системы и правой части и решение системы нелинейных уравнений. После завершения расчетного шага рассчитывается параметр повреждаемости и учитывается его влияние на упругие модули и фильтрационно-емкостные свойства среды. В модуле постпроцессинга производится подготовка выходных файлов для их дальнейшего анализа и визуализации.

В четвертой главе приведен анализ результатов работы программного комплекса. Первая серия расчетов направлена на валидацию работы программы путем сравнения результатов с известными аналитическими решениями на примере простых случаев. Во второй серии приводятся примеры расчетов в практических постановках, имеющих отношение к нефтяной промышленности. В частности, проводится оценка разрушения нефтяного пласта при термическом воздействии путем закачки горячего флюида. Рассматриваются различные постановки и оценивается влияние физических эффектов на полученные результаты.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе А.С. Меретина соответствует общепринятой в рамках специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Рассматриваемая математическая модель эволюции термопогрупуемых сред с учетом разрушения основана на общих законах и уравнениях механики сплошной среды и всесторонне апробирована.

Ключевыми результатами диссертационной работы является разработанная термодинамически согласованная физико-математическая модель, вычислительный алгоритм и программный комплекс. **Новизна** работы заключается в предлагаемом виде определяющих соотношений, позволяющих учитывать влияние на пористую среду различных эффектов, таких как деформация скелета, фильтрация флюида по поровому пространству, изменение температуры и разрушение. Для решения системы уравнений модели предложен вычислительный алгоритм на основе метода конечных элементов и реализован программный комплекс. Стоит отметить, что все математические формулы, приведенные в

работе, сопровождаются подробным выводом, что подтверждает их корректность. Кроме того, предложенная автором модель верифицирована путем сравнения результатов расчета программного комплекса с известными аналитическими решениями для ряда упрощенных постановок. Сравнение показало удовлетворительное согласование результатов.

В диссертационной работе можно выделить следующие недостатки:

1. В модели рассматривается однофазный поток, однако в реальных средах (например, нефтяном пласте) реализуется многофазная фильтрация.
2. При выводе определяющих соотношений автор вводит большое количество вспомогательных коэффициентов, однако далее, при проведении численных расчетов, значительная часть из них зануляется. Это требует дополнительных пояснений.
3. При проведении численных расчетов на примере моделирования теплового воздействия на нефтяной пласт отсутствуют какие-либо сравнения с экспериментальными данными или результатами расчета других программ.
4. Имеется опечатка в описании коэффициентов формулы (4.2) на с.86. Коэффициент α должен быть безразмерным.

Отмеченные замечания не являются существенными и не снижают общей ценности диссертационной работы. Диссертационная работа обладает научной новизной в областях физики, связанных с исследованием механики сплошных сред. **Практическая ценность работы** также не вызывает сомнений, поскольку её результаты могут быть использованы при решении реальных практических задач, что и было продемонстрировано автором.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Меретина А.С. «Разработка термодинамически согласованных математических моделей и методов математического моделирования для анализа тепловых методов увеличения нефтеотдачи», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне и является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором

исследований получено решение научной задачи моделирования эволюции термопороупругих сред с учетом разрушения, имеющей значение для развития механики сплошных сред и при проектировании термических методов разработки нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами.

Автореферат диссертации составлен с соблюдением установленных требований, дает полное и правильное представление о работе. Диссертационная работа удовлетворяет паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а также всем критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней ВАК для кандидатских диссертаций, а её автор Меретин Алексей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по искомой специальности.

Отзыв составил официальный оппонент Булгакова Гузель Талгатовна, профессор кафедры математики Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, профессор.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», 450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

Рабочий телефон: +7 (908) 350-22-76.

e-mail: bulgakova.guzel@mail.ru

Булгакова Г.Т.

Дата «18» 01 2022 г.



Подпись *Булгаковой Г.Т.*
Удостоверяю «18» 01 2022 г.
Начальник отдела документационного обеспечения архива *Рашидов Д.Ф.*