

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора А.А. Губайдуллина  
на диссертацию 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

В диссертации Афанасьева А.А. развиты методы математического моделирования неизотермической фильтрации с учётом фазовых переходов и критических явлений. **Актуальность** работы не вызывает сомнений как с научной точки зрения – исследованы новые нелинейные эффекты многофазной фильтрации, так и в прикладном плане – результаты могут применяться для надёжного научно-обоснованного прогнозирования и оптимизации показателей эксплуатации недр Земли, в частности при разработке месторождений углеводородов, при производстве возобновляемой геотермальной энергии и при захоронении в недрах Земли отходов промышленных предприятий.

Диссертация Афанасьева А.А. позволяет расширить приложение моделей фильтрации на случай широких диапазонов давлений и температур. **Научная новизна** диссертации заключается в том, что в ней предложены новые методы математического моделирования течений в проницаемых геологических пластах с учётом сложного термодинамического описания свойств насыщающих флюидов. 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 пар-жидкость или жидкость-жидкость, а также области с трёхфазным состоянием, с равновесием пар-жидкость-жидкость. Показано, что образование подобных областей может существенно влиять на гидродинамику движения флюидов. Дополнительная сложность исследуемых течений заключается в том, что в них может достигаться критическая температура фильтрующегося флюида, в окрестности которой его теплофизические свойства претерпевают быстрые изменения. Также могут образовываться фронты

фазового перехода – разрывы параметров течения, на которых имеет место испарение или конденсация. Для исследования данных процессов в диссертации успешно применены как аналитические методы в области механики многофазных сред и нелинейных волн, так и многопроцессорные вычислительные технологии.

Общая структура диссертации состоит из введения – первой главы, общетеоретических результатов и обоснования метода моделирования фильтрации – главы со второй по четвёртую, описания приложения метода к подземному захоронению углекислого газа и природным процессам – пятая и шестая главы, и описания созданного комплекса программ – седьмая глава.

В первой главе дан обзор литературы в области моделирования неизотермической фильтрации. Описаны ограничения существующих моделей фильтрации и описана общая концепция предложенного в работе метода моделирования. В данной главе также обосновывается актуальность темы диссертации, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Во второй главе рассмотрен общий случай фильтрации смесей с произвольным числом компонентов и фаз. Для уравнений, описывающих фильтрацию подобных смесей, выведено представление в форме Годунова. Получено уравнение энтропии, на основе которого сформулировано условие корректной постановки задач неизотермической фильтрации. Показано, что при описании конвекции в геотермальных системах необходимо в законе сохранения энергии учитывать слагаемое с работой силы тяжести. Продемонстрировано, что если данным членом пренебречь, то уравнения фильтрации не согласуются со вторым началом термодинамики – производство энтропии может иметь отрицательное значение.

В третьей главе излагается разработанный метод определения теплофизических параметров бинарных смесей в широком диапазоне давлений и температур. Формулируется замкнутая термодинамическая модель бинарной смеси и описываются алгоритмы расчёта многофазных парожидкостных равновесий. В основе метода лежит расчёт термодинамического потенциала бинарной смеси – энтропии в зависимости от давления, энтальпии и компонентного состава – и поиск многофазного состояния с максимальным значением энтропии. Преимущества разработанной методики расчёта свойств заключаются в том, что она позволяет надёжно определять различные, в том

числе трёхфазные, равновесия смеси в широком диапазоне давлений и температур. Убедительно продемонстрировано, что метод с высокой точностью позволяет описывать теплофизические свойства бинарной смеси углекислый газ-вода.

В четвёртой главе определены характеристические скорости и инварианты Римана в областях фильтрации бинарной смеси с различным числом фаз. Выделено два семейства характеристик, только одно из которых переносит возмущения температуры.

В пятой главе изложены результаты приложения разработанного метода к моделированию фильтрации при нагнетании углекислого газа в водонасыщенный пласт. Для данного процесса решена автомодельная задача Римана (задача о распаде произвольного разрыва). Описаны последовательности волн и сильных разрывов, распространяющихся от скважины в пласт. Обосновано, что асимптотическое решение задачи позволяет описать решение задачи в полной постановке, в которой учитываются диссипативные процессы. Исследованы многофазные течения и тепловые эффекты при утечке газа из пласта. Показано, что модель фильтрации бинарных смесей может применяться в трёхмерных расчётах нагнетания газа с учётом детализированных данных о геологическом строении пластов.

В шестой главе описано приложение модели к природным процессам. Проведено прямое численное моделирование конвекции в существующей геотермальной системе, а результаты расчётов сопоставлены с данными натурных наблюдений за системой. Показано, что моделирование фильтрации с учётом течений в глубоководных областях позволяет качественно описать полевые наблюдения за системой на поверхности Земли. Построена модель неизотермической фильтрации в кимберлитовых трубках с учётом экзотермической минеральной реакции в системе флюид-порода и с учётом сопутствующих изменений пористости и проницаемости. Дана интерпретация термогидродинамических процессов в нагретой трубке при внедрении холодных подземных вод. Впервые выявлен физический механизм пространственной неустойчивости протекания реакции.

В седьмой главе описан созданный комплекс программ для прямого численного моделирования многофазной фильтрации, в рамках которого

получены результаты, изложенные в пятой и шестой главах. Приведены результаты расчётов тестовых задач, подтвердившие высокую надёжность комплекса. Показано, что комплекс имеет обширную область приложений, не ограниченную задачами, решёнными в пятой и шестой главах.

Таким образом, в диссертационной работе разработан новый метод моделирования неизотермической фильтрации, позволивший решить значительное число новых задач фильтрации как в проблемах рационального недропользования, так и в приложении к природным процессам. В диссертации умело сочетаются как теоретические исследования фильтрации в упрощённых постановках, так численные исследования течений в реальных геологических пластах. В качестве наиболее значимого для практических приложений результата следует выделить создание комплекса программ для моделирования фильтрации. Указанный комплекс может применяться для решения широкого круга задач: при прогнозировании показателей разработки месторождений углеводородов, источников геотермальной энергии, а также при моделировании подземного хранения газа.

**Обоснованность научных положений и достоверность результатов,** полученных в диссертационной работе не вызывает сомнений. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых апробированных подходов к математическому моделированию термогидродинамических процессов в гетерогенных средах; корректностью постановок задач на основе уравнений механики многофазных сред; применением для решения задач современных методов вычислительной гидродинамики; сопоставлением полученных результатов, в частных случаях, с результатами других авторов, известными в научной литературе, с экспериментальными данными о теплофизических свойствах бинарной смеси углекислый газ-вода и наблюдениями за природными геофизическими системами.

По работе можно сформулировать следующие замечания:

1. Основное содержание диссертации посвящено моделированию фильтрации бинарной смеси углекислый газ-вода. В связи с этим встаёт вопрос о применимости разработанного метода моделирования к задачам фильтрации других бинарных смесей, например, углеводородных.

2. Несомненно, построенные в разделе 5.2 решения задачи Римана имеют фундаментальное значение. Однако их применение на практике для описания закачки газа ограничено не только гравитационным расслоением фаз, влияние которого оценивается в разделе 5.2.3, но и несовершенным вскрытием пласта скважиной или наклонным/горизонтальным положением скважины. Также в решении задачи Римана не учитывается теплообмен с непроницаемыми породами кровли и подошвы пласта.
3. В разделе 6.1 нечётко описано влияние критических термодинамических условий на интенсивность конвекции в геотермальной системе.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Афанасьева А.А. представляет собой законченное и полное исследование рассматриваемой проблемы. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие теории неизотермической многофазной фильтрации. По сути поставленных задач, проведенных исследований и полученных результатов, работа полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05. Автореферат соответствует содержанию диссертации, а сама диссертационная работа соответствует требованиям п.9 «Положения ВАК о присуждении учёных степеней». Считаю, что Афанасьев А.А. безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, директор Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук



Губайдуллин Амир Анварович

Рабочий адрес: 625026 Тюмень, а/я 1507, ТюмФ ИТПМ СО РАН

Телефон: (3452) 68 27 45

Электронная почта: [timms@tmn.ru](mailto:timms@tmn.ru)