

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И  
МАШИНОСТРОЕНИЯ**  
Казанского научного центра  
Российской академии наук  
(ИММ КазНЦ РАН)

Ул. Лобачевского, 2/31, г. Казань, 420111  
Тел./факс (843)236-52-89  
ИНН/КПП 1660021513/166001001  
ОГРН 1021603625493  
immkazan@mail.ru http://www.imm.knc.ru

18.05.2016 г. № 17345/12-6804.2/112

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
механики и машиностроения  
Казанского научного центра  
Российской академии наук  
чл.-корр. РАН



Губайдуллин Дамир Анварович

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Афанасьева Андрея Александровича  
«Термогидродинамическое исследование фильтрации бинарной смеси  
в широком диапазоне давлений и температур»,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-  
математических наук по специальности  
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

В диссертации Афанасьева А.А. развиты методы теоретического исследования и численного моделирования неизотермической многофазной фильтрации в условиях усложнённых фазовых переходов и критических явлений. **Актуальность** данного направления исследований для проблем рационального недропользования не вызывает сомнений как с научной точки зрения – получение новых знаний о вкладе нелинейных эффектов в показатели многофазных многокомпонентных течений в пористой среде, так и в прикладном плане: при подземном хранении (или захоронении) газа, разработке углеводородных месторождений и эксплуатации геотермальных систем. В данных приложениях течение флюидов в геологических пластах сопровождается сложными процессами, связанными как с неоднородным распределением фильтрационно-ёмкостных свойств и нелинейным видом кривых относительной фазовой проницаемости, так и со сложной зависимостью теплофизических свойств пластового флюида от давления, температуры и компонентного состава.

**Научная новизна** диссертации обусловлена тем, что в ней рассмотрены новые методы математического моделирования и

аналитического исследования неизотермических течений в проницаемых геологических пластах с учётом сложного термодинамического описания свойств насыщающих флюидов. Основное внимание в диссертации уделено фильтрации в широком диапазоне давлений и температур, содержащем линии критических термодинамических параметров и области значительного не только количественного, но и качественного изменения теплофизических параметров флюида. Разработаны новые подходы для описания и исследования подобных процессов с взаимосвязанными гидродинамическими и термодинамическими явлениями, в которых могут формироваться области с двухфазными состояниями пластовых флюидов, с термодинамическими равновесиями типа жидкость-пар или жидкость-жидкость, а также области с трёхфазным состоянием, с равновесием жидкость-жидкость-пар. Показано, что образование подобных областей может существенно влиять на гидродинамику движения флюидов. Автор разработал не только эффективный метод моделирования данных процессов, но и применил его к широкому кругу задач фильтрации.

Диссертация объёмом 293 страницы, состоит из семи глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы (169 наименований).

**В первой главе** даётся введение в исследуемую тематику. Показано, что существующие численные модели фильтрации не позволяют надёжно описывать неизотермическую фильтрацию при до- и сверхкритических термодинамических условиях с различными многофазными парожидкостными равновесиями. Предлагается концепция метода, который развивается и применяется в последующих главах диссертации.

**Вторая глава** посвящена аналитическим исследованиям уравнений многокомпонентной многофазной неизотермической фильтрации. Результаты данной главы имеют общетеоретическое значение, так как они могут применяться к фильтрации смесей, состоящих из произвольного числа компонент (не обязательно два компонента). Получено общее представление уравнений фильтрации, из которого выведен ряд важных результатов. В аналитическом виде получено условие согласованности уравнений фильтрации со вторым началом термодинамики и разработана конечно-разностная схема, удовлетворяющая данному условию.

**В третьей главе** автор развил метод расчёта парожидкостных равновесий бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав. В основе метода лежит задание свойств смеси в виде термодинамического потенциала от выбранных переменных и поиск многофазного состояния с

максимальным значением энтропии. Получены уравнения, из которых определяется термодинамическое равновесие, и описан алгоритм расчёта. Метод применён для расчёта в широком диапазоне давлений и температур теплофизических свойств бинарной смеси углекислый газ-вода. В переменных давление-энтальпия-состав построена фазовая диаграмма данной смеси, определены критические линии и области различного фазового состояния. Точность метода подтверждается тем, что результаты расчётов свойств смеси хорошо согласуются с экспериментальными данными.

**В четвёртой главе** проведён дисперсионный анализ уравнений неизотермической фильтрации бинарной смеси. Исследованы параметры малых возмущений и определены характеристические направления. Исследовано поведение адиабат сильных разрывов. В данной главе заложены теоретические основы для анализа нелинейных волн на фазовой плоскости. Её результаты используются в дальнейшем при решении задачи Римана.

**Пятая глава** посвящена результатам исследований автора в области подземного захоронения углекислого газа. Нагнетание углекислого газа в водонасыщенный пласт, в отличие от закачки метана при создании подземных хранилищ газа, сопровождается более сложными эффектами, связанными с околокритическим состоянием углекислого газа и его значительным растворением в воде. В данной тематике автору удалось решить ряд новых задач. В частности, в пятой главе решена автомодельная задача Римана, описывающая термогидродинамические процессы в призабойной зоне скважины при нагнетании углекислого газа. Показано, что при различных условиях нагнетания в пласт от скважины могут распространяться качественно различные последовательности волн Римана, фронтов вытеснения и температурных разрывов. Определены условия возникновения неустойчивости переднего фронта вытеснения. Описаны трёхфазные течения и температурные эффекты при фазовых переходах между жидким и газообразным углекислым газом, возникающие при утечке углекислого газа из пласта. Убедительно продемонстрировано, что созданный метод моделирования фильтрации может эффективно применяться в трёхмерных расчётах захоронения с учётом детализированных геологических данных о строении пластов.

**В шестой главе,** в рамках разработанных подходов исследуется неизотермическая фильтрация в природных процессах. Исследуются крупномасштабные конвективные течения в одной из геотермальных

систем. Построена трёхмерная геологогидродинамическая модель геотермальной системы, откалиброванная с использованием данных полевых наблюдений за системой и измерений температуры в геотермальных скважинах. В модели впервые учитываются процессы в глубоководных областях, где температура превышает критическую температуру воды. Исследована фильтрация с учётом минеральных реакций в системе флюид-порода в кимберлитовых трубках. Определены физические механизмы, управляющие остыванием трубки. Впервые обнаружен эффект неустойчивого протекания экзотермических реакций.

В **седьмой главе** дан обзор разработанного комплекса программ для численного моделирования многофазной фильтрации. Данный комплекс содержит программную реализацию созданного в диссертации метода моделирования фильтрации бинарных смесей в широком диапазоне давлений и температур. Демонстрируется, что комплекс может использоваться в расчётах фильтрации по различным моделям, в том числе по модели Чёрной нефти, широко используемой в проектных институтах нефтегазовой отрасли. Проведены расчёты тестовых задач, в том числе тестов Общества инженеров-нефтяников, убедительно демонстрирующие надёжность и широкие возможности комплекса.

Очевидно, что комплекс программ, разработанный автором в ходе проведения научно-исследовательских работ, является одним из наиболее **важных для практики результатов** диссертации. Эксплуатация недр Земли сопровождается сложными многофазными течениями жидкостей и газов в проницаемых геологических пластах, методы моделирования которых сейчас активно развиваются в зарубежной науке, а в отечественных проектных организациях показатели эксплуатации недр рассчитываются с помощью дорогостоящих импортных программных продуктов. Замещение данных продуктов отечественными аналогами несомненно является актуальной задачей.

Разработанный автором комплекс программ есть только фундамент, на основе которого автору удалось получить много новых результатов, обладающих **теоретической значимостью**. Автор определил требования к корректным постановкам задач неизотермической фильтрации в условиях значительного перепада глубин, развил асимптотические методы исследования нелинейных волн для уравнений смешанного типа, описывающих фильтрацию, усовершенствовал методы моделирования фильтрации с учётом усложнённых термодинамических эффектов в условиях значительного изменения давления и температуры.

По работе имеются следующие **замечания**, которые, однако, не снижают общий очень высокий уровень диссертации.

1. К сожалению в диссертации нет ссылки и обсуждения монографии "Розенберг М.Д., Кундин С.А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа. М., Недра, 1976. - 325 с.", в которой изложены основы равновесной и неравновесной многофазной многокомпонентной фильтрации и приведен ряд интересных решений.

2. С точки зрения практической значимости работы вероятно интереснее была бы задача о нагнетании углекислого газа в нефтяной пласт с целью повышения нефтеотдачи. В данном случае при пластовых температурах также могут формироваться области трёхфазных парожидкостных равновесий углеводородной смеси, содержащей значительную долю растворённого углекислого газа.

Диссертация Афанасьева А.А. 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 содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, подробные расчёты. Написана квалифицированно и последовательно. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Результаты работы могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях в МГУ имени М.В. Ломоносова, ИММ КазНЦ РАН, проектных организациях нефтегазовой отрасли и других институтах, занимающихся данной и смежными тематиками.

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 г., её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Афанасьева А.А. и отзыв на неё рассмотрены, а отзыв утверждён на расширенном семинаре лабораторий Математического моделирования процессов фильтрации, Подземной гидродинамики и Математического моделирования гидрогеологических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики и машиностроения Казанского научного центра

Российской академии наук под руководством чл.-корр. РАН Губайдуллина Д.А., протокол № 1 от 18.05.2016 г.

Отзыв составлен заведующим лабораторией Математического моделирования процессов фильтрации, доктором физико-математических наук (специальность 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»), профессором Никифоровым А.И.

И.о. главного научного сотрудника,  
заведующий лабораторией Математического  
моделирования процессов фильтрации  
д.ф.-м.н., профессор

**Никифоров**  
**Анатолий Иванович**

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт механики и  
машиностроения Казанского научного центра  
Российской академии наук  
Почтовый адрес: 420111, г. Казань, ул.  
Лобачевского, д. 2/31  
Телефон: (843) 231-90-55  
Адрес электронной почты: [nikiforov@imm.knc.ru](mailto:nikiforov@imm.knc.ru)

Подпись А.И. Никифорова и сведения удостоверяю.  
Учёный секретарь ИММ КазНЦ РАН  
к.ф.-м.н.



Скворцова  
Зара Владимировна

Почтовый адрес: 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31  
Телефон: (843)292-51-62  
Адрес электронной почты: [zara-skvortsova@yandex.ru](mailto:zara-skvortsova@yandex.ru)