

На правах рукописи

Молчанов Дмитрий Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВУХФАЗНОЙ
ФИЛЬТРАЦИИ СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДОВ В
ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ
ПЕРЕХОДОВ**

Специальность 1.1.9 —
механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Зайченко Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: **Ганиев Олег Ривнерович**,
доктор технических наук,
Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН»,
директор

Пурдин Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
доцент

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ»

Защита состоится 27 декабря 2021 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, корп. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте <https://jiht.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.03,
к.т.н.

Фрид Семен Ефимович

©Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2021

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследования процессов течения двухфазных смесей в пористых средах представляют интерес как с точки зрения развития теории фильтрации, так и для решения прикладных задач подземной гидродинамики. Физическое и математическое моделирование подобных процессов необходимо для понимания механизмов массообмена и прогнозирования динамики поведения геотермальных скважин, нефтяных, газовых и газоконденсатных пластовых систем. В случае газоконденсатных пластов задача усложняется наличием фазовых переходов и значительными различиями в подвижности фаз в пористой среде. Кроме того, газоконденсатные смеси в определенной области термобарических параметров, характерных для реальных пластов, проявляют ретроградные свойства, в результате чего при снижении давления ниже давления «точки росы» происходят процессы обратной конденсации и насыщения пористой среды малоподвижным ретроградным конденсатом [1; 2]. В результате такого поведения газоконденсатной смеси значительно снижается дебит скважины вплоть до полной блокировки расхода смеси, и возникают неустойчивые режимы фильтрации.

В последние годы наметился повышенный интерес к исследованиям гидродинамики течений углеводородных смесей в пористой среде, что вызвано эксплуатацией большинства газоконденсатных месторождений в режиме «истощения» и необходимостью разработки эффективных методов воздействия на газоконденсатные системы с целью увеличения дебита скважин. В большинстве известных работ рассматриваются отдельные задачи фильтрации углеводородов: динамика изменения структуры пористого коллектора, оценка и учет степени термодинамической неравновесности фазовых переходов, определение вида функций относительных фазовых проницаемостей. Что касается моделирования гидродинамики процесса фильтрации, то основные работы посвящены разработке математических моделей и численным экспериментам. Крайне малое количество экспериментальных работ связано, по всей видимости, с высокой трудоемкостью и сложностью фильтрационных экспериментов при термобарических условиях реальных пластов. Что касается исследований условий возникновения неустойчивых режимов фильтрации, то таких работ практически нет.

В связи с этим экспериментальные и численные исследования режимов фильтрации смеси «метан–н-пентан», моделирующей свойства реального газоконденсатного флюида, результаты которых представлены в диссертационной работе, представляются актуальными и будут способствовать разработке эффективных физических методов повышения продуктивности газоконденсатных скважин.

Целью диссертационной работы является исследование особенностей изотермической двухфазной фильтрации газоконденсатных углеводородных смесей и определение условий возникновения неустойчивых режимов течения на примере бинарной модельной смеси «метан–н-пентан».

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать программу расчета фазового состояния многокомпонентных углеводородных систем.
2. Доработать математическую модель процесса изотермической фильтрации углеводородной системы с учетом фазовых переходов и провести численные эксперименты для определения условий возникновения неустойчивых режимов фильтрации.
3. Разработать установку и методику приготовления и контроля полной гомогенизации модельной смеси.
4. Разработать методику изготовления насыпной модели пласта.
5. Разработать и создать на базе фильтрационного стенда «Пласт» стенд «Пласт-2» для физического моделирования неустойчивых режимов изотермической фильтрации модельного газоконденсатного флюида.
6. Выполнить экспериментальные исследования на стенде «Пласт-2» с целью определения условий возникновения неустойчивых, в т.ч. автоколебательных режимов фильтрации бинарной модельной смеси «метан–н-пентан».

Научная новизна:

1. Экспериментально показано, что необходимым условием возникновения неустойчивых, в т.ч. автоколебательных режимов фильтрации модельной смеси «метан–н-пентан» является комбинация параметров состояния (температура, давление, концентрация смеси), соответствующих области обратной конденсации фазовой диаграммы состояния.
2. Экспериментально определены диапазоны давлений и концентраций смеси «метан–н-пентан», при которых реализуются автоколебательные режимы течения.
3. Методом численного моделирования определены условия возникновения режимов фильтрации с периодической блокировкой расхода смеси (образование «конденсатных пробок»).

Практическая значимость:

1. Созданный в процессе работы стенд «Пласт-2» позволяет проводить исследования особенностей фильтрации газоконденсатных смесей, в т.ч. флюидов реальных газоконденсатных месторождений в широком диапазоне термобарических параметров и моделировать физические методы воздействия на пластовые системы с целью предотвращения неустойчивых режимов фильтрации.

2. Разработанный пакет программ расчета фазовых равновесий многокомпонентных углеводородных смесей и процессов фильтрации углеводородного флюида дает возможность моделировать реальные процессы, происходящие в призабойной зоне газоконденсатных месторождений (режимы «на истощение», режимы с периодической блокировкой расхода флюида, автоколебательные режимы), и моделировать физические методы воздействия на газоконденсатную систему.

Результаты экспериментальных и численных исследований, представленные в диссертационной работе, были получены в рамках проекта РФФ № 14-50-00124, Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013 – 2020 годы, грантов РФФИ № 17-08-01270 и № 19-08-00280.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Конструкция фильтрационного стенда «Пласт-2», предназначенного для моделирования термодинамических и гидродинамических процессов в реальных газоконденсатных пластах, и методики подготовки и проведения экспериментов.
2. Результаты экспериментальных исследований процессов изотермической фильтрации углеводородной смеси «метан–н-пентан», в т.ч. условия возникновения автоколебательных режимов.
3. Программа расчета фазового равновесия многокомпонентной углеводородной системы с включениями азота, сероводорода и диоксида серы.
4. Результаты численного моделирования режимов фильтрации с периодической блокировкой расхода флюида.

Достоверность. В основу физических моделей и математических алгоритмов, использованных при проведении исследований, положены общепринятые методики описания фундаментальных законов фильтрации и термодинамики фазовых превращений в многокомпонентных системах. Экспериментальные исследования проводились с использованием современного оборудования, обеспечивающего повторяемость результатов. Для проверки корректности результатов было проведено тестирование компьютерных кодов, реализующих выбранную математическую модель процессов фильтрации, и принятых допущений.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

1. Двадцатая ежегодная международная научно-технической конференция студентов и аспирантов «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА», г. Москва, 27.02.2014 – 28.02.2014.

2. XXIX International Conference on Equations of State for Matter, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, 01.03.2014 – 06.03.2014.
3. 6-я Межрегиональная конференция «Нефть и газ Юга России», г. Краснодар, 02.09.2014 – 04.09.2014.
4. VII Школа молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», г. Махачкала, Республика Дагестан, 06.10.2014 – 08.10.2014.
5. International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014), Oludeniz, Fethiye/Mugla, Turkey, 16.10.2014 – 19.10.2014.
6. IV Международная конференция «Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы», г. Махачкала, Республика Дагестан, 21.09.2015 – 24.09.2015.
7. XXXI International Conference on Equations of State for Matter, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, 01.03.2016 – 06.03.2016.
8. I международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем» SPRS-2016, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, 12.09.2016 – 14.09.2016.
9. XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, 01.03.2017 – 06.03.2017.
10. XI Школа молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна, г. Махачкала, Республика Дагестан, 15.10.2018 – 18.10.2018.
11. XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, 01.03.2018 – 06.03.2018.
12. XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, п. Эльбрус, Кабардино-Балкарская республика, 01.03.2019 – 06.03.2019.
13. Международная научно-практическая конференция «ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ, ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — 2020», г. Севастополь, 21.09.2020 – 24.09.2020.
14. Международная научно-практическая конференция «ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ, ПРОМЫШЛЕННАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — 2021», г. Севастополь, 20.09.2021 – 23.09.2021.
15. I Международный научно-практический семинар «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТОВЫХ СИСТЕМ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ», п. Развилка, Московская область, 01.07.2021 – 02.07.2021.

Личный вклад. Автором лично разработаны программные коды для расчета фазового состояния многокомпонентных углеводородных смесей и визуализации полученных в результате физического моделирования данных, методики подготовки модельных смесей и проведения экспериментальных исследований. Автор принимал непосредственное участие в модернизации экспериментальной установки, в анализе и интерпретации полученных данных, а также в формулировке выводов и в обосновании моделей. Все публикации подготовлены лично автором или в соавторстве.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 25 печатных изданиях, в т.ч. 4 — в журналах из перечня ВАК, 5 — в изданиях, индексируемых в библиографической базе данных Scopus, 16 — в тезисах докладов и сборниках трудов конференций. В процессе работы над диссертацией получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 1 приложения. Объем диссертации составляет 151 страницу, включая 85 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 95 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Первая глава содержит анализ литературы по теме исследований. Рассмотрены особенности процесса фильтрации газоконденсатных смесей и их фазового поведения, в частности, явление ретроградной конденсации. Обсуждается влияние относительных фазовых проницаемостей на процесс конденсации в призабойной области газоконденсатной скважины. Рассмотрены методы моделирования фазового состояния углеводородных систем.

Приведено обоснование использования четырехкоэффициентного уравнения состояния ван-дер-ваальсового типа для расчета фазовых равновесий и теплофизических свойств углеводородных смесей при термобарических параметрах реальных газоконденсатных пластов. Отмечено, что при определенных условиях возможно существование неустойчивых режимов фильтрации, в т.ч. автоколебательных, природа которых до конца не изучена.

Во **второй главе** обозначены задачи экспериментальных исследований, и дано описание экспериментальной установки. Приведены разработанные методики подготовки насыпной модели пласта, подготовки бинарной гомогенной углеводородной смеси и методика проведения экспериментов.

Схема экспериментального стенда «Пласт-2» показана на рисунке 1. Оборудование стенда позволяет моделировать процесс фильтрации углеводородных смесей при натуральных пластовых условиях — давление до 28 МПа. В процессе модернизации стенда существенно увеличено предельное время одного эксперимента для возможности исследований неустойчивых режимов фильтрации, и обеспечен контроль состава смеси во время эксперимента. Модель пласта представляла собой сварную конструкцию, состоящую из 8 тройников, изготовленных из кубов с ребром 15 мм (рисунок 2).

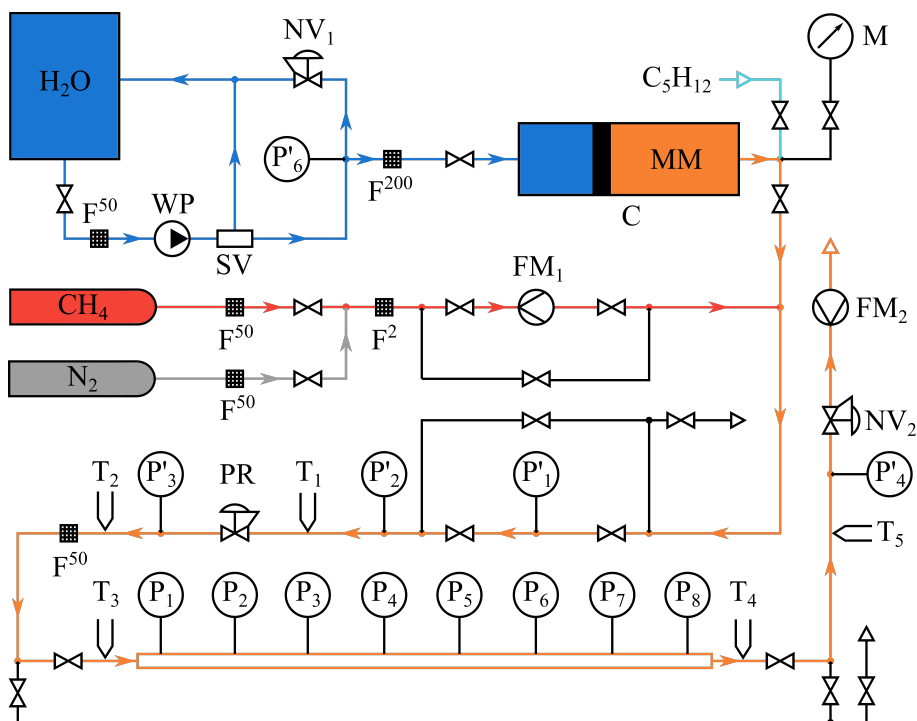


Рис. 1 — Схема экспериментального стенда «Пласт-2»: H_2O — бак с дистиллированной водой; CH_4 — баллон с метаном; N_2 — баллон с азотом; C_5H_{12} — линия подачи н-пентана; WP — насос; SV — предохранительный клапан; NV₁, NV₂ — игольчатые вентили; F², F⁵⁰, F²⁰⁰ — фильтры 2 мкм, 50 мкм, 200 мкм; P₁–P₈, P₁'–P₅' — датчики давления; T₁–T₄ — термодатчики; PR — редуктор давления; FM₁, FM₂ — расходомеры

Тройники были соединены отрезками трубы из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т внутренним диаметром 6 мм, толщиной стенки

1 мм. Длина экспериментального участка составляла 3000 мм. На каждый тройник был установлен мембранный датчик давления, соединенный с контроллером. Экспериментальный участок заполнялся кварцевым песком, просеянным на ситах с ячейкой размером 50 мкм на вибростенде. Массовый расход модельной смеси на выходе из экспериментального участка регистрировался расходомером кориолисова типа.

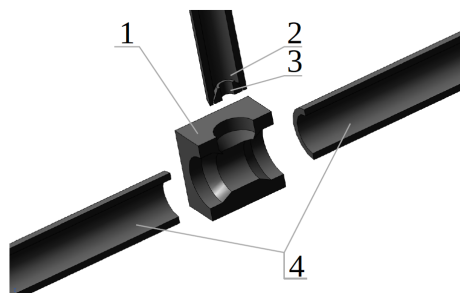


Рис. 2 — Конфигурация узлового элемента экспериментального участка в разрезе: 1 — тройник; 2 — патрубок, ведущий к датчику давления, 3 — кольцо, на которое крепится сетка; 4 — цилиндрические секции экспериментального участка

Коэффициент проницаемости определялся на основании экспериментальных данных по расходу рабочего тела (метан и азот) при термобарических условиях, при которых происходила фильтрация газа. Значение коэффициента проницаемости составило $(1 \pm 0,1) \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$.

В связи с тем, что процесс взаимной диффузии компонентов протекает очень медленно, для гомогенизации смеси углеводородов, подаваемых на вход экспериментального участка, было разработано специальное перемешивающее устройство и методика заполнения цилиндров высокого давления и контроля состава смеси. Время процесса составляло до 2-х суток.

Данные, поступающие с датчиков давления, расходомера и термопар, выводились на экран персонального компьютера в реальном времени, одновременно шла запись данных в запоминающее устройство. Принципиальная схема измерений приведена на рисунке 3.

Для анализа состава модельной смеси использовался предварительно отградуированный хроматограф типа 490 Micro GC с двумя измерительными каналами, в состав каждого из которых входили регулятор расхода газа, инжектор, аналитическая колонка и детектор по теплопроводности.

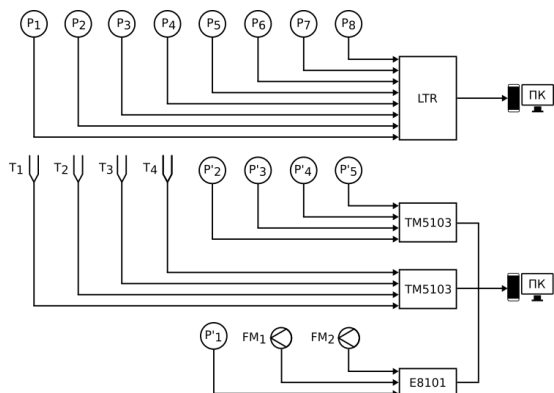


Рис. 3 — Принципиальная схема измерений

Предельно возможная продолжительность эксперимента на модернизированном стенде «Пласт-2» — 6 ч.

В **третьей главе** представлено описание математической модели процесса фильтрации. За основу принята математическая модель, описывающая одномерное нестационарное течение двухфазной смеси в пористой среде в изотермических условиях в предположении равенства давления в фазах и при условии фазового равновесия и химической нейтральности компонентов [3; 4].

Система уравнений фильтрации состоит из уравнений сохранения массы для каждого компонента, записанных относительно молярных плотностей:

$$m \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_j n_{ij} \rho_j^m s_j \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_j n_{ij} \rho_j^m u_j \right) = 0$$

и уравнения сохранения импульса в приближении закона Дарси:

$$u_j = -K \frac{k_j(s_j)}{\eta_j} \frac{\partial p}{\partial x},$$

где m — пористость; индекс i соответствует компоненту; индекс j соответствует фазе (1 — газ, 2 — жидкость); n_{ij} — мольная доля i -го компонента в j -й фазе двухфазной смеси; ρ_j^m — молярная плотность j -й фазы; s_j — объемная доля j -й фазы в смеси; u_j — скорость j -й фазы; t — время; x — координата, K — коэффициент абсолютной проницаемости; η_j — коэффициент динамической вязкости j -й фазы; p — давление; k_j — функция относительной фазовой проницаемости j -й фазы.

В соответствии с условиями расчетов и экспериментов среднее значение числа Re для газовой фазы составляет порядка 10^{-2} , что не выходит за верхнюю границу применимости закона Дарси.

Для расчета свойств паровой и жидкой фаз использовалось обобщенное кубическое четырехкоэффициентное уравнение состояния вандер-ваальсового типа для коэффициентов сжимаемости, разработанное специально для природных нефтегазоконденсатных смесей [5]. В связи с малостью капиллярного давления по сравнению с рабочим давлением поправка на капиллярное давление не учитывалась. Концентрации компонентов в равновесных фазах рассчитывались исходя из фундаментального положения термодинамики о равенстве летучестей компонентов смеси в сосуществующих фазах. Оценки показали, что скорость газовой фазы меняется от 10^{-3} м/с в начале режима до 10^{-6} м/с в установившемся режиме. При том, что порядок скорости капиллярной пропитки составляет 10^{-3} — 10^{-4} м/с, можно считать процессы фазовых переходов равновесными. Динамическая вязкость фаз модельной смеси рассчитывалась с помощью

метода Лоренца-Брея-Кларка. Для моделирование функций относительной фазовой проницаемости использованы известные соотношения Чэнь Чжун-сяна [6]:

$$k_1 = \begin{cases} 0, s \leq a_1 \\ ((s - a_1)/(1 - a_1))^{b_1} (4 - 3s), s > a_1 \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} 0, s \geq a_2 \\ ((a_2 - s)/(a_2))^{b_2}, s < a_2 \end{cases}$$

где a_1 — газонасыщенность, ниже которой проницаемость газовой фазы становится равной нулю; a_2 — газонасыщенность, выше которой проницаемость жидкой фазы становится равной нулю; b_1, b_2 — показатели степени, определяющие вид функций фазовых проницаемостей газовой и жидкой фаз, соответственно.

Зависимость функций относительной фазовой проницаемости от газонасыщенности приведена на рисунке 4.

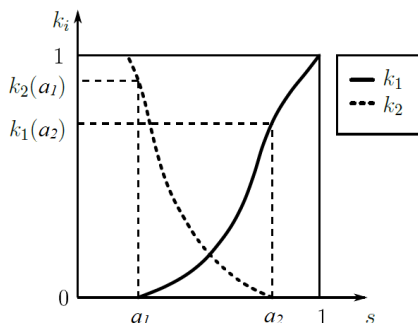


Рис. 4 — Графики зависимости относительных проницаемостей от газонасыщенности [6]

Программа расчета фазовых равновесий многокомпонентной углеводородной смеси с включениями азота, сероводорода и диоксида углерода реализована в среде программирования C#. Для численного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений использован метод конечных разностей Адамса, реализованный в программном модуле DIFSUB. Программные модули разработаны в среде программирования FORTRAN (Fortran

PowerStation 4).

Разработанная модель была верифицирована по результатам расчетных и экспериментальных исследований, выполненных в Стэнфордском университете (США) на бинарной смеси «метан–н-бутан» [7]. Результаты сравнительных расчетов распределения мольной доли н-бутана в газовой фазе и влагонасыщенности по длине модели в установившемся режиме представлены на рисунке 5.

В **четвертой главе** приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований процесса двухфазной изотермической фильтрации бинарной углеводородной смеси «метан–н-пентан». Численные эксперименты проводились с целью расчета

параметров (состава смеси, перепада давления на участке, вида функции относительной фазовой проницаемости), определяющих область неустойчивого течения смеси, при условиях, соответствующих условиям экспериментов на фильтрационном стенде «Пласт-2». Кроме того, рассчитывались характеристики течения (состав фаз, распределение давления, газонасыщенность, локальная концентрация смеси), позволяющие объяснить физическую картину поведения углеводородной смеси в процессе депрессии давления и при термодинамических параметрах, соответствующих нахождению двухфазной смеси в ретроградной области фазовой диаграммы.

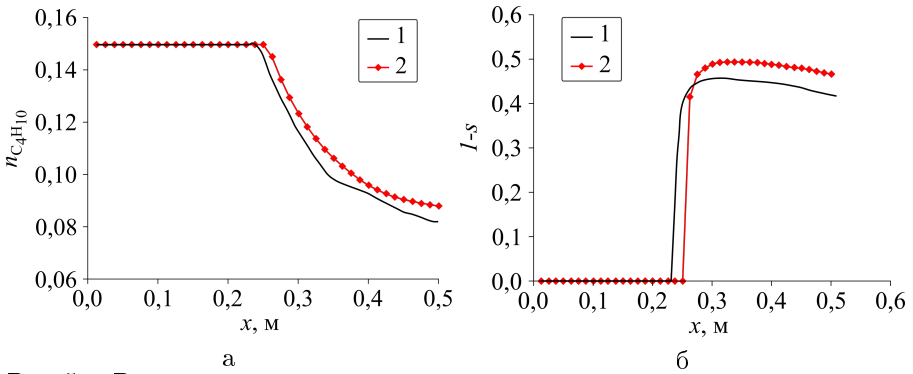


Рис. 5 — Результаты сравнительных расчетов распределения мольной доли н-бутана в газовой фазе (а) и влагонасыщенности (б) по длине модели: 1 — результаты работы [7], 2 — результаты моделирования

Численные эксперименты проводились при трех значениях мольной концентрации метана в исходной смеси: 0,9, 0,85 и 0,75. Первые два значения соответствовали ретроградной области фазовой диаграммы, последнее — области прямого испарения. Моделирование осуществлялось при постоянном давлении на выходе из участка, обеспечиваемым идеальным регулятором давления «до себя», и с регулирующим вентилем на выходе из модели.

На рисунке 6 представлены результаты расчетов массового расхода отдельных фаз и смеси при неустойчивых режимах фильтрации. Здесь и далее G_g обозначает массовый расход газовой фазы, G_L — массовый расход жидкой фазы, $G_g + G_L$ — суммарный массовый расход фаз.

При значении мольной концентрации метана в исходной смеси 0,9 после того, как влагонасыщенность превысила порог текучести ($t \approx 190$ с), возникли колебания массового расхода фаз с периодом колебаний около 80 с, которые затухали через 500 – 600 с (рисунок 6а). При значении мольной концентрации метана 0,85 после превышения порога текучести

жидкости ($t \approx 170$ с) возникли устойчивые периодические колебания, период которых составил около 80 с.

При мольной концентрации метана 0,75, при которой смесь «метан—н-пентан» находится вне области ретроградной концентрации, наблюдался устойчивый режим, колебания расхода отсутствовали (рисунок 7).

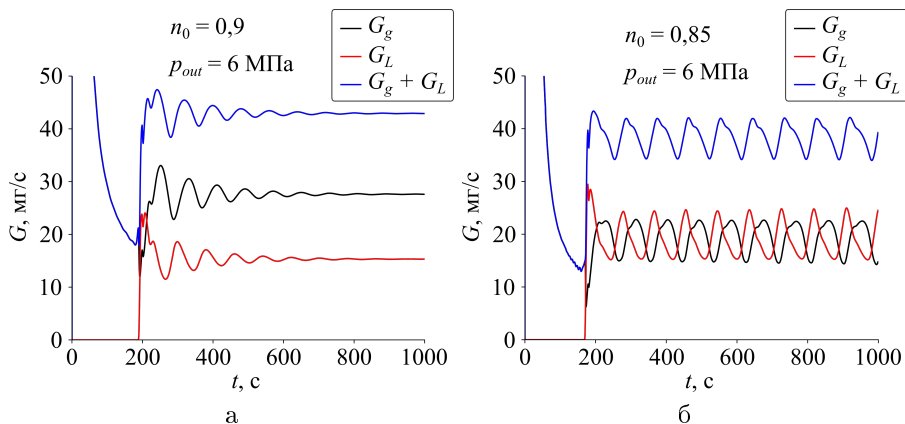


Рис. 6 — Нестационарные режимы фильтрации: а — затухающие колебания массового расхода; б — автоколебания массового расхода

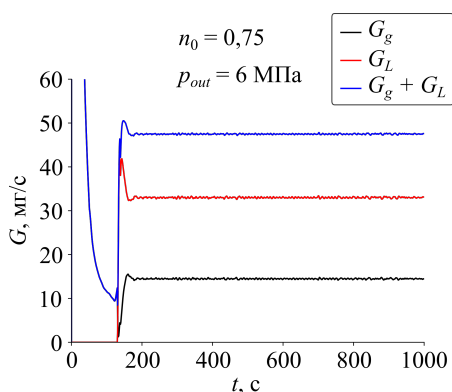


Рис. 7 — Зависимость массового расхода от времени при составе углеводородной смеси, соответствующей области прямого испарения

Характер изменения давления во времени при автоколебательном режиме фильтрации иллюстрирует рисунок 8а. Сечения, в которых показано изменение давления, соответствуют расположению датчиков давления на экспериментальном участке стенда «Пласт-2».

На характер течения двухфазной смеси большое влияние оказывает вид функций фазовой проницаемости. Результаты расчета режима с пределом текучести жидкой фазы $a_2 = 0,6$ и концентрацией метана в смеси на входе в участок 0,85 представлены на рисунке 8б.

Давление на входе в участок составляло 20 МПа, на выходе — 6 МПа. Так же, как и в режиме с пределом текучести жидкой фазы $a_2 = 0,8$ (рисунок 6), до момента времени 1500 с режим течения носил автоколебательный характер, но с существенно меньшей амплитудой колебаний расхода и меньшим периодом

колебаний (рисунок 8б). Далее характер режима кардинально изменился с автоколебательного на режим с полной периодической блокировкой расхода (образование «конденсатных пробок»). При этом период колебаний массового расхода составил 250 с в начале режима и увеличился до 500 с в установившемся режиме.

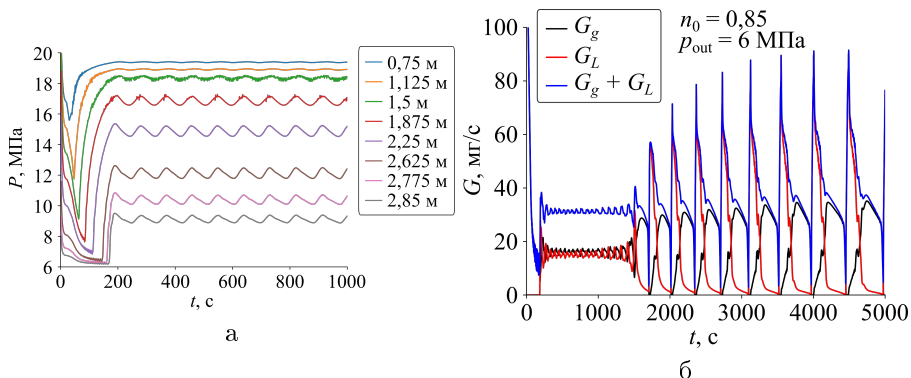


Рис. 8 — Нестационарные режимы фильтрации: а — характер изменения давления во времени в различных сечениях модели пласта; б — характер изменения массового расхода при пределе текучести жидкой фазы 0,6

Результаты численных исследований легли в основу экспериментов на стенде «Пласт-2». Целью экспериментальных исследований было изучение особенностей изотермической фильтрации бинарной смеси «метан- n -пентан» при параметрах (состав, перепад давления, температура), обеспечивающих нахождение смеси в области ретроградной конденсации исследуемого флюида, и определение условий возникновения неустойчивых режимов фильтрации.

Условия экспериментов представлены в таблице 1.

Результаты экспериментов приведены на рисунках 9–11.

В серии режимов 1, представленной на рисунке 9, наблюдались быстро затухающие колебания массового расхода, амплитуда и продолжительность которых увеличивались по мере увеличения перепада давления на экспериментальном участке.

Серии 2 и 3 (рисунки 10 и 11 соответственно) характеризуются практически идентичными параметрами смеси на входе в экспериментальный участок, но различным давлением на выходе. При относительно малом перепаде давления (6,5 МПа, режим 2-1, таблица 1) колебаний не происходило. При больших перепадах (режимы 2-2, 2-3) после возмущений, вызванных скачкообразным изменением давления на выходе из участка, наблюдались затухающие колебания, причем с увеличением перепада

давления время релаксации увеличивалось. При достижении перепада давления 10,0 МПа и более (серия 3) течение смеси переходило в неустойчивый режим автоколебаний с периодом порядка 100 с.

Таблица 1 — Условия экспериментов

Номер режима	n_{CH_4}	T , К	p_{in} , МПа	p_{out} , МПа
1-1	0,9	294	20,0	13,0
1-2	0,9	294	20,0	12,0
1-3	0,9	294	20,0	8,5
2-1	0,85	294	20,0	13,5
2-2	0,85	294	20,0	12,5
2-3	0,85	294	20,0	11,5
3-1	0,85	293	21,0	10,0
3-2	0,85	293	20,5	7,5
4-1	0,7	294	20,0	9,5
4-2	0,7	294	20,0	6,2
4-3	0,7	294	20,0	16,5
4-4	0,7	294	20,0	10,5

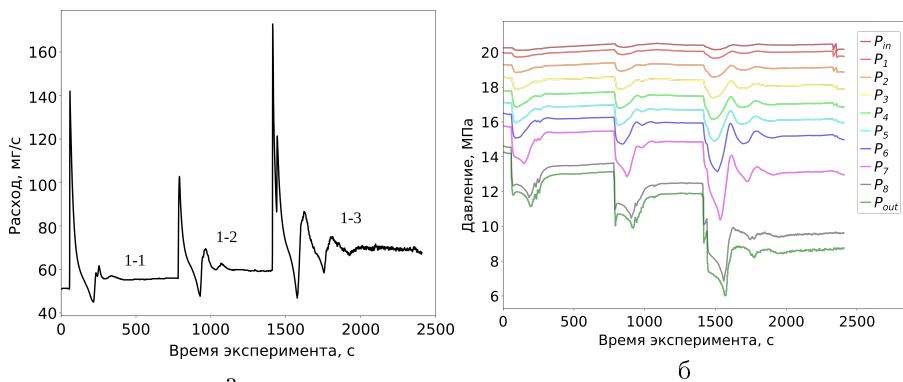


Рис. 9 — Серия режимов фильтрации 1: а — массовый расход модельной смеси; б — распределение давления по длине экспериментального участка

Максимальное изменение давления наблюдалось в области максимальных градиентов давления на последней трети длины экспериментального участка и составило порядка 1,0 МПа. В результате Фурье-анализа осцилляций расхода смеси в серии 3 период колебаний первой гармоники для эксперимента 3-1 ($\Delta p=11,0$ МПа) составил 91 с, для эксперимента 3-2 ($\Delta p=13,0$ МПа) — 111,2 с.

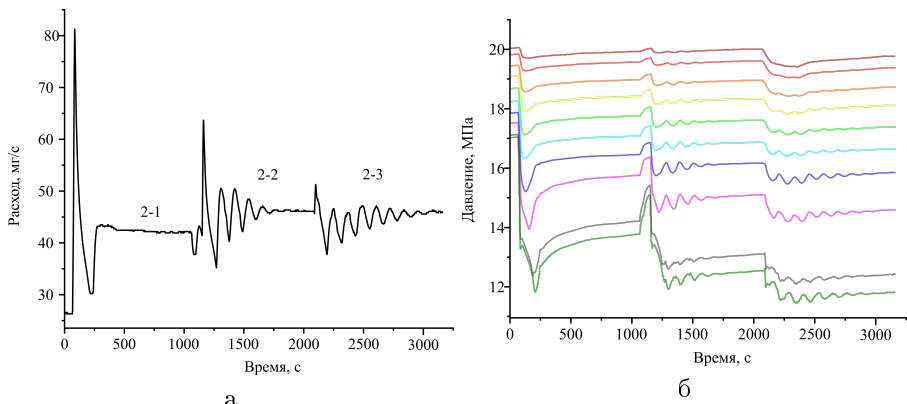


Рис. 10 — Серия режимов фильтрации 2: а — массовый расход модельной смеси; б — распределение давления по длине экспериментального участка

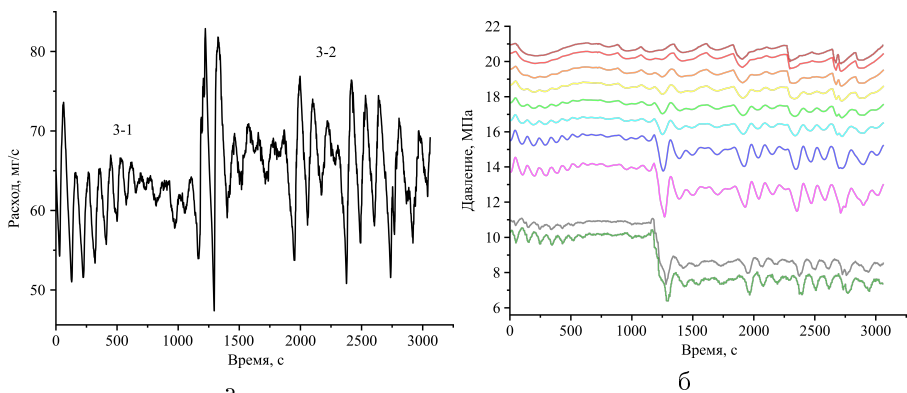


Рис. 11 — Серия режимов фильтрации 3: а — массовый расход модельной смеси; б — распределение давления по длине экспериментального участка

Как видно из рисунка 12 в серии 4 при составе смеси на входе в экспериментальный участок, соответствующим области прямого испарения фазовой диаграммы, процесс течения носит монотонный характер и пульсаций расхода и давления не наблюдается.

В процессе эксперимента на выходе из модели пласта было отобрано четыре пробы в моменты времени $t_1 = 800$ с, $t_2 = 1225$ с, $t_3 = 1270$ с и $t_4 = 1315$ с (рисунок 13). Время t_1 соответствует стационарному режиму фильтрации, время t_2 — минимальному значению расхода при нестационарном режиме, время t_3 — максимальному значению расхода, t_4 — среднему значению расхода.

Полученные результаты показывают, что при стационарном режиме течения интегральный состав модельной смеси не изменяется после фильтрации через пористую засыпку. Однако в случае нестационарного режима изменение состава углеводородного флюида может быть существенным. Минимальное значение расхода модельной смеси соответствует максимальному содержанию метана, то есть в пористой засыпке происходит процесс накопления жидкости. После того, как фронт жидкости дойдет до выхода из модели пласта, доля пентана в смеси резко возрастает, расход достигает максимального значения, и опять начинается процесс накопления конденсата, вызывающий уменьшение интегрального расхода.

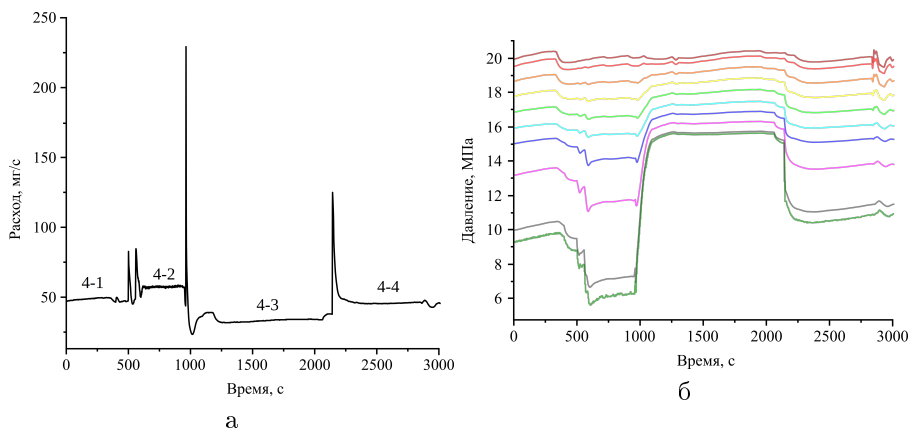


Рис. 12 — Серия режимов фильтрации 4: а — массовый расход модельной смеси; б — распределение давления по длине экспериментального участка

Состав модельной смеси при среднем значении расхода соответствует составу исходной смеси. При достаточно большом перепаде давления и при условии, что состав исходной смеси обеспечивает нахождение флюида в регроградной области фазовой диаграммы на значительном протяжении экспериментального участка, циклическое изменение состояния смеси в экспериментальном участке приводит к незатухающим колебаниям расхода и давления.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов показывает,

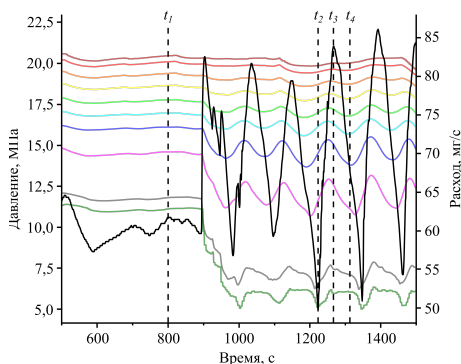


Рис. 13 — Графики зависимости изменения давления и расхода во времени в течение эксперимента

что имеется удовлетворительное качественное соответствие поведения расчетных и экспериментальных кривых давления и массового расхода смеси «метан–н-пентан» при сходных условиях фильтрации. При мольной концентрации метана, соответствующей ретроградной области фазовой диаграммы, и значительной разнице между давлением максимальной конденсации и давлением на выходе из модели пласта, и в экспериментах, и в численных расчетах наблюдаются автоколебательные режимы течения со значениями периода колебаний массового расхода 85 – 100 с. Результаты численных и физических экспериментов показали, что если состав смеси на входе в модель пласта соответствует области прямого испарения фазовой диаграммы, в достаточно широком диапазоне изменения давления на выходе из модели пласта характер течения устойчивый.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Созданный на базе стенда «Пласт» экспериментальный стенд «Пласт-2» позволил значительно увеличить ресурс времени одного эксперимента (до 6 ч), обеспечена возможность исследования неустойчивых режимов фильтрации и контроля состава смеси в процессе эксперимента. Разработано программное обеспечение для архивации и визуализации основных параметров эксперимента в режиме реального времени.
2. Разработана и опробирована методика гомогенизации модельной бинарной углеводородной системы с использованием перемешивающего устройства, позволяющая за разумное время (1–2 суток) приготовить гомогенную бинарную смесь углеводородов в цилиндрах высокого давления (более 20 МПа).
3. Получены результаты экспериментальных исследований процессов фильтрации модельной смеси «метан–н-пентан» в насыпной модели газоконденсатного пласта. Определены условия возникновения автоколебательных режимов течения и получены хроматограммы смеси на выходе из экспериментального участка в различные фазы колебаний массового расхода.
4. На основе четырехкоэффициентного уравнения состояния вандер-ваальсового типа разработана программа расчета фазового состояния и теплофизических свойств многокомпонентной углеводородной смеси с включениями азота, сероводорода и диоксида углерода.
5. Доработаны математическая модель и программа расчета процесса изотермической двухфазной фильтрации бинарной углеводородной смеси с фазовыми переходами; в численных экспериментах определены условия возникновения неустойчивых режимов течения, в т.ч. режимов с периодической блокировкой расхода модельной смеси «метан–н-пентан».

**Публикации в журналах из перечня ВАК и изданиях,
индексируемых в библиографической базе данных Scopus**

1. Качалов, В. В. Газоконденсатная залежь как колебательная система осцилляторного типа. [Текст] / В. В. Качалов, И. Л. Майков, Д. А. Молчанов, В. М. Торчинский // Вести газовой науки. — 2014. — Т. 18, № 2. — С. 106–112.
2. *Kachalov, V. V.* Features of saturates mixture filtration in porous medium. [Текст] / V. V. Kachalov, I. L. Maikov, D. A. Molchanov, V. M. Torchinsky, V. M. Zaichenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012108.
3. *Зайченко, В. М.* Моделирование воздействия детонационных волн на имитатор газоконденсатного пласта. [Текст] / В. М. Зайченко, Д. А. Молчанов, В. М. Торчинский // Бурение и Нефть. — 2016. — Т. 11. — С. 26–30.
4. *Zaichenko, V. M.* Experimental study of two-phase filtration regimes of methane–n-pentane mixture. [Текст] / V. M. Zaichenko, D. A. Molchanov, V. M. Torchinskiy // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012042.
5. *Kachalov, V. V.* Mathematical modeling of gas-condensate mixture filtration in porous media taking into account non-equilibrium of phase transition. [Текст] / V. V. Kachalov, D. A. Molchanov, V. N. Sokotushchenko, V. M. Zaichenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012043.
6. *Григорьев, Б. А.* Математическое моделирование процессов изотермической фильтрации газоконденсатной смеси при различных режимах течения. [Текст] / Б. А. Григорьев, В. М. Зайченко, Д. А. Молчанов, В. Н. Сокотущенко // Вести газовой науки. — 2016. — Т. 28, № 4. — С. 37–40.
7. *Батенин, В. М.* Двухфазная фильтрация многокомпонентных смесей с ретроградной областью фазовой диаграммы. [Текст] / В. М. Батенин, В. М. Зайченко, Д. А. Молчанов, В. М. Торчинский // Доклады Академии Наук. — 2017. — Т. 472, № 5. — С. 1–3.
8. *Molchanov, D. A.* The calculation of the phase equilibrium of the multicomponent hydrocarbon systems. [Текст] / D. A. Molchanov // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946. — P. 012114.
9. *Molchanov, D. A.* Simulation of the filtration process of hydrocarbon binary fluid with retrograde properties. [Текст] / D. A. Molchanov // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1556. — P. 012058.

Список использованной литературы

1. *Тер-Саркисов, Р. М.* Разработка месторождений природных газов [Текст] / Р. М. Тер-Саркисов. — М. : «Недра», 1999. — 659 с.
2. *Украинский, Л. Е.* Влияние волнового воздействия на фильтрационное течение углеводородов в газоконденсатных пластах при наличии ретроградной конденсации. [Текст] / Л. Е. Украинский, В. М. Зайченко, О. Р. Ганиев, А. В. Савенков // Теплофизика высоких температур. — 2011. — Т. 49, № 1. — С. 122—125.
3. *Зайченко, В. М.* Особенности фильтрации углеводородных смесей в пористых средах. [Текст] / В. М. Зайченко, И. Л. Майков, В. М. Торчинский // Теплофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51, № 6. — С. 855—863.
4. *Zaichenko, V. M.* Experimental study of two-phase filtration regimes of methane-n-pentane mixture. [Текст] / V. M. Zaichenko, D. A. Molchanov, V. M. Torchinskiy // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012042.
5. *Брусиловский, А. И.* Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа [Текст] / А. И. Брусиловский. — М. : «Грааль», 2002. — 575 с.
6. *Чарный, И. А.* Подземная гидродинамика. [Текст] / И. А. Чарный. — М. : Гос. научн. техн. изд-во нефтяной и горнотопливной литературы, 1963.
7. *Vo, H. X.* Experimental Study of Composition Variation During Flow of Gas-Condensate [Текст] / H. X. Vo, R. N. Horne // SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, Texas, USA, 28–30 September 2015. — 2015. — SPE-175011—MS. — P. 1—19.

Молчанов Дмитрий Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВУХФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60×84/16
Печать офсетная	Уч. изд. л.	Усл. печ. л. 1,0
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

ОИВТ РАН, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2