

В диссертационный совет  
Д.501.001.89 при Московском  
государственном университете  
имени М.В. Ломоносова

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора Н.М.Дмитриева  
на диссертационную работу **Афанасьева Андрея Александровича**

**«Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в  
широком диапазоне давлений и температур»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-  
математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости,  
газа и плазмы

**Актуальность темы диссертации.** Диссертационная работа Афанасьева А.А. посвящена многофазным течениям жидкостей и газов в пористой среде с взаимосвязанными гидродинамическими и термодинамическими явлениями, обусловленными фазовыми превращениями и критическими условиями. Многие модели фильтрации ограничены только докритическими термодинамическими условиями. Проблема их развития на случай околокритических и сверхкритических условий связана с тем, что при критических условиях плотности, вязкости и компонентный состав фаз чувствительны к малым изменениям давления и температуры; они нелинейно зависят от термобарических условий. Как следствие, теоретическое исследование и численное моделирование фильтрации в широком диапазоне давлений температур, в котором возможно несколько различных линий критических параметров и качественно различные многофазные парожидкостные равновесия, вызывает значительные аналитические и вычислительные трудности. Исследованию фильтрации в подобных условиях и посвящена диссертационная работа Афанасьева А.А. В диссертации для моделирования фильтрации используется система законов сохранения и закон Дарси, замкнутая задачей условного экстремума для определения парожидкостных равновесий бинарной смеси углекислый газ-вода. Из решения данной задачи как при до-, так и при сверхкритических условиях определяется многофазное состояние смеси с максимальной энтропией. Для эффективного численного моделирования фильтрации применяются независимые переменные специального вида.

Тема диссертации актуальна также для многих задач рационального недропользования, в частности для разработки углеводородных месторождений, подземного хранения газа и других приложений. Более точное описание фильтрации позволяет надёжнее прогнозировать показатели эксплуатации пластов и оптимизировать их разработку.

Нелинейный характер моделей фильтрации существенно ограничивает применение аналитических методов исследования, способствуя значительному развитию методов прямого численного моделирования. Исследование и расчёт фильтрационных процессов остаётся очень востребованным как в научных исследованиях, так и при обосновании и оптимизации методов разработки месторождений полезных ископаемых. В этой связи, разработанный автором комплекс программ для численного моделирования фильтрации, в котором используются новые предложенные в диссертации методы, является актуальным результатом работы, имеющим практическую значимость.

Диссертационная работа имеет следующую структуру: семь глав, первая из которых есть введение; заключение; список обозначений и список литературы. Объём диссертации составляет 293 страницы, в том числе 79 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 169 наименований.

В первой главе описана предметная область исследований, актуальность темы диссертационной работы, степень проработанности, формулируются цели и задачи исследования и приводятся положения, выносимые на защиту. Дается обзор существующих моделей фильтрации и предлагаемых в диссертации методов. В этой главе также содержатся сведения о практической значимости работы, научной новизне, апробации; обозначается личный вклад автора в совместных работах.

Во второй главе проведено аналитическое исследование уравнений неизотермической фильтрации в случае произвольного числа компонентов и фаз флюида. Получено представление Годунова для смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию, и выведено уравнение на энтропию. Показано, что при фильтрации со значительным перепадом глубин, например в геотермальных системах, необходимо учитывать работу силы тяжести. Если работой силы тяжести пренебречь, то уравнения фильтрации не согласуются со вторым законом термодинамики. Продемонстрировано, что представление уравнений фильтрации в форме Годунова может использоваться для построения корректных конечно-разностных схем

расчёта фильтрации. Построена конечно-разностная схема, удовлетворяющая условию неотрицательного производства энтропии.

В третьей главе описан разработанный автором метод расчёта теплофизических параметров бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав. Обоснованы постановка и метод решения задачи расчёта многофазных парожидкостных равновесий бинарных смесей. Продемонстрировано, что метод позволяет надёжно рассчитывать многофазные состояния бинарной смеси углекислый газ-вода в широком диапазоне давлений и температур. Построены фазовые диаграммы смесей.

В четвёртой главе проведён дисперсионный анализ уравнений неизотермической фильтрации бинарной смеси в областях различного фазового состояния смеси, с учётом и без учёта теплопроводности. Показано, что в пренебрежении теплопроводностью в областях однофазной и двухфазной фильтрации существует две действительных характеристики. Одна характеристика описывает изотермические процессы фильтрации, а вторая – фазовые переходы. На фазовой плоскости исследовано поведение адиабат сильных разрывов.

В пятой главе приведены результаты приложения разработанных методов моделирования фильтрации к процессу нагнетания газа в водонасыщенный пласт. Решена задача Римана для данного процесса. Описаны последовательности сильных разрывов и волн, распространяющихся от скважины в пласт. Даны оценки применимости решения задачи Римана для описания реальных параметров течения в пористой среде при закачке газа. Впервые исследованы физические механизмы, приводящие к неоднородному распределению температуры при утечке газа. Показано, что фазовые переходы между жидким и газообразным углекислым газом могут приводить к снижению температуры ниже пластового значения. Решены трёхмерные инженерные задачи о нагнетании газа в реальные водонасыщенные пласты. Для одного из рассмотренных пластов определено более оптимальное положение скважины.

В шестой главе разработанные методы применены к природным течениям в геотермальных системах и кимберлитовых трубках. Впервые рассмотрена фильтрация в глубоких нагретых областях геотермальных систем, где температура превышает критическую температуру воды. Построена полномасштабная трёхмерная модель одной из геотермальных систем, в рамках которой определены параметры, наиболее сильно влияющие на интенсивность конвекции. Впервые рассмотрена фильтрация с учётом

минеральных реакций в кимберлитовых трубках. Проведены двухмерные расчёты остывания трубок и исследована устойчивость протекания реакций.

В седьмой главе описан разработанный автором комплекс программ для численного моделирования фильтрации. Убедительно продемонстрировано, что комплекс позволяет рассчитывать течения во многих практических приложениях: при подземном захоронении углекислого газа и хранении углеводородного газа, при разработке месторождений нефти и газа, в геотермальной энергетике. Показаны, что результаты расчётов тестовых задач в комплексе, в частности тестов СПЕ, согласуются с расчётами в альтернативных пакетах программ.

Новизна диссертационной работы состоит в развитии знаний в области неизотермической многофазной фильтрации при до- и сверхкритических термодинамических условиях, определением требований к корректным постановкам задач неизотермической фильтрации, решением новых фундаментальных и прикладных задач в различных приложениях рационального недропользования.

Достоверность результатов обеспечена тем, что автор использует классические уравнения механики сплошной среды и известные результаты теории нелинейных волн и сильных разрывов. Достоверность расчёта теплофизических свойств бинарной смеси углекислый газ-вода в широком диапазоне давлений и температур обеспечивается хорошим совпадением результатов расчётов с лабораторными измерениями, доступными из открытых источников. Достоверность результатов расчётов гидродинамики обеспечивается применением традиционной для задач фильтрации противоточной конечно-разностной схемой и совпадением результатов расчётов модельных задач с численными решениями, полученными другими авторами. Также, достоверность исследований подтверждается совпадением результатов расчёта конвекции в геотермальной системе CampiFlegrei с натурными измерениями потоков газа и тепла на поверхности и с измерениями температуры в геотермальных скважинах.

Все основные результаты диссертации получены автором самостоятельно и частично в соавторстве. Автору принадлежат обобщение представления Годунова на случай смешанных систем уравнений фильтрации, ускоренный метод расчёта теплофизических свойств бинарных смесей в широком диапазоне давлений и температур, асимптотический метод исследования волновых пакетов для смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию, решение задачи Римана, описывающей

нагнетание закритического углекислого газа в водонасыщенный пласт, комплекс программ для численного моделирования многофазной фильтрации на суперкомпьютерных вычислительных системах. Все положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем.

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 статьях в журналах из перечня ВАК.

В дальнейшем результаты диссертации, особенно разработанный комплекс программ, несомненно могут использоваться в проектных институтах нефтегазовой отрасли для расчёта показателей разработки месторождений, а также в образовательных и исследовательских целях в институтах нефтегазового профиля.

По диссертационной работе Афанасьева А.А. можно сделать следующие замечания:

1. В работе не уделено достаточно внимания влиянию примеси соли в воде на рассмотренные процессы фильтрации углекислого газа и воды. Солёность существенно влияет на плотность и вязкость жидкой фазы и, также, на растворимость газа;
2. В исследованиях не нашёл отражения вопрос как изменятся построенные волновые конфигурации в случае, если учесть растекание газа вдоль кровли пласта. В одномерной постановке задачи Римана течение газа в вертикальном направлении к кровле пласта не учитывается.

Данные замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация А.А. Афанасьева представляет собой законченную актуальную, достоверную и обоснованную научно-исследовательскую работу, с возможностью практического применения и потенциалом дальнейшего исследования. Работа выполнена на высоком научном уровне. Диссертационная работа написана квалифицированно и последовательно. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Афанасьева Андрея Александровича «Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси в широком диапазоне давлений и температур» соответствует всем критериям, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней №842 от 24.09.2013, а её автор заслуживает присуждения учёной степени

