

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735
ИНН/КПП 7729138338/772901001

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПМех РАН
д.ф.-м.н. Якуш С.Е.

« 24 »



24.01.2022 № 4504/01-2141,1-41

На № _____

ОТЗЫВ

ведущей организации 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»

Диссертационная работа Меретина А.С. посвящена разработке средств математического моделирования эффектов, сопровождающих процесс теплового воздействия на нефтяной пласт. В рамках диссертационной работы предложена новая физико-математическая модель процесса вытеснения, позволяющая учесть фильтрационные и механические эффекты, а также разрушение среды. Также предложены вычислительные алгоритмы для решения системы уравнений модели, реализованные в составе разработанного автором программного комплекса, пригодного для решения задач в реалистичных постановках.

Актуальность диссертационной работы. Математическое моделирование занимает важное место в процессе планирования и анализа эффективности разработки нефтяных месторождений. При этом, в связи с постоянным совершенствованием подходов к добыче углеводородов, используемые для моделирования инструменты математического моделирования также требуют соответствующего развития. В частности, одним из современных трендов нефтяного инжиниринга является использование тепловых методов увеличения нефтеотдачи. Данные методы обладают значительным потенциалом применительно к добыче нефти из сверхнизкопроницаемых коллекторов, однако являются технологически сложными в реализации и требуют больших финансовых вложений. Соответственно, при принятии решения об использовании данных методов на промысле, необходимо иметь эффективные инструменты для анализа способов их применения, оптимизации и оценки их эффективности. Сложность этой

задачи заключается в том, что соответствующая математическая модель должна корректно учитывать взаимное влияние целого ряда процессов, таких как фильтрация флюида в пласте, динамику изменение температурного поля, эволюцию напряженно-деформированного состояния среды и разрушение породы. Описанная задача является крайне сложной и не имеет в настоящее время законченного решения. Это связано как с недостаточным пониманием сложной взаимосвязи происходящих в пласте процессов, так и со сложностью разработки адекватных инструментов математического моделирования. Общепринятые подходы к моделированию рассматриваемого класса процессов в настоящее время отсутствуют. Как правило, на практике используются несколько программных комплексов, каждый из которых моделирует отдельно взятый процесс (деформацию, фильтрацию, неизотермические эффекты). Очевидно, такой подход обладает рядом недостатков, связанных со сложностью подготовки модели объекта исследования, синхронизацией данных между отдельными решателями, вероятностью получения нефизичных результатов в силу не вполне корректного связывания между группами уравнений модели, отсутствием учета перекрестных эффектов и так далее.

Диссертационная работа Меретина А.С. направлена на решение указанной проблемы. С одной стороны, разработанная автором математическая модель является термодинамически согласованной и учитывает процесс континуального разрушения. С другой, предложенные автором вычислительные алгоритмы позволяют использовать данную модель для проведения практических расчетов, что подтверждается результатами тестирования реализованного автором программного комплекса. Таким образом, полученные в работе результаты являются актуальными и несомненно создают задел в развитии рассматриваемой прикладной тематики.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа представлена на 117 страницах, содержит 36 иллюстраций и 9 таблиц. Список литературы содержит 111 наименований.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, освещены актуальность, разработанность, новизна и значимость выбранной проблематики, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе описана базовая система уравнений модели Био термopорoупругой среды. Приведен вывод определяющих соотношений, учитывающих влияние разрушения среды. Вид определяющих соотношений получен с использованием процедуры Колмана-Нолла.

Во второй главе приводится описание численных алгоритмов для решения уравнений модели. Вычислительный алгоритм основан на методе конечных элементов, дискретизация уравнений по времени производится по неявной схеме для перемещений, давления и температуры.

В третьей главе приводится описание реализованного программного комплекса, его основных компонентов, формата входных и выходных данных.

В четвертой главе приведены результаты валидационных расчетов с использованием программного комплекса, а также примеры его использования для решения практических задач.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В качестве основных результатов работы можно отметить:

1. Термодинамически согласованную физико-математическую модель разрушения термопороупругой среды с учетом разрушения.
2. Вычислительный алгоритм расчета эволюции термопороупругой среды с учетом разрушения, основанный на методе конечных элементов.
3. Программный комплекс для моделирования теплового воздействия на нефтяной пласт.

Все результаты получены лично автором и представлены в 6 публикациях из перечня ВАК, из них 2 индексируются в базе данных Scopus и 1 – Web of Science.

Новизна и практическая значимость.

Полученные в работе результаты являются новыми. Предложенная математическая модель учитывает все основные процессы, происходящие при тепловом воздействии на пласт с учетом термомеханических эффектов и разрушения. Полученные автором определяющие соотношения удовлетворяют принципу термодинамической согласованности и, при этом могут быть сведены к более традиционным моделям разрушения, применяемых в задачах механики сплошной среды. Разработанные вычислительные алгоритмы позволяют решать задачу в полной постановке и допускают формальные обобщения на более сложные варианты модели. Разработанная программная реализация пригодна для анализа задач в реалистичных постановках в рамках разработанной самосогласованной математической модели.

Практически значимыми результатами работы являются разработанная модель, математические алгоритмы, а также программный комплекс, позволяющий проводить расчеты прикладного характера. Результаты работ могут применяться для решения целого ряда, связанных с анализом и применением тепловых методов воздействия на пласт. Потенциальными потребителями результатов работ могут являться компании-разработчики нефтегазовых месторождений, сервисные компании, отраслевые научно-исследовательские и проектные институты.

Достоверность результатов. Достоверность разработанных моделей и алгоритмов обеспечивается за счет обоснованности вывода всех используемых в работе соотношений и строгости применяемого математического аппарата. Для вывода определяющих соотношений модели автор использует обоснованные методы рациональной термомеханики сплошной среды и процедуру Колмана-Нолла, гарантирующую корректность предложенной модели с точки зрения выполнения соответствующего энтропийного неравенства. Для построения аппроксимаций задачи используются обоснованные методы на основе метода конечных элементов. Корректность предложенных алгоритмов и их программной реализации подтверждена путем проведения

валидационных тестов. Результаты работы докладывались на различных конференциях, а также были опубликованы в печатных работах, в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Замечания по диссертационной работе. К работе имеется ряд замечаний:

1. Использование единого скалярного параметра поврежденности для описания и процессов деформирования, и разрушения, в том виде, как это представлено в работе, представляется слишком упрощенным (см., например, Salganik R.L., Gotlib V.A. Continuum versus discontinuum damage mechanics of creep caused by microcracking. International Journal of Fracture. 2000. Т. 101. № 3. С. 181-201) и едва ли может рассматриваться кроме как первое приближение.

2. Представленный обзор, посвященный описанию процессов деформирования и разрушения в терминах теории повреждаемости, способам введения параметра поврежденности и его связи с параметрами, характеризующими пористость и проницаемость хотя и весьма обширен, но мало критичен, выбор зависимости для использования в модели представляется достаточно произвольным.

3. Что касается стилистики и строгости изложения, необходимо отметить, что описания и формулировки не всегда достаточно точны и иногда допускают неоднозначные толкования. Так в автореферате говорится: «Для обеспечения устойчивости конечномерной задачи применялся ряд подходов, в соответствии с которыми преобразовывалась матрица системы (15), такие как метод диагонализации матриц масс, введение обезразмеривающих коэффициентов и перестановка строк и столбцов по алгоритму Катхилла-Макки». Не совсем ясно идет ли речь о технических моментах решения систем уравнений или о проблемах, связанных с возможной плохой обусловленностью матриц. На стр. 10 описывается модель Био, а затем альтернативная модель. Не ясна идея модели и ее отличие от модели Био. Не ясно говорится ли далее о модели Био или об альтернативной модели. В формулах (1.26), записаны соотношения, содержащие частные производные. Для ясности понимания весьма желательно было бы указать, какие величины при взятии данных частных производных постоянны. По-видимому, $pT D$ для первого выражения, и т.д. В литературе по термодинамике для этого существует общепринятая нотация. То же самое можно сказать о формулах 1.27. В последствии при использовании введенных величин остается за кадром постоянство каких величин предполагалось при взятии входящих в них частных производных. Далее, конечно, говорится о наборе параметров, так, что данное замечание относится скорее к стилистике, чем к сути изложения. Помимо этого, Заключение названо главой 5. Также в тексте работы имеются опечатки. Так на стр 10 «Особенностью данной модели является то, пороупругая среда описывается тремя упругими модулями» - пропущено «что».

Приведенные замечания не снижают научной и практической ценности полученных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение ведущей организации. Диссертационная работа Меретина А.С. является законченным научным исследованием, содержащим новые результаты в области математического моделирования процессов в пористых проницаемых средах с учетом неизотермических и геомеханических эффектов применительно к задачам нефтяной геофизики. Задачи, решаемые в данной работе, являются актуальными. Все результаты получены автором лично и обладают как научной новизной и значимостью, так и практической ценностью. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, выполненным по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв ведущей организации на диссертацию обсужден на заседании научного семинара лаборатории геомеханики 13 января 2022 года, протокол заседания № 1.

Устинов Константин Борисович,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики ИПМех РАН

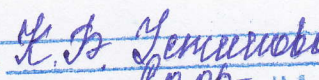
Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Адрес: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Телефон: 8 495 434 00 17

Сайт организации: <https://ipmnet.ru/>

e-mail: ipm@ipmnet.ru

ПОДПИСЬ  С.А. Сафронова
Зам. Канцелярии
2022

