

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Афанасьева А.А. «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».

Диссертация А.А. Афанасьева посвящена исследованию многофазных течений жидкостей и газов в пористой среде при самосогласованных гидродинамических и термодинамических явлениях, которые обусловлены фазовыми превращениями и критическими или околокритическими условиями. Результаты подобного исследования представляют несомненный интерес и в высокой степени актуальны для подземной гидромеханики, когда течения реализуются при критических значениях физических параметров. Тематика данных исследований связана, например, с захоронением углекислого газа в проницаемых геологических пластах, с особенностями течений в геотермальных системах, с формированием рудных месторождений при остывании кимберлитовых трубок, с разработкой нефтяных и газовых месторождений.

Диссертация состоит из семи глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, состоящего из 169 наименований. В работе содержится 79 рисунков, а также семь таблиц.

В **первой главе** (введении) обоснована актуальность исследования, перечислены цели и задачи работы, а также обоснована ее практическая значимость. Приведены обзор подходов для моделирования фильтрации, уравнения неизотермической фильтрации бинарной смеси. В частности, описана модель фильтрации воды и водяного пара. Излагается научная новизна и практическая и теоретическая значимость работы, перечислены положения выносимые на защиту и описана структура диссертации.

Во **второй главе** выводится общая форма записи системы уравнений фильтрации, (которая описывается уравнениями смешанного типа), в форме, схожей с формой записи Годунова для гиперболических систем. Представление получено для наиболее общего случая неизотермической фильтрации с произвольным числом компонентов и фаз. Практическая значимость представления в форме Годунова заключается в том, что подобная форма уравнений может применяться для построения корректных конечно-разностных схем для расчетов в задачах фильтрации. В данной главе

при помощи представления в форме Годунова получено достаточное условие неотрицательного производства энтропии для классической схемы. Произведена оценка влияния работы силы тяжести на параметры фильтрационного течения. Показано, что она существенно влияет на свойства среды и на течение в целом на больших пространственных (порядка и больше 1 км) масштабах. Рассмотрено численное моделирование фильтрации в рамках метода конечных объемов: общая форма выведенных уравнений адаптирована к исследованию конечно-разностных схем для расчета многокомпонентной многофазной фильтрации (с учетом аппроксимации работы силы тяжести). Предложены аппроксимации, при которых энтропия всегда не убывает.

В третьей главе разработан метод ускоренного расчета теплофизических свойств бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав при до и сверхкритических термодинамических условиях с учетом трехфазных термодинамических равновесий пар-жидкость-жидкость. В указанных переменных вырождение, связанное с наличием критической точки на фазовой диаграмме, отсутствует. Сформулирована замкнутая термодинамическая модель бинарной смеси с уравнением состояния, обобщающем уравнение Ван-дер-Ваальса. Существующие подходы к композиционному моделированию фильтрации сопоставляются с разработанным методом ускоренного расчета в указанных переменных в широком диапазоне до- и сверх- критических давлений и температур. Приведен пример расчета теплофизических свойств бинарной смеси воды и углекислого газа в широком диапазоне давлений и температур. Построена и проанализирована фазовая диаграмма указанной бинарной смеси в переменных давление-энтальпия-состав. Показано, что эти свойства с инженерной точностью согласуются с известными экспериментальными данными.

В четвертой главе анализируется дисперсионное соотношение уравнений фильтрации бинарной смеси и исследованы сильные разрывы. Сформулирована замкнутая система уравнений бинарной смеси. Проведен дисперсионный анализ уравнений модели и определены характеристические скорости в областях с различным числом фаз. В частности, показано, что если пренебречь диссипативными членами, то при числе фаз не больше двух всегда имеет место два малых возмущения гиперболического типа, а с учетом теплопроводности имеется только одно гиперболическое возмущение. В случае фильтрации бинарной смеси воды и углекислого газа

на фазовой плоскости исследовано поведение ветвей адиабаты разрыва в зависимости от положения ее начальной точки. Одна из ветвей адиабаты описывает фронты вытеснения в пористой среде, а вторая ветвь описывает фронты фазового перехода и разрывы температуры. Каждая из ветвей адиабаты может иметь несколько эволюционных разрывов.

В пятой главе исследуется приложение модели фильтрации бинарной смеси к проблемам подземного захоронения углекислого газа. Анализ фильтрации при подземном захоронении углекислого газа проводится в рамках решения модельной осесимметричной задачи о течении углекислого газа в однородный горизонтальный пласт бесконечной протяженности (одномерная задача). Разработано асимптотическое приближение для уравнений фильтрации (коротковолновое приближение), в котором задача имеет решение в виде центрированных волн разрежения, а решение задачи Римана есть последовательность сильных разрывов, волн Римана и областей однородного распределения параметров, распространяющихся от скважины в пласт. Исследована гидродинамическая устойчивость переднего фронта вытеснения при закачке углекислого газа. Проведено исследование тепловых эффектов, возникающих при захоронении углекислого газа в водонасыщенном пласте при докритических термодинамических условиях или при утечке углекислого газа из пласта к поверхности Земли через геологический разлом. Проведены трехмерные расчеты захоронения сверхкритического углекислого газа в реальных геологических формациях.

В шестой главе на основе разработанной модели фильтрации бинарных смесей рассмотрены: конвекция в геотермальных системах с учетом термогидродинамических процессов в приповерхностных и глубокопогруженных областях; течение в кимберлитовых трубках с учетом экзотермической минеральной реакции *оливин* → *серпентинит* и сопутствующих изменений пористости и проницаемости. Показано, в частности, что высокий геотермальный градиент, наблюдаемый в данной области на Земле, способствует развитию конвективного течения с несколькими восходящими потоками нагретого флюида и, что в кимберлитовой трубке могут возникать условия, способствующие пространственной неустойчивости протекания реакции *оливин* → *серпентинит*. Расчеты развития неустойчивости в горизонтальном слое пород трубки в рамках полной нелинейной модели согласуются с аналитическими результатами.

В **седьмой главе** разработан комплекс программ для численного моделирования многофазной фильтрации в различных приложениях. Дан обзор функциональных возможностей комплекса. Приводятся результаты расчета ряда тестовых задач, описывающих различные физические процессы в пластах. Результаты расчета тестов в созданном пакете (в том числе стандартных для нефтяной промышленности тестов) хорошо согласуются с результатами, полученными в других пакетах программ. Приведены сведения о практическом использовании созданного пакета программ.

Специального упоминания, на мой взгляд, заслуживают следующие результаты, полученные в диссертации.

1. Получена общая форма записи уравнений многокомпонентной многофазной фильтрации, обобщающая представление Годунова для гиперболических систем. Представление имеет не только теоретическое значение для корректной постановки задач неизотермической фильтрации, но и практическое значение, например, для создания конечно-разностных схем фильтрации.
2. На основе полученных уравнений решены новые теоретические задачи и проведены трехмерные инженерные расчеты в проблемах подземного захоронения углекислого газа. Решена классическая задача Римана, описывающая закачку сверхкритического углекислого газа в водонасыщенный пласт, и даны рекомендации по использованию решений для анализа термогидродинамических процессов в призабойной зоне скважины.
3. Создан комплекс программ, который с учетом инженерных данных и на базе полученных уравнений позволяет моделировать неизотермическую фильтрацию в широком спектре задач рационального природопользования и в природных условиях.

Результаты диссертации являются достоверными и полностью обоснованными, так как при их получении использовались точные теоретические методы математики и апробированные методы механики сплошной среды. Все декларированные в диссертации результаты являются новыми и представляющими значительный интерес. Особенно стоит отметить новую запись уравнений многокомпонентной многофазной фильтрации и расчет на базе этих уравнений ряда сложных инженерных задач: таким образом, налицо все составляющие, сопутствующие апробированному описанию сложного явления: аналитическое описание явления и выполненный с учетом ожидаемых результатов достоверный

численный расчет.

Диссертация написана ясным и доступным языком, результаты изложены понятно. К возможным недостаткам работы (точнее к неполноте логической картины, представленной в ней) я бы отнес следующие:

1. В разделе 5.2 решена краевая задача Римана о нагнетании газа в пласт. При этом предполагается, что решение одномерно и зависит только от продольной координаты и от времени, т. е. одномерно. Не учитывается конечная протяженность пласта по вертикали. Таким образом, одномерное решение справедливо только конечное время, пока возмущение не дойдет до вертикальных границ пласта. Мне кажется, что было бы целесообразно оценить величину этого времени.
2. Устойчивость переднего фронта S_3 исследована следующим образом (глава 5). Предполагается, что область между передним фронтом и вторым разрывом S_2 в решении, соответствует постоянной температуре, равной температуре пласта. Тогда локально справедлива модель для изотермической двухфазной фильтрации Баклея-Левретта, а условие гидродинамической неустойчивости разрыва в этой модели известно. У меня, в связи с этим, возникает вопрос. По сути дела, исследуется устойчивость разрыва с постоянной температурой во всей области течения (за разрывом S_2 тоже температура должна быть постоянной). Однако в полученных решениях область за разрывом S_2 не является областью изотермического течения и температура в ней не постоянна. Вопрос: насколько неизотермическая область за разрывом S_2 влияет на устойчивость переднего фронта? Ответ на этот вопрос должен зависеть от того, какую длину (по сравнению с размерами области между S_2 и S_3) имеет наиболее неустойчивая мода.

Указанные замечания носят рекомендательный характер, не меняют результатов и никак не влияют на высокую оценку диссертации в целом.

Диссертация А. А. Афанасьева на соискание ученой степени доктора физико-математических наук представляет собой законченное научное исследование, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, которые можно квалифицировать как научное достижение. В

