

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.Ломоносова

На правах рукописи



Афанасьев Андрей Александрович

**ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ФИЛЬТРАЦИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва 2016

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
член-корр. РАН, заведующий лабораторией
НИИ механики МГУ, Москва
Мельник Олег Эдуардович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
директор Тюменского филиала Института теорети-
ческой и прикладной механики СО РАН, Тюмень
Губайдуллин Амир Анварович

доктор технических наук, профессор
РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва
Дмитриев Николай Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник Математического
института имени В.А. Стеклова РАН, Москва
Ильичёв Андрей Теймуразович

Ведущая организация: Институт механики и машиностроения Казанского
научного центра РАН, Казань

Защита состоится 24 июня 2016 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссер-
тационного совета Д.501.001.89 при Московском государственном университете
имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы,
Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке механико-
математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «___» марта 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д.501.001.89
доктор физико-математических наук



В.В. Измодепов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование многофазных течений жидкостей и газов в пористой среде с взаимосвязанными гидродинамическими и термодинамическими явлениями, обусловленными фазовыми превращениями и критическими условиями, востребовано в широком спектре задач подземной гидромеханики. Актуальность данного исследования связана с тем, что его результаты могут использоваться для научно-обоснованного прогнозирования и оптимизации показателей эксплуатации недр Земли и при описании природных процессов.

В технологических приложениях многофазные течения при до- и сверхкритических термодинамических условиях происходят при разработке месторождений нефти и газа, в частности газоконденсатных залежей, и при подземном захоронении углекислого газа. Вторая из отмеченных тематик связана с проблемой глобального потепления. Для снижения выбросов парниковых газов углекислый газ – продукт горения – закачивают в проницаемые недра, а не выбрасывают в атмосферу. Возможно захоронение как в истощенных месторождениях углеводородов, так и в водонасыщенных пластах. В последнем случае нагнетание газа в пласт сопровождается фильтрацией бинарной смеси углекислого газа и воды ($\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$). Исследование подобных течений осложняется тем, что захоронение может происходить при околокритических термодинамических условиях для CO_2 (7.28 МПа, 31.04°C), при которых его теплофизические свойства чувствительны к малым изменениям давления и температуры. Утечка углекислого газа из пласта к поверхности может сопровождаться падением давления ниже критического значения и сопутствующим расслоением CO_2 на две различные фазы – жидкую и газовую. При этом формируются области трёхфазного течения с термодинамическими равновесиями пар-жидкость-жидкость (VLL-equilibria), где пар – газообразный CO_2 , а две жидкие фазы – сжиженный CO_2 и пластовая вода. Развитие методов моделирования фильтрации с подобными усложнёнными парожидкостными равновесиями представляет интерес для многих приложений в области рационального недропользования, в том числе для нефтегазовой отрасли.

В природных процессах взаимосвязанные термогидродинамические явления происходят в естественных конвективных течениях в геотермальных системах –

в проницаемых породах, насыщенных водой, водяным паром и магматическим флюидом, в основном CO_2 . Тепломассообмен между магматическими и геотермальными системами сопровождается фильтрационными течениями в широком диапазоне давлений и температур, содержащем критические значения для воды (22.09 МПа, 374.14°C). В приповерхностных пластах течение грунтовых вод происходит при низких давлениях и температурах, а в глубоководных породах – при сверхкритических условиях, приближающихся к параметрам в магматическом очаге. Изменение компонентного состава геотермального флюида, связанное с притоком углекислого газа из магматического очага, приводит к значительному изменению критических параметров и развитию в глубоководных областях геотермальных систем двухфазных течений с термодинамическими равновесиями типа жидкость-жидкость. Получение новых знаний относительно геотермальных систем с учётом описанных процессов востребовано как при прогнозировании активности вулканических систем, так и в геотермальной энергетике.

Многофазные фильтрационные течения в условиях значительного изменения давления и температуры происходят, также, при формировании рудных месторождений и при остывании кимберлитовых трубок – вертикальных геологических тел, образовавшихся при прорыве магматического расплава сквозь земную кору. В кимберлитовых трубках сосредоточены значительные запасы алмазов на Земле. После формирования трубка наполнена нагретыми проницаемыми породами, насыщенными магматическим газом и воздухом, а одним из основных породообразующих минералов является оливин. Остывание кимберлита сопровождается внедрением более холодных подземных вод из окружающих трубку водонасыщенных пластов и, следовательно, фазовыми превращениями – испарением воды. Также происходит гидротермальное изменение кимберлитовых пород, т.е. происходят минеральные реакции в системе флюид-порода. При повышенных температурах вода вступает в реакцию с оливином, приводя к образованию нового минерала – серпентинита, причём поровое пространство забивается серпентинитом, перекрывая приток подземных вод. Обратное влияние фазовых превращений и минеральных реакции на фильтрацию может приводить к сложному распределению серпентинита. Исследование подобных процессов представляет теоретический интерес для обоснования геофизических

гипотез о процессе формирования кимберлитовых трубок и имеет практическое значение для уточнения их геологического строения.

В отмеченных геофизических приложениях теплофизические свойства флюида, фазовые превращения и критические явления определяют характер гидродинамических процессов в пластах. Все данные эффекты не могут быть в полной мере учтены в существующих моделях фильтрации, ограниченных либо докритическими условиями, либо парожидкостными равновесиями с не более чем двумя фазами, либо изотермическими процессами.

Цель диссертационной работы заключается в

1. развитии методов моделирования неизотермической фильтрации бинарных смесей в широком диапазоне до- и сверхкритических давлений и температур с учётом усложнённых многофазных парожидкостных равновесий;
2. использовании данных методов для определения закономерностей при тепломассопереносе в сложных задачах рационального недропользования и в природных процессах, которые альтернативными моделями не описываются.

Для достижения поставленных целей в настоящей работе решены следующие **задачи**:

1. разработан ускоренный метод определения теплофизических свойств бинарных смесей в широком диапазоне до- и сверхкритических давлений и температур в переменных давление-энтальпия-состав;
2. определены требования к корректным, не противоречащим второму началу термодинамики, постановкам задач неизотермической фильтрации;
3. создан комплекс программ для прямого численного моделирования фильтрации бинарных смесей, теплофизические свойства которых определяются в рамках разработанного метода;
4. решены новые теоретические задачи и проведены трёхмерные инженерные расчёты в проблемах подземного захоронения сверхкритического углекислого газа. Исследованы решения автомодельной задачи Римана, проведён анализ гидродинамической устойчивости сильных разрывов и исследованы тепловые эффекты при утечке газа из пласта;
5. проведён параметрический анализ конвекции в геотермальных системах с учётом термогидродинамических процессов в приповерхностных (докритические условия) и глубоководных (сверхкритические условия) областях;

6. исследованы термогидродинамические процессы в нагретой кимберлитовой трубке при внедрении холодных подземных вод с учётом экзотермической минеральной реакции между флюидом и породой и сопутствующих изменений пористости и проницаемости.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что

1. разработан ускоренный метод определения теплофизических свойств бинарных смесей в широком диапазоне до- и сверхкритических давлений и температур, с учётом трёхфазных парожидкостных равновесий пар-жидкость-жидкость и двухфазных равновесий пар-жидкость и жидкость-жидкость. Классические подходы к определению свойств в композиционных моделях фильтрации не позволяют эффективно рассчитывать подобные равновесия в широком диапазоне давлений и температур и при околоскритических термодинамических условиях;
2. определены коэффициенты трёхпараметрического кубического уравнения состояния для бинарной смеси углекислый газ-вода, позволяющие с инженерной точностью описывать лабораторные измерения теплофизических свойств смеси в широком диапазоне давлений (0,1–150 МПа) и температур (0–700°С);
3. определена корректная формулировка закона сохранения энергии в задачах неизотермической фильтрации, гарантирующая неотрицательное производство энтропии;
4. построена конечно-разностная схема расчёта фильтрации, удовлетворяющая условию неотрицательного производства энтропии;
5. создан комплекс программ для прямого численного моделирования на суперкомпьютерах фильтрации бинарных смесей, теплофизические свойства которых определяются в рамках разработанного метода. Комплекс содержит программную реализацию новых теоретических результатов диссертации;
6. проведён дисперсионный анализ уравнений фильтрации бинарной смеси в областях различного фазового состояния и определены типы малых возмущений;
7. впервые исследовано поведение адиабат разрывов при фильтрации бинарной смеси углекислый газ-вода и ограничены параметры эволюционных разрывов;
8. разработан асимптотический метод исследования волновых пакетов (по-

следовательностей разрывов и волн Римана) для смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию;

9. решена автомодельная задача Римана, описывающая закачку сверхкритического углекислого газа в водонасыщенный пласт. Исследована гидродинамическая устойчивость сильных разрывов, присутствующих в решении задачи Римана;
10. в проблемах подземного захоронения углекислого газа впервые исследованы тепловые эффекты из-за фазовых превращений между жидким и газообразным CO_2 ;
11. впервые исследована конвекция в геотермальных системах при до- и сверхкритических термодинамических условиях. Определены параметры геотермальных систем, наиболее сильно влияющие на интенсивность конвекции;
12. даны уточняющие оценки параметров нагретого сверхкритического флюида, которым геотермальная система Campi Flegrei (Италия) питается из магматического очага;
13. впервые построена модель, позволяющая описать внедрение подземных вод в нагретую кимберлитовую трубку с учётом теплопроводности, фазовых превращений, экзотермической минеральной реакции в системе флюид-порода (оливин+вода→серпентинит) и снижения пористости и проницаемости при серпентинизации. Обоснована новая геофизическая концепция о гидродинамических процессах, приводящих к неоднородному распределению серпентинита в трубках;
14. впервые исследован новый тип неустойчивости серпентинизации в кимберлитовых трубках, обусловленный самоускорением экзотермической реакции между флюидом и породой при возрастании температуры.

Результаты, представленные в диссертации, важны с общетеоретической точки зрения для развития знаний в области неизотермической многофазной фильтрации при до- и сверхкритических термодинамических условиях. **Теоретическая значимость** работы обусловлена

1. обобщением известного представления Годунова для гиперболических систем на случай смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию;
2. определением требований к корректным постановкам задач неизотермической фильтрации;

3. развитием асимптотических методов исследования нелинейных волн для уравнений смешанного типа, описывающих фильтрацию;
4. усовершенствованием методов моделирования фильтрации с учётом усложнённых термодинамических эффектов (фазовые превращения, многофазные парожидкостные равновесия, критические условия, минеральные реакции) в условиях значительного изменения давления и температуры;
5. научной новизной диссертационной работы.

Практическая значимость работы заключается в том, что её результаты будут полезны для

1. проведения параллельных расчётов неизотермических фильтрационных течений в рамках разработанного комплекса программ MUFITS. Программный комплекс будет полезен в проектных организациях нефтегазовой отрасли и других научно-исследовательских институтах для расчёта фильтрации в задачах рационального недропользования;
2. прогнозирования последствий подземного захоронения углекислого газа, расчёта показателей разработки месторождений нефти и газа и при получении геотермальной энергии;
3. расчёта теплофизических свойств бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав в геофизических приложениях и в других технологических проблемах, связанных со сжижением газов и сложными парожидкостными равновесиями;
4. анализа процессов в призабойной зоне скважин при закачке газа в водонасыщенный пласт, в частности при гидродинамическом исследовании скважин;
5. прогнозирования активности геотермальной системы Campi Flegrei в рамках созданной трёхмерной геологогидродинамической модели системы;
6. интерпретации геологического строения кимберлитовых трубок.

Практическая значимость работы также подтверждается тем, что автор диссертации был приглашён в Бристольский университет и Немецкий научно-исследовательский центр по наукам о Земле для проведения практических семинаров-тренингов по использованию разработанного пакета MUFITS в различных задачах недропользования. В настоящее время комплекс, в том числе модель фильтрации бинарной смеси, находит практическое применение в дан-

ных организациях без непосредственного участия автора диссертации.

Основные положения выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие новые методы, положения и результаты:

1. Общая форма записи уравнений многокомпонентной многофазной неизотермической фильтрации. Данная форма записи есть обобщение представления Годунова для гиперболических систем на случай систем уравнений смешанного типа, описывающих фильтрацию;
2. Закон сохранения энергии в корректной постановке задач неизотермической фильтрации должен содержать член для работы силы тяжести. Если данным членом пренебречь, то уравнения фильтрации не согласуются со вторым началом термодинамики – производство энтропии может иметь отрицательное значение;
3. Достаточное условие неотрицательного производства энтропии для конечно-разностных схем расчёта фильтрации. Разностная схема, удовлетворяющая данному условию;
4. Метод ускоренного расчёта теплофизических свойств бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав при до- и сверхкритических термодинамических условиях с учётом трёхфазных термодинамических равновесий типа пар-жидкость-жидкость. Метод основывается на расчёте термодинамического потенциала бинарной смеси – энтропии в зависимости от давления, энтальпии и состава – и поиске многофазного состояния с максимальным значением энтропии;
5. Результаты расчёта по разработанному методу теплофизических свойств бинарной смеси $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (плотности, вязкости, компонентного состава фаз и скрытой теплоты фазовых превращений) в широком диапазоне давлений (0.1–150 МПа) и температур (0–700°С) с инженерной точностью согласуются с экспериментальными данными, доступными из литературных источников;
6. Результаты дисперсионного анализа и исследования сильных разрывов для уравнений неизотермической фильтрации бинарных смесей. В пренебрежении диссипативными членами в областях однофазного и двухфазного течения имеется два малых возмущения гиперболического типа (волны α и β). Волны первого типа (α) соответствуют бесконечно малым фронтам вытесне-

ния в изотермическом течении. В волнах второго типа (β) распространяются возмущения температуры и происходят фазовые превращения;

7. Асимптотический метод исследования волновых пакетов (последовательностей сильных разрывов и центрированных волн Римана) для смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию. Результаты асимптотического исследования решений задачи Римана, описывающей нагнетание сверхкритического углекислого газа в водонасыщенный пласт. Конфигурации волновых пакетов, распространяющихся от скважины в пласт, в зависимости от термобарических условий в пласте и параметров нагнетаемого газа;

8. Результаты исследования тепловых эффектов при докритических термодинамических условиях при утечке углекислого газа из пласта. На распределение температуры влияет конвективный перенос тепла, выделение тепла при растворении газа в воде и фазовые переходы между жидким и газообразным углекислым газом. Данные эффекты могут приводить к немонотонному распределению температуры в направлении течения;

9. Результаты трёхмерного моделирования подземного захоронения углекислого газа в реальных водонасыщенных пластах с учётом детализированных инженерных данных об их геологическом строении. Оценки для вклада различных физических механизмов (структурного захвата, растворения газа в воде и капиллярных эффектов) в удержание углекислого газа в пласте при различных положениях нагнетательной скважины;

10. Результаты параметрического анализа конвекции в геотермальных системах с учётом глубокопогруженных областей, где температура выше критической температуры воды, в зависимости от значений геотермального градиента, расхода и компонентного состава магматического флюида. Для случая геотермальной системы Campi Flegrei результаты расчётов конвекции по разработанной модели согласуются с данными натурных измерений потоков газа и тепла на поверхности и с измерениями температуры в геотермальных скважинах;

11. Модель неизотермической фильтрации в кимберлитовых трубках с учётом экзотермической минеральной реакции в системе флюид-порода (оливин+вода \rightarrow серпентинит) и с учётом сопутствующих изменений пористости и проницаемости. Интерпретация термогидродинамических процессов в нагретой

трубке при внедрении холодных подземных вод. Физический механизм развития пространственной неустойчивости протекания минеральных реакций в кимберлитовых трубках;

12. Комплекс программ для численного моделирования многофазной фильтрации на суперкомпьютерных системах с учётом инженерных данных о строении геологических пластов и теплофизических свойствах флюидов. Комплекс позволяет исследовать фильтрацию как в рамках классических моделей, так и в рамках разработанной модели многофазной фильтрации бинарных смесей в широком диапазоне давлений и температур.

Достоверность результатов диссертационной работы обусловлена

1. использованием классических уравнений механики сплошной среды; корректной, опирающейся на современные представления о нелинейных волнах и сильных разрывах, постановкой задач; аналитическим решением ряда задач;
2. получением результатов, согласующихся в частных случаях с результатами других исследователей;
3. тщательной проверкой корректности вычислений различными способами; совпадением результатов расчётов и аналитических решений (или численных решений, полученных другими авторами) для модельных задач;
4. совпадением результатов расчёта теплофизических свойств бинарной смеси $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$ с данными лабораторных измерений, доступных из литературных источников;
5. совпадением результатов расчёта конвекции в геотермальной системе Campi Flegrei с натурными измерениями потоков газа и тепла на поверхности и с измерениями температуры в геотермальных скважинах;
6. опубликованием результатов исследований в рецензируемых зарубежных и отечественных изданиях.

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на Семинаре по механике сплошных сред под руководством акад. РАН А.Г. Куликовского, проф. В.П. Карликова и член-корр. РАН О.Э. Мельника (Москва, МГУ, 2010, 2012, 2014, 2016 гг); теле-семинаре по аэромеханике. ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбПУ – НИИ механики МГУ (2015 г); секции «Математическое моделирование и информатика» Учёного совета ООО Газпром ВНИИГАЗ (2014 г); семинаре «Задачи управления: теория и приложения» под

руководством проф. А.В. Фурсикова, проф. В.М. Тихомирова, проф. М.И. Зеликина и проф. В.П. Протасова (Москва, МГУ, 2012 г); Генеральной ассамблее Европейского общества по наукам о Земле (Вена, 2010 – 2013, 2015, 2016 гг); Общем собрании Американского геофизического общества (Сан-Франциско, 2010–2012 гг); международной конференции Geofluids (Париж, 2012 г); Конференции-конкурсе молодых учёных НИИ механики МГУ (2010–2015 гг); Всероссийской конференции «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2014 г); международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Новосибирск, 2010 г); школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи, 2010, 2014 гг); Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2011, 2015 гг); конференции «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (Звенигород, 2010, 2016 гг); Научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение» (Москва, 2012, 2014 гг); VI Молодёжной научно-практической конференции «Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений» (Москва, 2014 г); V Международной молодежной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (Москва, 2013 г) и других конференциях.

Проведённые исследования были поддержаны РФФИ (15-31-20585; 12-01-31117), Советом по грантам Президента РФ (МК-575.2010.1; СП-2222.2012.5) и Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (грант УМНИК). Приведены сведения о грантах, в которых автор диссертации – руководитель исследований.

Полученные результаты автора были отмечены следующими дипломами и премиями: медалью РАН с премией для молодых учёных (2011 г); дипломом лауреата Конкурса молодых учёных МГУ (2014 г); стипендией МГУ им. М.В. Ломоносова для молодых преподавателей и учёных, добившихся значительных результатов в преподавательской и научной деятельности (2010, 2012, 2013, 2015, 2016 гг); дипломом победителя Конкурса на присуждение грантов талантливым студентам, аспирантам и молодым ученым МГУ имени М.В.Ломоносова (2012, 2013 гг); дипломами Конференции-конкурса молодых учёных НИИ механики

МГУ (2010–2015 гг); дипломом 1-й степени за лучшую работу по гидродинамическому моделированию на VI молодёжной научно-практической конференции «Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений», Москва, ООО Газпром ВНИИГАЗ (2014 г); дипломом за Актуальность темы исследования V международной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», Москва, ООО Газпром ВНИИГАЗ (2013 г).

Публикации. Всего соискатель опубликовал 103 работы, включая 43 статьи и тезисы, из которых по теме диссертации опубликовано 17 работ в журналах из перечня ВАК [1–17].

Личный вклад. Все основные результаты диссертации получены автором самостоятельно и частично в соавторстве. Так, развитие модели фильтрации для случая течений в кимберлитовых трубках, изложенное в разделе 6.2, разработано совместно с О.Э. Мельником, а интерпретация результатов моделирования проводилась совместно с геологами из Бристольского университета [13]. Геологогидродинамическая модель геотермальной системы Campi Flegrei, описанная в разделе 6.1, создана в сотрудничестве с G. Chiodini и A. Costa [16]. Раздел 2.3 написан на основе совместной работы с О.Э. Мельником [9]. Под научным руководством автора диссертации в исследованиях, результаты которых изложены в разделах 5.2.8 и 6.3.5, участвовали студенты механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Остальные результаты, в том числе лежащий в основе исследований комплекс программ, получены без соавторов. Все положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем.

Структура диссертации. Диссертация состоит из семи глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. В работе содержится 79 рисунков, 7 таблиц и 169 библиографических ссылок. Общий объём работы составляет 293 страницы.

Содержание работы

Первая глава (Введение)

Во **введении** (**глава 1**) обоснована актуальность исследования, определены цели и задачи, показана научная и практическая значимость работы. Отмечено, что развитие современных исследований в области фильтрации связано с разработкой комплексов программ, в которых апробируются новые методы расчёта парожидкостных равновесий и соответствующих течений в пористой среде.

Проведено сопоставление разработанных подходов с существующими моделями фильтрации воды и водяного пара [28, 29] и Чёрной нефти [30]. Приложение модели фильтрации воды и водяного пара ограничено течениями при докритических условиях, т.е. если $P < P_{cr}$ (Рис. 1а). Это связано с тем, что в критической точке C свойства H_2O (например, плотность; см. изохоры) чувствительны к малым изменениям давления P и температуры T , а уравнения фильтрации вырождаются: якобиан системы законов сохранения в переменных $\{P, T\}$ есть вырожденная матрица [8]. Это существенно осложняет расчёт фильтрации, приводя к плохой сходимости алгоритмов прямого численного моделирования. Известный приём для решения данной проблемы заключается в замене $\{P, T\}$ на переменные $\{P, \hat{h}_t\}$, в которых вырождение отсутствует [8] (Рис. 1б). Здесь \hat{h} – мольная энтальпия, а индекс t обозначает общие, т.е. просуммированные по фазам, параметры смеси.

Модель Чёрной нефти, в рамках которой углеводородная смесь моделируется бинарной смесью газ-нефть, также ограничена докритическими параметрами ($P < P_{cr}$), условием $T = \text{const}$ и она не допускает простого обобщения на случай трёхфазных ($n_p = 3$) течений с равновесиями пар-жидкость-жидкость (газ-конденсат-нефть). Как и в случае однокомпонентного флюида, для учёта этих эффектов и для того чтобы система законов сохранения не вырождалась при критических условиях вместо температуры T в качестве независимой переменной достаточно выбрать энтальпию \hat{h}_t . Например, в качестве переменных, определяющих состояние смеси, можно положить

$$\left\{ P, \hat{h}_t, \hat{c}_t \right\} \quad (1)$$

где \hat{c} – мольная концентрация первого компонента бинарной смеси (CO_2).

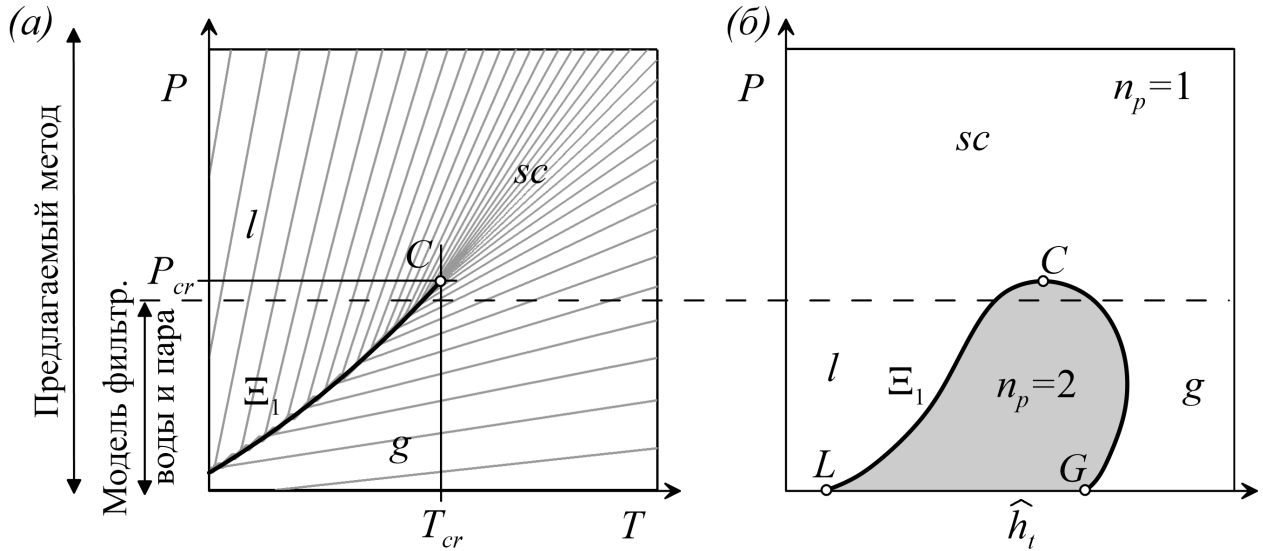


Рис. 1. Фазовая диаграмма однокомпонентного флюида в переменных $\{P, T\}$ (а) и $\{P, \hat{h}_t\}$ (б). Ξ_1 – кривая термодинамического равновесия между жидкостью (l) и паром (g), C – критическая точка, sc – сверхкритический флюид, линии уровня – изохоры, P_{cr} – критическое давление.

Определение теплофизических свойств в зависимости от (1) – нетривиальная задача, связанная с созданием уравнения состояния в переменных $\{P, \hat{h}, \hat{c}\}$ (в классической термодинамике используются $\{P, T, \hat{c}\}$) и ускоренных алгоритмов расчёта равновесий. Диссертационная работа посвящена исследованиям в данной области и их приложению к проблемам рационального недропользования и к природным процессам.

Вторая глава

В главе 2 изложены результаты, которые обобщаются на случай фильтрации смесей с произвольным числом компонентов n_c и фаз n_p . В частном случае $n_c = 2$ данные результаты применялись к бинарным смесям в главах 3 – 7.

В разделе 2.1 формулируются основные уравнения. Для моделирования фильтрации используется система законов сохранения

$$\frac{\partial f^{(i)}}{\partial t} + \operatorname{div} (\mathbf{q}^{(i)} + \boldsymbol{\psi}^{(i)}) = 0, \quad i = 1, \dots, n_c \quad (2)$$

$$\frac{\partial f^{(0)}}{\partial t} + \operatorname{div} (\mathbf{q}^{(0)} + \boldsymbol{\psi}^{(0)}) = \mathcal{A} \quad (3)$$

и закон Дарси. Здесь $f^{(i)}$ – объёмная плотность i -ого компонента ($i = 1, \dots, n_c$)

и энергии ($i = 0$), $\mathbf{q}_{(i)}$ – конвективный поток i -ого компонента и энергии, $\boldsymbol{\psi}$ – диссипативные члены, \mathcal{A} – работа силы тяжести, (2) – закон сохранения массы i -ого компонента, (3) – закон сохранения энергии.

Всюду в работе, за исключением расчёта инженерных задач в главе 7, капиллярным давлением пренебрегаем. Следовательно, в предположении локального термодинамического равновесия можно ввести давление P одинаковое для всех фаз флюида и температуру T одинаковую для фаз флюида и породы.

В разделе 2.2 известное для гиперболических систем представление в форме Годунова [31, 32] обобщается на случай смешанных систем уравнений, описывающих фильтрацию. Демонстрируется, что плотности f , потоки \mathbf{q} и работа \mathcal{A} выражаются только через одну функцию – термодинамический потенциал \mathcal{F} в переменных u [4]:

$$\mathcal{F}(u_0, \dots, u_{n_c}); \quad \mathcal{F} = \frac{P}{T}, \quad u_0 = \frac{1}{T}, \quad u_i = -\frac{\chi^{(i)}}{M^{(i)}} \frac{1}{T}, \quad i = 1, \dots, n_c \quad (4)$$

где $M^{(i)}$ и $\chi^{(i)}$ – молярная масса и химический потенциал i -ого компонента. В случае n_p -фазной фильтрации многозначная функция \mathcal{F} имеет n_p ветвей, из условий пересечения которых следуют условия термодинамического равновесия фаз.

Из представления в форме Годунова получено уравнение на энтропию

$$\frac{\partial f_{(e)}}{\partial t} + \operatorname{div} (\mathbf{q}_{(e)} + \boldsymbol{\psi}_{(e)}) = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_\psi \quad (5)$$

где $f_{(e)}$, $\mathbf{q}_{(e)}$ и \mathcal{E} – объёмная плотность, поток и производство энтропии, соответственно; \mathcal{E}_ψ – часть производства энтропии из-за диссипативных потоков $\boldsymbol{\psi}$, а \mathcal{E}_0 – производство при $\boldsymbol{\psi} = \mathbf{0}$. Показано, что если в законе сохранения энергии (3) пренебречь работой \mathcal{A} , как это делается во многих исследованиях фильтрации, то производство \mathcal{E}_0 может принимать отрицательные значения. Таким образом, закон сохранения энергии в корректных постановках задач неизотермической фильтрации должен содержать член \mathcal{A} . Проведены оценки, показывающие, что влияние работы \mathcal{A} на фильтрацию существенно, если течение охватывает интервал глубин $\Delta z \sim 1$ км и более.

В разделе 2.3 показано, что классические конечно-разностные схемы для расчёта фильтрации не согласуются со вторым началом термодинамики – в расчётах разностное производство \mathcal{E}_0 может принимать отрицательные значе-

ния. Построена схема, учитывающая работу \mathcal{A} и удовлетворяющая условию $\mathcal{E}_0 \geq 0$ [9].

Третья глава

В **главе 3** описан разработанный метод определения теплофизических параметров бинарной смеси в переменных (1).

В **разделе 3.1** формулируется замкнутая термодинамическая модель бинарной смеси, основывающаяся на трёхпараметрическом кубическом уравнении состояния [33], обобщающем уравнение Ван-дер-Ваальса. Дается обзор существующих подходов к композиционному моделированию фильтрации. Подходы сопоставляются с разработанным методом ускоренного расчёта в переменных (1) теплофизических параметров бинарных смесей ($n_c = 2$) в широком диапазоне до- и сверхкритических давлений и температур. Определение многофазных равновесий разбито на два этапа. На этапе I при помощи кубического уравнения состояния определяется термодинамический потенциал смеси $\hat{\sigma}(P, \hat{h}, \hat{c})$, где $\hat{\sigma}$ – мольная энтальпия. Трудоёмкие вычисления этапа I выполняются один раз и впоследствии их результат – потенциал, сохранённый в виде полиномиального сплайна, – многократно используется на ускоренном этапе II при расчёте парожидкостных равновесий. Подобное разбиение на этапы позволяет ускорить, по сравнению с классическим подходом [34], расчёт свойств при заданной энтальпии \hat{h}_t . Алгоритм расчёта равновесия на этапе II схож с Negative-Flash методом [35], а основное отличие заключается в том, что вместо переменной T используется \hat{h}_t .

В **разделах 3.2 и 3.3** описаны процедуры этапов I и II, соответственно. При заданных (1) общая энтропия смеси $\hat{\sigma}_t$ имеет максимум в состоянии термодинамического равновесия. Таким образом, на этапе II по известной функции $\hat{\sigma}(P, \hat{h}, \hat{c})$ парожидкостное равновесие определяется из решения следующей задачи условного экстремума [5]:

$$\hat{\sigma}_t = \sum_{j=1}^{n_p} \hat{\sigma}_j \hat{V}_j \rightarrow \max \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_j = \hat{\sigma}(P, \hat{h}_j, \hat{c}_j), \quad j = 1, \dots, n_p$$

$$\sum_{j=1}^{n_p} \widehat{V}_j = 1, \quad \sum_{j=1}^{n_p} \widehat{h}_j \widehat{V}_j = \widehat{h}_t, \quad \sum_{j=1}^{n_p} \widehat{c}_j \widehat{V}_j = \widehat{c}_t \quad (7)$$

$$0 \leq \widehat{V}_j \leq 1, \quad j = 1, \dots, n_p; \quad 1 \leq n_p \leq 3 \quad (8)$$

Здесь \widehat{V}_j – молярная доля j -й фазы. Параметры \widehat{V}_j , \widehat{h}_t и \widehat{c}_t по определению удовлетворяют условиям (7) и (8). Для определения многофазного равновесия необходимо решить задачу условного максимума (6), (7) с дополнительными ограничениями в виде неравенств (8). В задаче (6) – (8) заданы P , \widehat{h}_t , \widehat{c}_t , а неизвестные – число фаз n_p , параметры фаз \widehat{h}_j , \widehat{c}_j , $j = 1, \dots, n_p$ и их молярные доли \widehat{V}_j . Остальные параметры фаз вычисляются по частным производным от термодинамического потенциала.

Интерпретация постановки задачи (6) – (8) связана с определением свойств бинарной смеси заданного состава \widehat{c}_t , помещённой в сосуд под подвижный поршень (Рис. 2а). Сосуд теплоизолированный, а на поршне лежит груз, т.е. заданы энтальпия \widehat{h}_t и давление P .

В разделе 3.4 обсуждается расчёт вязкости смеси в виде $\mu(P, \widehat{h}, \widehat{c})$ на основе принципа соответственных состояний.

В разделе 3.5 демонстрируется, что результаты расчёта по разработанному методу теплофизических свойств бинарной смеси $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$ в широком диапазоне давлений (0.1–150 МПа) и температур (0–700°C) с инженерной точностью согласуются с экспериментальными данными, доступными из литературных источников (Рис. 3) [6,16]. В пространстве (1) построена фазовая диаграмма смеси $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$, определены критические линии ($C_{(2)}R_7$ и $C_{(1)}R_5$) и области различных фазовых состояний n_p (Рис. 2б). При $\widehat{c}_t = 0$ и $\widehat{c}_t = 1$ имеем фазовую диаграмму чистых H_2O и CO_2 , изображённую на Рис. 1б, а $C_{(2)}$ и $C_{(1)}$ – критические точки CO_2 и H_2O , соответственно. Петлеобразные кривые $L_{(i)}C_{(i)}G_{(i)}$, $i = 1, 2$ ограничивают параметры равновесий $n_p = 2$ типа пар-жидкость. При $\widehat{c}_t \in (0, 1)$ возможны более сложные равновесия типа жидкий CO_2 -вода и трёх-фазные равновесия типа газообразный CO_2 -жидкий CO_2 -вода. Рассмотренный диапазон значений энтальпии \widehat{h}_t содержит интервал $T \in [0, 700]^\circ\text{C}$ [5].

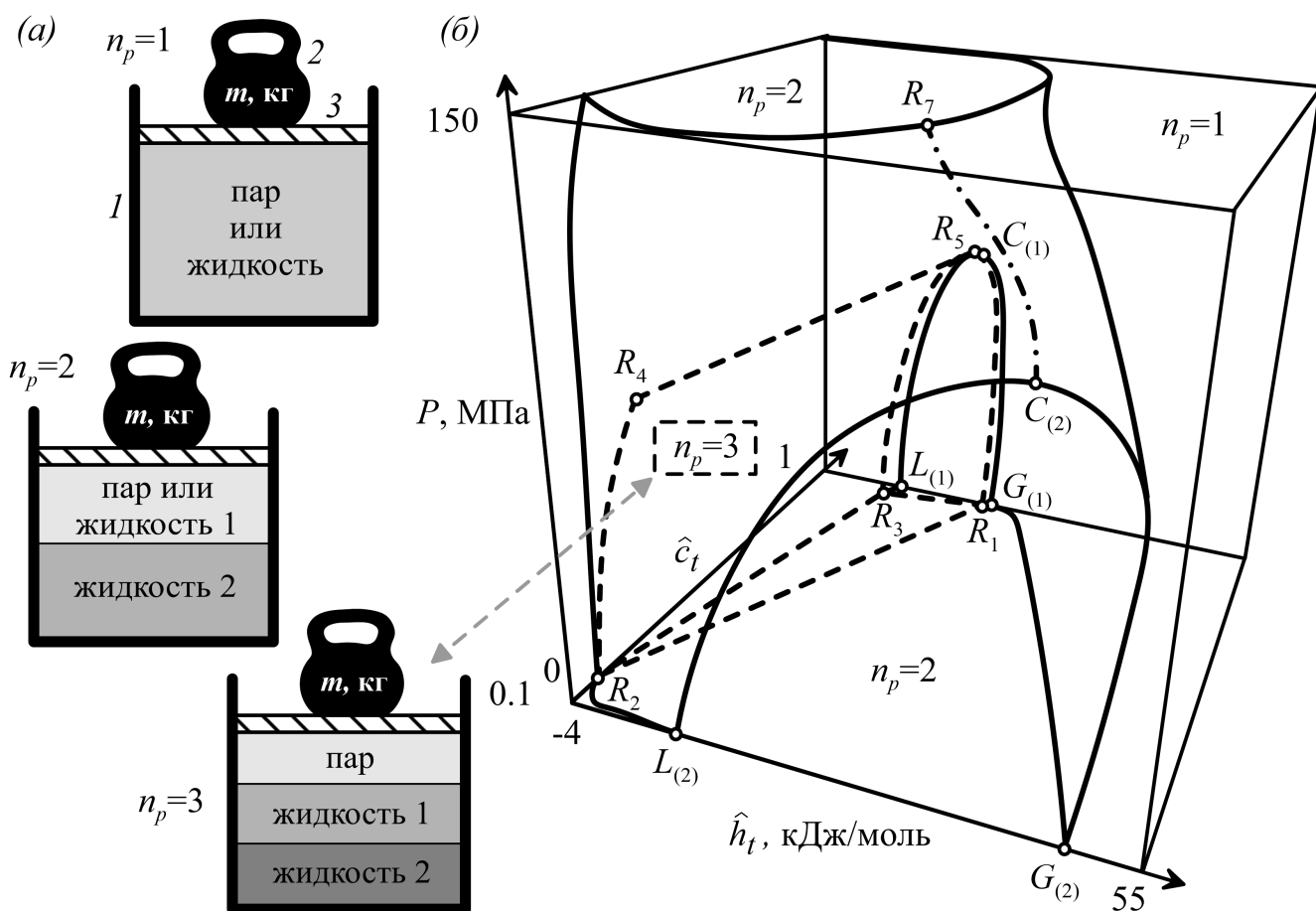


Рис. 2. Интерпретация задачи расчёта парожидкостного равновесия: 1 – теплоизолированный сосуд, 2 – груз, 3 – поршень (а). Рассчитанная фазовая диаграмма бинарной смеси $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ в переменных (1). Ось P имеет логарифмический масштаб.

Четвёртая глава

В главе 4 проведён дисперсионный анализ уравнений фильтрации бинарной смеси и исследованы сильные разрывы. Результаты главы 4 имеют общетеоретическое значение и используются в главе 5 при решении задачи Римана.

В разделе 4.1 сформулирована замкнутая система уравнений фильтрации бинарной смеси. При $n_c = 2$ в системе законов сохранения (2) и (3) плотности f , потоки \mathbf{q} и работа \mathcal{A} задаются соотношениями:

$$\begin{aligned}
 f_{(i)} &= \phi \sum_{j=1}^{n_p} \rho_j c_{j(i)} s_j, \quad i = 1, 2; \quad f_{(0)} = \phi \sum_{j=1}^{n_p} \rho_j e_j s_j + (1 - \phi) \rho_r e_r \\
 \mathbf{q}_{(i)} &= \sum_{j=1}^{n_p} \rho_j c_{j(i)} \mathbf{w}_j, \quad \mathbf{q}_{(0)} = \sum_{j=1}^{n_p} \rho_j h_j \mathbf{w}_j, \quad \mathcal{A} = \sum_{i=1}^2 \mathbf{q}_{(i)} \gamma
 \end{aligned} \tag{9}$$

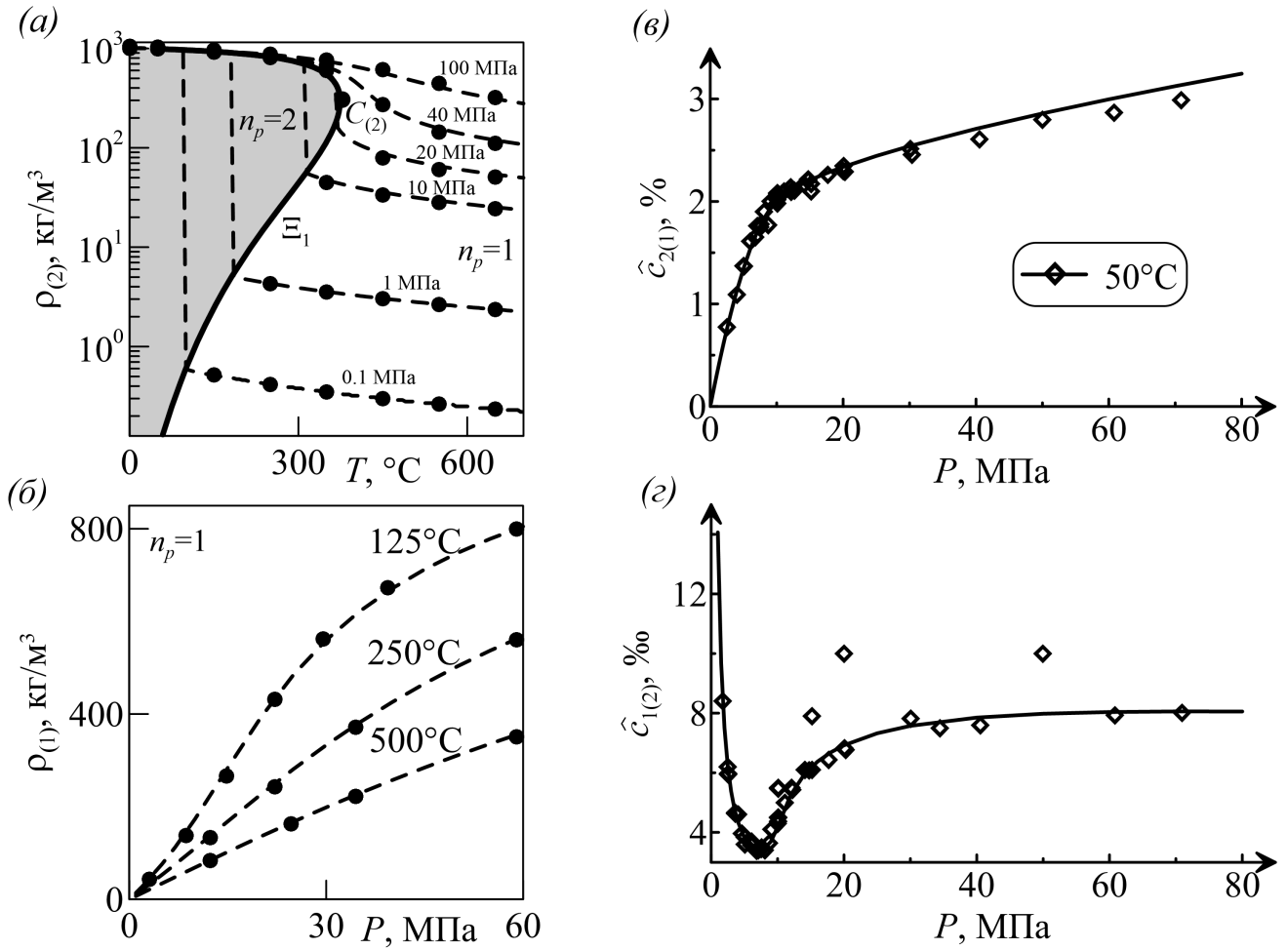


Рис. 3. Сравнение рассчитанных по разработанному методу (линии) и лабораторных измерений, взятых из литературных источников (точки), плотности чистой воды $\rho_{(2)}$ (а), плотности чистого CO₂ $\rho_{(1)}$ (б), равновесной мольной концентрации CO₂ в жидкой фазе воды $\hat{c}_{2(1)}$ (в) и мольной концентрации H₂O в газовой фазе CO₂ $\hat{c}_{1(2)}$ (г). $C_{(2)}$ – критическая точка H₂O.

где ϕ – пористость, ρ – истинная плотность, $c_{j(i)}$ – массовая доля i -ого компонента в j -й фазе, s – насыщенность, e – внутренняя энергия, h – удельная энтальпия, w – скорость фильтрации, γ – ускорение свободного падения, индекс (i) – параметр i -ого компонента, j – j -й фазы, а r – породы.

Скорости w определяются из закона фильтрации Дарси

$$w_j = -K \frac{K_j(s)}{\mu_j} (\nabla P - \rho_j \gamma), \quad j = 1, \dots, n_p \quad (10)$$

где K (без индекса) – абсолютная проницаемость породы, K_j – относительная фазовая проницаемость, характеризующая взаимодействие скелета пористой среды и подвижных фаз на масштабе пор, а μ – вязкость. Фазовые проницаемо-

сти K_j есть заданные функции от насыщенностей фаз $s = \{s_1, \dots, s_{n_p}\}$ [6, 36].

Если по постановке задачи необходимо учитывать процессы теплопроводности, то диссипативные члены $\boldsymbol{\psi}_{(i)}$ имеют вид

$$\boldsymbol{\psi}_{(0)} = -\bar{\lambda}\nabla T, \quad \boldsymbol{\psi}_{(i)} = \mathbf{0} \quad (11)$$

где $\bar{\lambda}$ – эффективный коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды.

Теплофизические свойства бинарной смеси задаются термодинамическим потенциалом $\hat{\sigma}(P, \hat{h}, \hat{c})$ и функцией для вязкости $\mu(P, \hat{h}, \hat{c})$. Для заданных параметров (1) парожидкостное равновесие определяется из решения задачи (6) – (8). Результат расчёта равновесия выразим следующей зависимостью

$$\Phi(P, \hat{h}_t, \hat{c}_t), \quad \Phi = \{n_p, T, s_j, c_{j(i)}, e_j, h_j, \mu_j, j = 1, \dots, n_p, i = 1, 2\} \quad (12)$$

Параметры породы заданы в виде

$$\phi(\mathbf{r}), \quad K(\mathbf{r}), \quad e_r = C_r T, \quad \rho_r, \lambda_r = \text{const} \quad (13)$$

где C_r – теплоёмкость, а \mathbf{r} – координаты в пространстве.

Подставляя (9) – (13) в (2) и (3) и для простоты полагая $\bar{\lambda} = (1 - \phi)\lambda_r$, получим замкнутую систему трёх уравнений относительно неизвестных (1).

В разделе 4.2 проведён дисперсионный анализ уравнений модели и определены характеристические скорости в областях течения с различным числом фаз ($n_p = 1, 2, 3$) [1, 2]. Показано, что

1. если пренебречь диссипативными членами, то при $n_p \leq 2$ система всегда имеет два малых возмущения гиперболического типа α и β , а с учётом теплопроводности имеется только одно возмущение типа α ;
2. в волнах α распространяются возмущения насыщенностей фаз, а температура и другие теплофизические параметры фаз (плотность, компонентный состав) не изменяются. Волны α соответствуют бесконечно малым фронтам вытеснения в изотермическом течении;
3. в волнах β распространяются возмущения температуры и происходят фазовые превращения. Параметры фаз изменяются в волнах только данного типа;
4. изотермические волны α могут распространяться как быстрее, так и медленнее неизотермических волн β . На фазовой плоскости ограничены соответствующие области параметров.

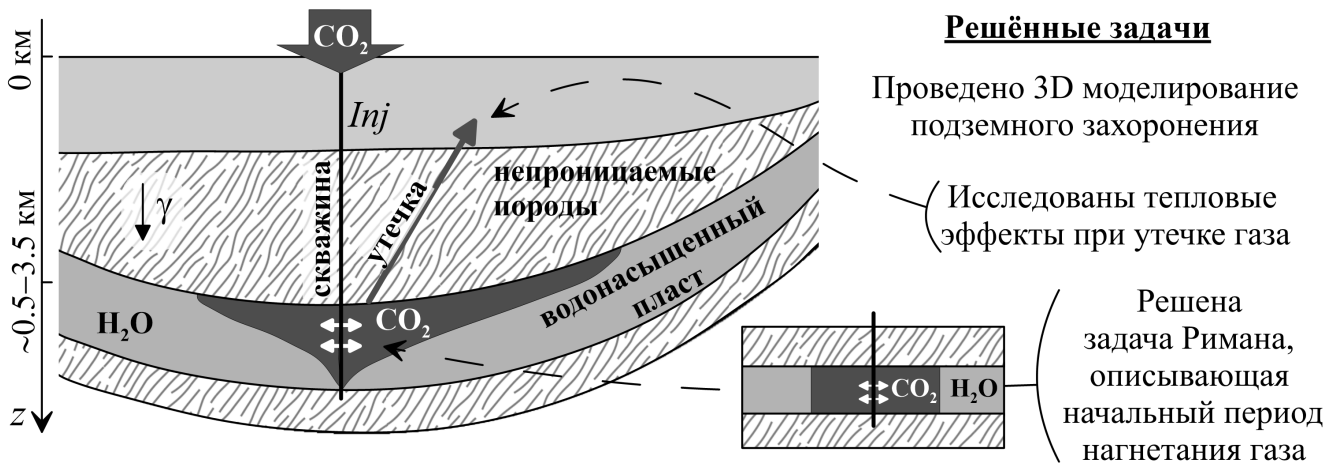


Рис. 4. Схема течения при подземном захоронении CO_2 и решённые задачи.

В **разделе 4.3** для случая фильтрации бинарной смеси $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ на фазовой плоскости исследовано поведение ветвей адиабаты разрыва в зависимости от положения её начальной точки. Одна из ветвей адиабаты (соответствующая волнам α) описывает фронты вытеснения в пористой среде, а вторая ветвь (соответствующая волнам β) описывает фронты фазового перехода и разрывы температуры. Построены диаграммы эволюционности разрывов. Каждая из двух ветвей адиабаты может иметь несколько эволюционных отрезков. Возможны разрывы, на которых условие Жуге выполняется два раза – перед и за разрывом [12, 32].

Пятая глава

В **главе 5** излагаются результаты приложения модели к проблемам подземного захоронения углекислого газа (Рис. 4).

В **разделе 5.1** дан обзор трёх основных физических механизмов, позволяющих удержать CO_2 в водонасыщенном пласте на рассматриваемых масштабах по времени $\sim 10^3$ лет. Газ, во-первых, как более лёгкая фаза скапливается в куполах, т.е. в геологических складках, обращённых выпуклостью вверх (структурный захват), во-вторых, растворяется в воде и, в-третьих, удерживается в виде остаточного газа за счёт действия капиллярных сил.

В **разделе 5.2** решена одномерная краевая задача Римана в полупространстве $r \in (0, +\infty)$, описывающая осесимметричное течение CO_2 от нагнетательной скважины $r = 0$ в водонасыщенный пласт $r > 0$ бесконечной протяжённости (Рис. 5a). Здесь r – расстояние до скважины. При $t = 0$ пласт насыщен

водой, а P и T имеют однородные распределения – $P = P_0$ и $T = T_0$. Через вертикальную скважину Inj происходит нагнетание чистого CO_2 с постоянным расходом Q . Задана температура газа T_Q при начальном пластовом давлении P_0 . По постановке сформулированная задача не содержит характерных масштабов по времени t и по пространству r , поэтому у неё существуют автомодельные решения, зависящие только от отношения $\xi = r/\sqrt{dt}$, где d – масштабный коэффициент [15].

Решение задачи осложнялось тем, что фильтрация описывается смешанной системой уравнений, для которой в случае общего положения не существует решений в виде центрированных волн разрежения, соответствующих характеристикам α и β (волн Римана). Разработано асимптотическое приближение для уравнений фильтрации (по сути коротковолновое приближение), в котором они имеют решения в виде центрированных волн разрежения, а решение задачи Римана есть последовательность сильных разрывов, волн Римана и областей однородного распределения параметров, распространяющихся от скважины ($r = 0$) в пласт ($r > 0$).

На Рис. 5в и г приведено решение для случая $T_Q > T_0$ и показана волновая картина. Вниз по потоку ($r \nearrow$) насыщенность газа s_g и температура T снижаются в системе $SR_\alpha R_\beta S - R_\alpha S$ сильных разрывов S и волн Римана R_α и R_β типов α и β , исследовавшихся в главе 4. Здесь «–» обозначает область однородного распределения s_g и T . Распределение температуры контролируется фазовыми переходами – растворением CO_2 в жидкой фазе и испарением H_2O в газовую фазу, локализованных на фронтах S_3 и S_1 , соответственно – и конвективным прогревом пласта за фронтом S_2 . В соответствии с результатами раздела 4.3, показано, что все разрывы удовлетворяют условиям эволюционности и являются фронтами Жуге [32].

Возможно шесть качественно различных типов решений задачи Римана о закачке CO_2 , содержащих до шести нелинейных волн (разрывов и волн Римана). Тип решения определяется положением точки (T_0, T_Q, P_0) относительно кривой δ (Рис. 5б), задающейся уравнениями $T_0 = T_\rho(P_0)$, $T_Q = T_\rho(P_0)$. Здесь $T = T_\rho(P)$ есть уравнение $\rho = \rho_{cr(1)}$ критической изохоры CO_2 , где $\rho_{cr(1)}$ – плотность CO_2 в критической точке. Кривая δ есть продолжение кривой равновесия пар-жидкость Ξ_1 (Рис. 1а) в область сверхкритических условий sc . Таким об-

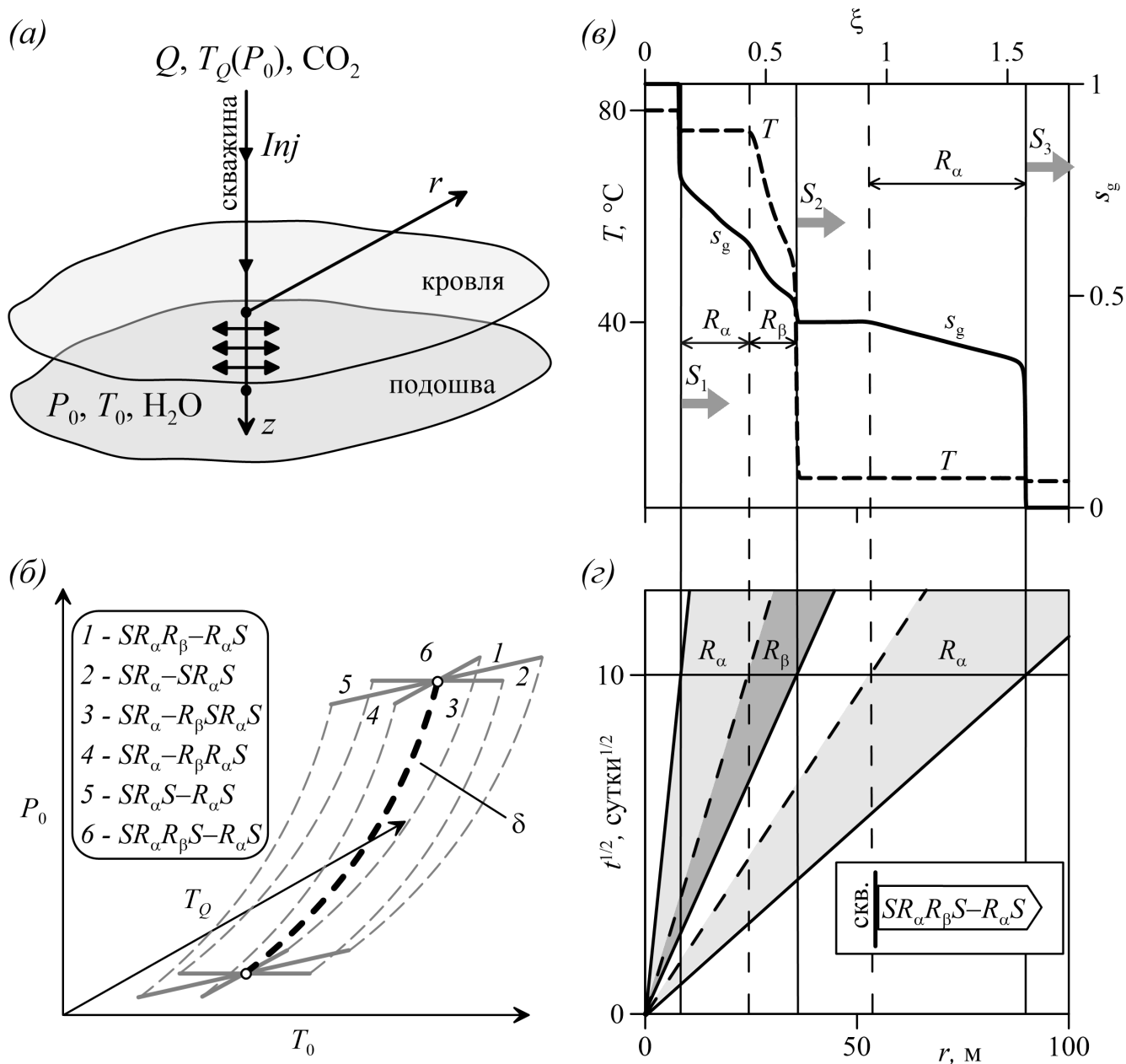


Рис. 5. Схема задачи Римана (а), диаграмма решений в пространстве $\{T_0, T_Q, P_0\}$ (б), распределение насыщенности газа s_g и температуры T (в) и соответствующая волновая картина, где выделены центрированные пучки характеристик α и β (г). Согласно результатам раздела 4.2, волны R_α соответствуют изотермическим процессам, а в волнах R_β происходят фазовые превращения и изменяется температура.

разом, конфигурация волнового пакета, распространяющегося от скважины в пласт, определяется окологрлическим состоянием CO_2 , а не свойствами породы или кривыми относительной фазовой проницаемости.

Исследована гидродинамическая устойчивость переднего фронта вытеснения S_3 при закачке CO_2 . При заданном геотермальном градиенте наибольший рост амплитуды возмущений поверхности фронта S_3 достигается в неглубокопогруженных пластах. В интересных для практики случаях фронт либо устойчив, либо слабо неустойчив (безразмерный показатель нарастания возмущений имеет малое положительное значение).

В заключительных параграфах **раздела 5.2** демонстрируется, что асимптотические решения позволяют оценить скорости переднего S_3 и заднего S_1 разрывов и качественно, а в некоторых случаях количественно, описывают распределения T и s_g между ними, полученные в рамках полного решения задачи. Даны рекомендации по приложению результатов исследований в реальных процессах нагнетания газа, если асимптотические предположения не выполняются. Определены типы волновых пакетов, распространяющихся от скважин в ряде действующих проектов захоронения [15].

В **разделе 5.3** 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 (Рис. 4). В подобных условиях может происходить трёхфазная фильтрация воды и CO_2 в сжиженном и газообразном виде, которая не описывается альтернативными моделями. На распределение температуры влияет конвективный перенос тепла, выделение тепла при растворении газа в воде и фазовые переходы между жидким и газообразным CO_2 . Данные эффекты могут приводить к немонотонному распределению температуры в направлении течения. Охлаждение пористой среды при испарении жидкого CO_2 в областях пониженного давления приводит к падению температуры ниже начального пластового значения T_0 [6].

В **разделе 5.4** демонстрируется, что результаты диссертации могут использоваться не только в теоретических исследованиях, но и в прикладных расчётах нагнетания газа с учётом детализированных инженерных данных о геологическом строении пластов. Проведены трёхмерные расчёты захоронения сверхкри-

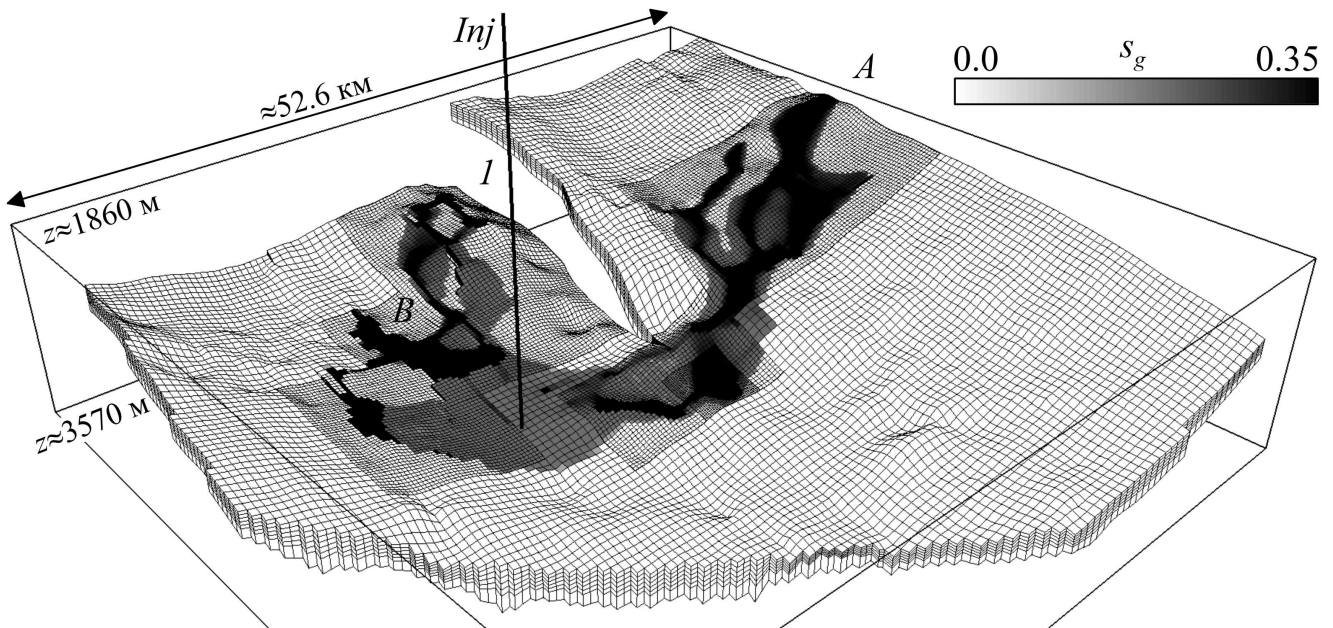


Рис. 6. Пример результатов 3D расчёта нагнетания CO_2 . Палитра – насыщенность газа s_g , Inj – нагнетательная скважина, 1 – геологический разлом.

тического углекислого газа в реальных геологических формациях. Моделируется растекание менее плотной фазы CO_2 вдоль кровли водонасыщенного пласта (показан в перспективе на Рис. 6) с учётом его структурных особенностей, поднятий и складок (см. схему течения в разрезе на Рис. 4). При различных положениях нагнетательной скважины Inj оценён вклад структурного захвата, растворения газа в воде и капиллярных эффектов в удержание CO_2 в пласте. Определено более оптимальное положение нагнетательной скважины Inj , при котором структурные ловушки резервуара в области B используются рациональнее, а риск утечки газа из формации через границу расчётной области A снижается [7].

Шестая глава

Разработанная математическая модель фильтрации бинарных смесей позволила провести новые исследования ранее не рассматривавшихся природных процессов. Результаты данных исследований изложены в **главе 6**.

В **разделе 6.1** впервые рассмотрена конвекция в геотермальных системах с учётом термогидродинамических процессов в приповерхностных (докритические условия) и глубокопогруженных (сверхкритические условия) областях (Рис. 7а). Построена трёхмерная геологогидродинамическая модель геотер-

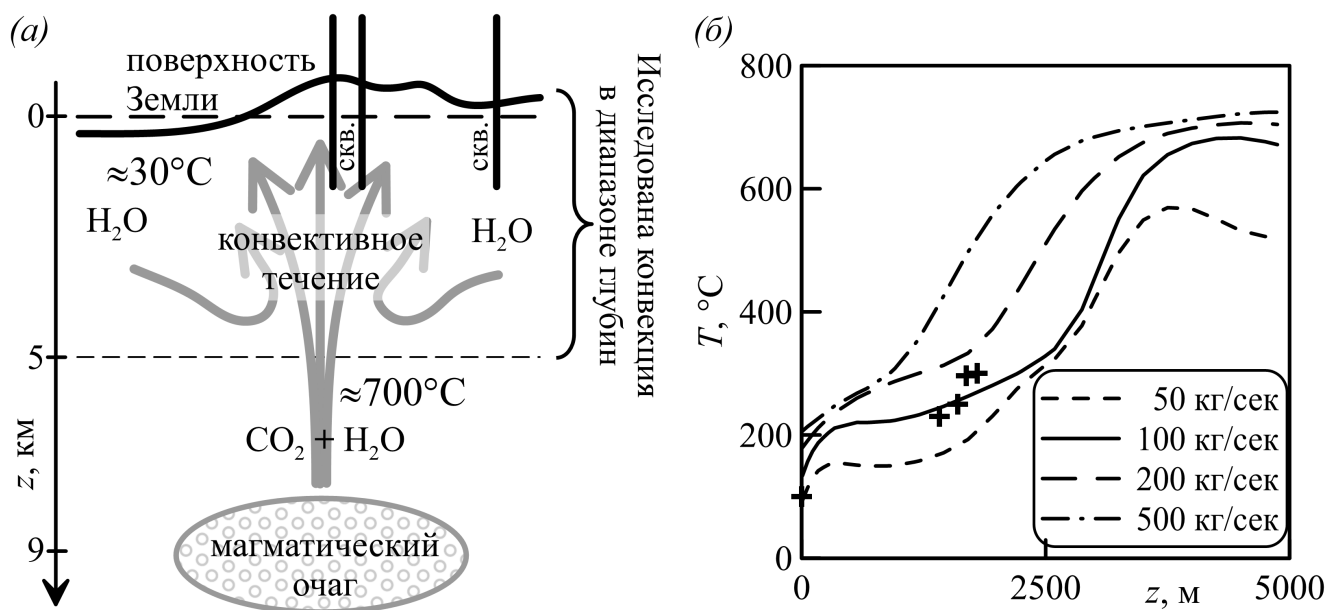


Рис. 7. Схема исследованных процессов в геотермальной системе. Вертикальные прямые – геотермальные скважины (а). Сопоставление измеряемых (точки) и рассчитанных (линии) температур в одной из скважин при различных расходах Q магматического флюида из очага (б).

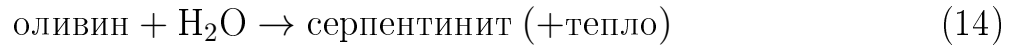
мальной системы Campi Flegrei (Италия) в интервале глубин 0 – 5 км [16]. Модель откалибрована с использованием измерений потоков воды, углекислого газа и тепла на поверхности Земли и измерений температуры в геотермальных скважинах. Результаты расчётов конвекции в геотермальной системе согласуются с натурными измерениями (Рис. 7б). С помощью построенной модели

1. показано, что высокий геотермальный градиент, наблюдаемый в данной области на Земле, способствует развитию конвективного течения с несколькими восходящими потоками нагретого флюида;
2. исследовано влияние различных параметров геотермальной системы на интенсивность конвекции. Показано, что геотермальный градиент, расход Q и компонентный состав магматического флюида наиболее сильно влияют на процессы в геотермальной системе;
3. дана оценка для параметров смеси, которой геотермальная система Campi Flegrei питается из магматического очага.

В дальнейшем построенная геологогидродинамическая модель будет полезна для прогнозирования активности геотермальной системы Campi Flegrei.

В разделе 6.2 описано расширение модели фильтрации на случай течений

в кимберлитовых трубках с учётом экзотермической минеральной реакции



и сопутствующих изменений пористости и проницаемости. В рамках модели обоснована новая геофизическая концепция о гидродинамических процессах, приводящих к неоднородному распределению серпентинита в трубках. Показано, что

1. вода, необходимая для серпентинизации, может поступать в нагретую трубку из окружающих проницаемых водонасыщенных пород (Рис. 8а);
2. интенсивность притока воды в трубку существенно зависит от проницаемости пород и количества оливина;
3. распределение серпентинита в трубке определяется несколькими физическими эффектами: выделением тепла при серпентинизации, снижением проницаемости, ограничивающим приток воды, и кондуктивным остыванием. Взаимодействие данных эффектов может приводить к сохранению неизменённого оливина в центральных областях трубки (Рис. 8б) [13].

В разделе 6.3 показано, что в кимберлитовой трубке могут возникать условия, способствующие пространственной неустойчивости протекания реакции (14). Впервые обнаружен и исследован новый механизм развития неустойчивости, связанный с самоускорением экзотермической реакции (14) при повышении температуры. Проведён линейный анализ устойчивости протекания реакции. В аналитическом виде даны оценки для характерного масштаба L неоднородного распределения. Масштаб определяется балансом между дестабилизирующим эффектом от выделения тепла при серпентинизации и стабилизирующим действием теплопроводности. Расчёты развития неустойчивости в горизонтальном слое пород трубки в рамках полной нелинейной модели согласуются с аналитическими результатами. Характерный размер образующихся пятен с повышенным содержанием серпентинита определяется длиной L (Рис. 8в).

Седьмая глава

Параллельно с проведением научно-исследовательских работ, результаты которых изложены в главах 2–6, разработан комплекс программ MUFITS (гидродинамический симулятор) [22] для численного моделирования многофазной

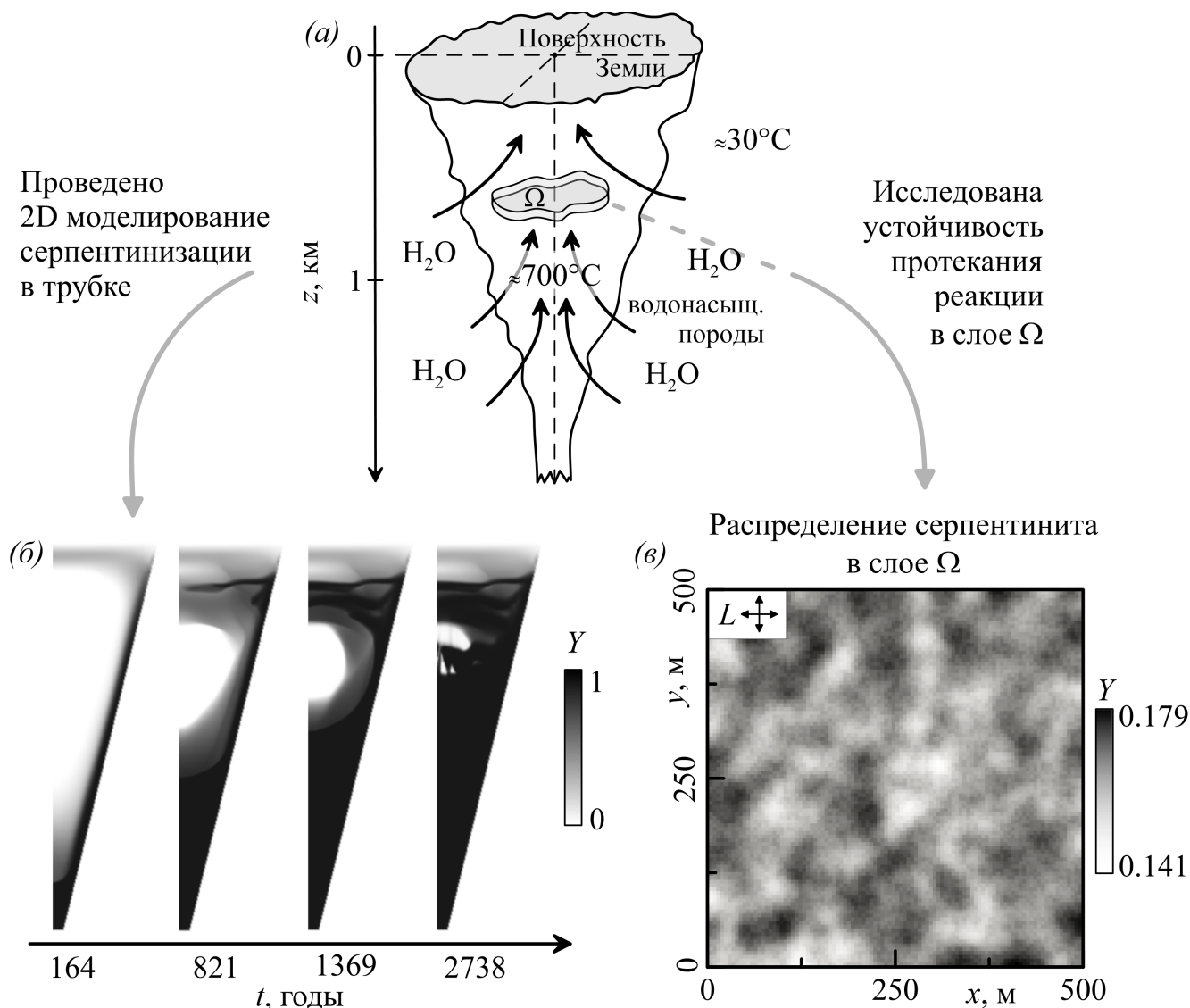


Рис. 8. Схема моделируемого процесса внедрения холодных подземных вод в нагретую трубку (а). Эволюция распределения серпентинита Y в трубке (б) и конечное ($t \rightarrow \infty$) распределение серпентинита в горизонтальном слое Ω (в).

фильтрации в различных приложениях [7, 17, 25, 26]. Создание симулятора являлось неотъемлемой частью научно-исследовательских работ, так как разработанные методы существенно опираются на численное решение задач термодинамики (глава 3) и гидродинамики (главы 5 и 6).

В разделе 7.1 дан обзор функциональных возможностей комплекса. При его разработке ставилась цель создания отечественной программы, которая не уступает в своей функциональности зарубежным программам для расчёта фильтрации, применяющимся в академических исследованиях, и по возможности приближающейся к характеристикам инженерных пакетов, использующихся в проектных организациях нефтегазовой отрасли. Также, цель

заклучалась в популяризации результатов диссертационной работы в рамках привлечения отечественных и зарубежных учёных к использованию симулятора и, следовательно, разработанной модели фильтрации бинарных смесей в проводимых ими исследованиях.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить комплекс задач, направленных на использование в пакете программ: как разработанных методов моделирования фильтрации бинарных смесей в широком диапазоне давлений и температур, так и более простых классических моделей фильтрации (например, модели Чёрной нефти [30]); развитых нестандартных подходов к численному моделированию и методов параллельных вычислений; инженерных данных о геологическом строении пластов и свойствах флюидов; совместимого с аналогами формата входных данных; формата выходных данных, совместимого с существующими средствами трёхмерной визуализации.

Комплекс содержит пять модулей для расчёта теплофизических свойств пластовых флюидов для различных задач фильтрации, не ограничивающихся рассмотренными в диссертации приложениями. Комплекс позволяет моделировать: разработку углеводородных месторождений в рамках расширенной модели Чёрной нефти; процессы, связанные с созданием подземных хранилищ газа в водонасыщенных пластах и подземным захоронением CO_2 с учётом изменений солёности пластовой воды и образованием твёрдой фазы соли; получение геотермальной энергии.

В **разделе 7.2** приводятся результаты расчёта семи тестовых задач, описывающих различные физические процессы в пластах в отмеченных приложениях. Результаты расчёта тестов в созданном пакете, в том числе стандартных для нефтяной промышленности тестов Общества инженеров-нефтяников [37], хорошо согласуются с результатами, полученными в других пакетах программ.

Приведём здесь результаты тестирования в рамках расчёта задачи из работы [38], описывающей закачку CO_2 в малый сектор водонасыщенного пласта, изображённого на Рис. 6. Через вертикальную скважину Inj в течение $t \in [0, 25]$ лет с постоянным расходом $Q = 15$ кг/сек нагнетается CO_2 , а при $t \in (25, 50]$ лет закачка не происходит – $Q = 0$ кг/сек (Рис. 9). Расчёт проводится по изложенному в диссертации методу моделирования фильтрации бинарных смесей. Результаты расчёта в MUFITS, в частности распределение насыщенно-

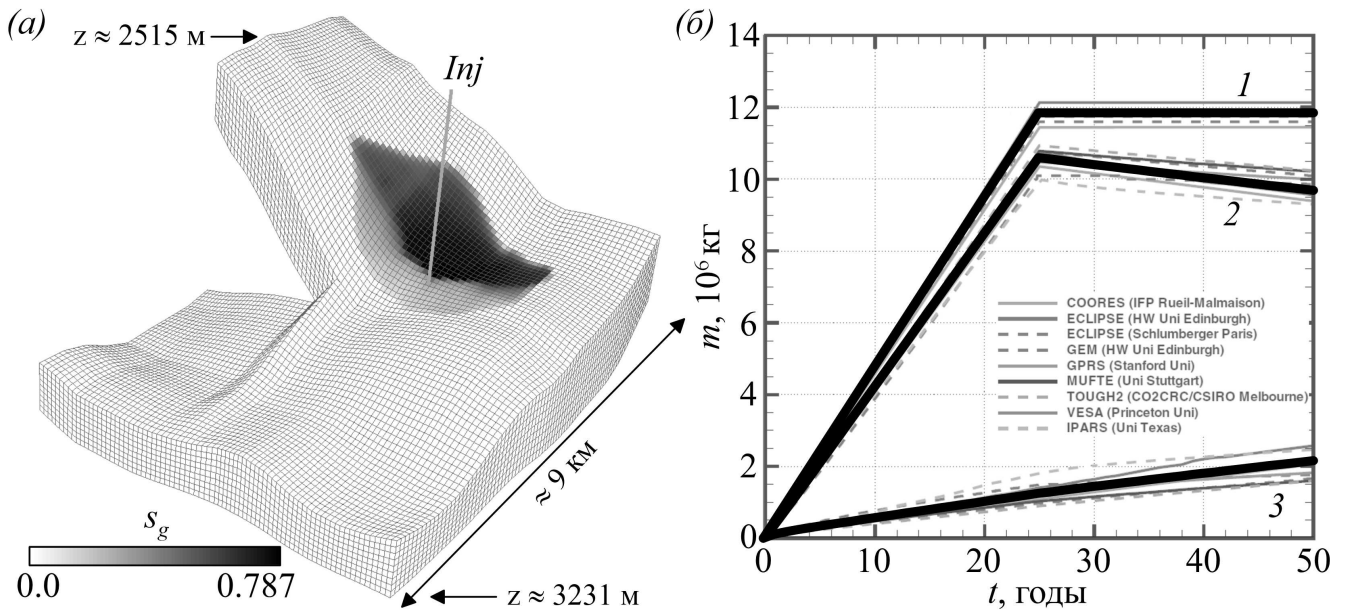


Рис. 9. Рассчитанное распределение насыщенности газа (s_g) при $t = 50$ лет, Inj – нагнетательная скважина (а). Масса CO_2 в различных состояниях (m): 1 – общая (т.е. просуммированная по фазам), 2 – в газовой фазе, 3 – газ, растворённый в воде. Фоновый рисунок, показывающий результаты расчёта в альтернативных программах, взят из работы [38]; жирные линии – результаты расчёта в MUFITS (б).

сти газа и количество CO_2 в различных фазовых состояниях в зависимости от времени, находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в других пакетах [7, 38].

В разделе 7.3 приводятся сведения о практическом использовании комплекса.

Заключение

В заключении подведены итоги работы и сформулированы её основные результаты и выводы.

1. В диссертации развиты аналитические и численные методы исследования фильтрации в широком диапазоне до- и сверхкритических давлений и температур с учётом усложнённых многофазных парожидкостных равновесий и фазовых превращений. Методы применены для определения закономерностей при тепломассопереносе в проблемах подземного захоронения CO_2 и в природных процессах. Решены новые задачи, имеющие теоретическое и прак-

тическое значение;

2. 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 расчёта фильтрации;
3. Создан метод ускоренного расчёта теплофизических свойств бинарных смесей в переменных давление-энтальпия-состав, позволяющий с инженерной точностью определять параметры многофазных (в том числе трёхфазных) состояний бинарной смеси $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ при до- и сверхкритических условиях;
4. Решены новые теоретические задачи и проведены трёхмерные инженерные расчёты в проблемах подземного захоронения CO_2 . Решена классическая задача Римана, описывающая закачку сверхкритического CO_2 в водонасыщенный пласт и даны рекомендации по использованию решений задачи для анализа термогидродинамических процессов в призабойной зоне скважины;
5. Впервые исследована конвекция в геотермальных системах с учётом процессов в глубокопогруженных областях, где температура выше критической температуры воды. Наиболее сильно на параметры в приповерхностных областях влияют геотермальный градиент, расход и компонентный состав магматического флюида. Для случая геотермальной системы Campi Flegrei результаты расчётов конвекции по разработанной модели согласуются с данными натурных наблюдений за системой;
6. Впервые создана модель неизотермической фильтрации в кимберлитовых трубках с учётом серпентинизации оливина. Сложное взаимодействие выделения тепла при реакции, конвективного охлаждения трубки из-за притока холодных подземных вод, влияние которого ограничивается снижением проницаемости, и охлаждения из-за теплопроводности приводит к неоднородному распределению серпентинита. Впервые обнаружена и исследована пространственная неустойчивость серпентинизации, приводящая к появлению областей с повышенным содержанием серпентинита;
7. Создан комплекс программ, который с учётом инженерных данных позволяет моделировать неизотермическую фильтрацию в широком спектре задач рационального недропользования и в природных процессах.

Основные публикации по теме диссертации в т.ч. статьи в журналах из перечня ВАК [1–17]

1. Афанасьев, А.А. О постановке задач неизотермической фильтрации воды и пара в высокопроницаемом пласте // Изв. РАН. МЖГ. —2010. —2. —С. 73.
2. Афанасьев, А.А. Математическая модель неизотермической многофазной фильтрации бинарной смеси // Изв. РАН. МЖГ. —2011. —1. —С. 104.
3. Афанасьев, А.А. О течениях бинарных смесей в пористых средах при высоких давлениях и температурах // ДАН. —2011. —4. —С. 477.
4. Афанасьев, А.А. Об одном представлении уравнений многокомпонентной многофазной фильтрации // Прикладная математика и механика. —2012. —76(2). —С. 265.
5. Афанасьев, А.А. Моделирование свойств бинарной смеси углекислый газ-вода при до- и закритических условиях // Теплофизика высоких температур. —2012. —50(3). —С. 363.
6. Afanasyev, A.A. Multiphase compositional modeling of CO₂ injection under subcritical conditions: The impact of dissolution and phase transitions between liquid and gaseous CO₂ on reservoir temperature // Int. J. Greenhouse Gas Contr. —2013. —19. —P. 731.
7. Afanasyev, A.A. Application of the reservoir simulator MUFITS for 3D modeling of CO₂ storage in geological formations // Energy Proc. —2013. —40. —P. 365.
8. Афанасьев, А.А., Мельник, О.Э. О математическом моделировании многофазной фильтрации при околоскритических условиях // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 1. Математика. Механика. —2013. —68(3). —С. 68.
9. Афанасьев, А.А., Мельник, О.Э. Критерий неотрицательного производства энтропии для разностных схем расчёта фильтрации // Выч. Мех. Сплошн. Сред. —2013. —6(3). —С. 328.

10. Афанасьев, А.А., Мельник, О.Э. О построении конечно-разностной схемы расчёта фильтрации при околокритических термодинамических условиях // Выч. Мех. Сплошных Сред. —2013. —6(2). —С. 246.
11. Афанасьев, А.А., Мельник, О.Э., Цветкова, Ю.Д. Моделирование фильтрации при подземном захоронении углекислого газа с применением высокопроизводительных вычислительных систем // Выч. Мех. Сплошных Сред. —2013. —6(4). —С. 420.
12. Афанасьев, А.А. Исследование эволюционности разрывов при фильтрации бинарной смеси // Изв. РАН. МЖГ. —2014. —1. —С. 90.
13. Afanasyev, A., Melnik, O., Poritt, L., Schumacher, J., Sparks, S.J. Hydrothermal alteration of kimberlite by convective flows of external water // Contrib. Mineral. Petrol. —2014. —168:1038.
14. Afanasyev, A.A. A method of multi-phase compositional modeling under sub- and supercritical thermodynamic conditions / Proceedings of the 14th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. —Catania, Italy, 2014. —17 pp. (Индексируется Scopus).
15. Afanasyev, A.A. On the Riemann problem for supercritical CO₂ injection into an aquifer // Int. J. Greenhouse Gas Contr. —2015. —42. —P. 629.
16. Afanasyev, A., Costa, A., Chiodini, G. Investigation of hydrothermal activity at Campi Flegrei caldera using 3D numerical simulations: extension to high temperature processes // J. Volcanol. Geotherm. Res. —2015. —299. —P. 68.
17. Afanasyev, A.A. Hydrodynamic modelling of petroleum reservoirs using simulator MUFITS // Energy Proc. —2015. —76. —P. 427.
18. Афанасьев, А.А. Термогидродинамика бинарной смеси в пористой среде // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. —2011. —4(5). —С. 1978.
19. Afanasyev, A.A. MUFITS code for analysis of binary mixture flows in porous media / Extended Abstracts. International conference Geofluids 2012. —Rueil-Malmaison, France, 2012. —P. 9.

20. Афанасьев, А.А. Гидродинамическое моделирование подземного захоронения углекислого газа // Суперкомпьютеры. —2014. —17. —С. 50.
21. Афанасьев, А.А. Применение суперкомпьютеров для моделирования подземного захоронения углекислого газа / В сборнике Альманах «Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности (пятый выпуск)». —М.: Из-во МГУ, 2014. —208 с.
22. Afanasyev, A. MUFITS reservoir simulation software website. —Режим доступа: www.mufits.imec.msu.ru.
23. Афанасьев, А.А. Моделирование и расчёт подземного захоронения углекислого газа / Труды конференции-конкурса молодых учёных НИИ механики МГУ, 2012 г. —М.: Изд-во МГУ, 2013. —С. 27.
24. Афанасьев, А.А. Автомодельные решения задачи нагнетания углекислого газа в водонасыщенный пласт / Труды конференции-конкурса молодых учёных НИИ механики МГУ, 2013 г. —М.: Изд-во МГУ, 2014. —С. 37.
25. Афанасьев, А.А. Семинар по проведению гидродинамических расчётов в комплексе программ MUFITS: приложение к геотермальным системам. — University of Bristol, Bristol, UK, 2015.
26. Афанасьев, А.А. Семинар по проведению гидродинамических расчётов в комплексе программ MUFITS: приложение к подземному захоронению углекислого газа. —GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany, 2015.
27. Афанасьев, А.А. Многофазная фильтрация при закачке нагретого углекислого газа в водонасыщенный пласт / Сборник трудов. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. —Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета, Казань, 2015. —С. 234.

Список литературы

28. Цыпкин, Г.Г. О возникновении двух подвижных границ фазовых переходов при добыче пара из гидротермального водонасыщенного пласта // ДАН. —1994. —337(6). —С. 748.
29. Афанасьев, А.А., Бармин, А.А. Нестационарные одномерные фильтрационные течения воды и пара с учётом фазовых переходов // Изв. РАН. МЖГ. —2007. —4. —С. 134.
30. Trangenstein, J.A., Bell, J.B. Mathematical structure of the black-oil model for petroleum reservoir simulation // SIAM J. Appl. Math. —1989. —49(2). —Р. 749.
31. Годунов, С.К. Элементы механики сплошной среды. —М.: Наука, 1978. —303 с.
32. Куликовский, А.Г., Свешникова, Е.И. Нелинейные волны в упругих средах. —М.: Моск. лицей, 1998. —412 с.
33. Брусиловский, А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. —М.: Грааль, 2002. —575 с.
34. Michelsen, M.L. Multiphase isenthalpic and isentropic flash algorithms // Fluid Phase Equil. —1987. —33. —Р. 13.
35. Iranshahr, A., Voskov, D., Tchelepi, H.A. Generalized negative-flash method for multiphase multicomponent systems // Fluid Phase Equil. —2010. —299. —Р. 272.
36. Brooks, R.H., Corey, A.T. Hydraulic properties of porous media // Colorado State University. Hydrology Papers 3. —1964. —24 p.
37. Islam, A.W., Sepehrnoori, K. A review on SPEs comparative solution projects // J. Pet. Sci. Res. —2013. —2(4). —Р. 167.
38. Class, H., Ebigbo, A. et al. A benchmark study on problems related to CO₂ storage in geologic formations // Comput. Geosci. —2009. —13. —Р. 409.