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 работы. Исследования процессов разрушения материалов проводятся в различных областях науки и техники, таких как металлургия, строительство, геология, медицина и так далее, однако данная тема до сих пор является не до конца изученной. Актуальность данных исследований обусловлена необходимостью прогнозирования развития разрушения с использованием инструментов математического моделирования. Сложность построения такого рода моделей заключается в необходимости учета сопутствующих процессов, таких как механическая нагрузка, температурные деформации, изменение физических свойств материала и прочие.

В диссертационной работе Меретина А.С. решена задача разработки средств математического моделирования — физико-математической модели, описывающей изменение состояния термопороупругой среды с учетом процессов разрушения, соответствующих вычислительных алгоритмов и их программной реализации. Данная задача особенно актуальна для нефтегазовой отрасли в связи с необходимостью корректного моделирования процессов, происходящих в горных породах. Особенный интерес представляют случаи наличия скважин, нагнетающих флюид при высоких давлениях и температурах, существенно отличающихся от пластовых. Разработанная модель позволяет корректно описывать такие случаи за счет учета процессов деформации породы, фильтрации флюида, изменения температурного поля, а также разрушения среды. Разработанный в диссертационной работе вычислительный алгоритм для численного решения уравнений предложенной модели, реализованный в виде программного комплекса, пригоден для решения практических задач.

Содержание работы. Во введении приведены цели и задачи работы, обоснована актуальность и новизна работы, а также приведен список публикаций по данной теме.

В первой главе приведена постановка физико-математической модели и перечисляются основные допущения, принятые в модели. Приводится вывод базовой системы уравнений, включающей в себя основные законы сохранения. Замыкающие соотношения для системы уравнений модели выводятся из второго начала термодинамики.

Приводится выражение для энтропийного неравенства, учитывающее затраты энергии на разрушение среды, которое далее преобразовывается к неравенству диссипаций. Из этого неравенства выводятся основные замыкающие соотношения, содержащие в себе слагаемые для учета разрушения.

Во второй главе описан разработанный вычислительный алгоритм, основанный на методе конечных элементов. Приведена запись системы уравнений модели в слабой постановке. Дискретизация по времени производится по неявной схеме для перемещений, давления и температуры. Кроме того, в главе приведено описание алгоритмов обработки матрицы системы, направленных на ускорение сходимости расчета.

В третьей главе приведено описание программного комплекса, разработанного в рамках диссертационной работы. В нем реализована математическая модель и вычислительный алгоритм, описанные в первой и второй главе работы. Данный программный комплекс позволяет моделировать термическое воздействие на нефтяной пласт и учитывать эффекты деформации породы, фильтрации флюида в пласте, изменения температурного поля пласта вследствие закачки теплоносителя, а также разрушение породы.

В четвертой главе приведены результаты расчетов, полученных с использованием программного комплекса. Первая часть расчетов является валидационной и направлена на сопоставление результатов моделирования с известными аналитическими решениями для простых случаев. Вторая часть расчетов направлена на демонстрацию возможностей программы применительно к моделированию термического воздействия на пласт. Рассмотрены несколько случаев закачки теплоносителя в пласт, проанализированы полученные результаты и сделаны выводы о влиянии различных процессов на изменение состояния среды.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы и кратко описаны планы по дальнейшему развитию исследования.

Новизна работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми. Разработана новая физико-математическая модель, позволяющая учитывать разрушение термопороупругой среды и являющаяся термодинамически согласованной. Также для данной модели разработан вычислительный алгоритм на основе метода конечных элементов и реализован программный комплекс для расчета термического воздействия на нефтяной пласт. Результаты расчетов, полученных с использованием данного программного комплекса, также являются новыми и позволяют оценить вклад разрушения на состояние пласта.

Практическая ценность работы. Диссертационная работа представляет практическую ценность, поскольку разработанная модель является достаточно общей и может быть применима в различных отраслях науки, в которых изучается поведение термопороупругих сред под внешним воздействием. Реализованный программный комплекс может быть применен в нефтедобывающей отрасли для оценки эффективности мероприятий, направленных на увеличение нефтеотдачи пласта.

Недостатки работы. По работе можно отметить следующие замечания:

- 1. Разработанная физико-математическая модель получена в приближении упругих деформаций. При этом пластические деформации совершенно не учитываются, хотя в рассматриваемых условиях (сильные изменения порового давления и температуры) пластические деформации могут оказать существенное влияние на результаты. Рекомендуется учесть это при дальнейшем развитии работы.
- 2. Основное внимание при разработке математической модели и алгоритма уделено описанию процессов непосредственно в пористой проницаемой среде. Вместе с тем, для практического применения разработанных методов моделирования, необходима реализация дополнительные инструменты по работе с построением расчетной сетки и распределением свойств на ней, заданием сложных режимов работы скважин, выгрузкой дополнительных данных для анализа.
- 3. Список литературы состоит в основном из зарубежных работ. Хотелось бы уделить больше внимания трудам российских ученых.

Указанные замечания являются незначительными и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение. В диссертационной работе Меретина А.С. рассматривается актуальная тема, посвященная анализу поведения термопороупругой среды под внешним воздействием. Автор продемонстрировал хорошее знание предметной области и всесторонне рассмотрел проблему. Работа является новой с научной точки зрения и обладает практической значимостью.

В рамках проделанной работы автор разработал термодинамически согласованную физико-математическую модель эволюции термопороупругой среды с учетом разрушения, разработал вычислительные алгоритмы для решения системы уравнений модели и реализовал программный комплекс, и тем самым внес существенный вклад в развитие подходов к моделированию пористых сред. В связи с этим можно сделать вывод, что

диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Меретин Алексей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник,

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)»

кандидат физико-математических наук,

Герке Кирилл Миронович,

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1,

Телефон: +79661877715

e-mail: kg@ifz.ru

Герке К. М.

Дата «<u>20</u>» <u>embazel</u> 2022 г.

Подпись К.М. Герке удостоверяю.

Подпись

УДОСТОВЕРЯЮ