

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Молчанова Дмитрия Анатольевича

«Исследование процессов двухфазной фильтрации смеси углеводородов в пористой среде с учетом фазовых переходов» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Молчанова Д.А. посвящена расчетному и экспериментальному изучению особенностей фильтрации двухфазной смеси углеводородов в мелкопористой среде при высоких давлениях. Исследования подобных процессов важны при решении различных задач подземной гидродинамики: фильтрация нефтегазовых, газоконденсатных смесей, технологии вытеснения углеводородов водой и газовыми компонентами, использование геотермальных вод. Решаемая в диссертации задача усложнена особенностями поведения смеси газов при высоких давлениях и трудностями технической реализации фильтрационных экспериментов.

### **Содержание работы**

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

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, обозначены цель и задачи работы, отмечена научная новизна, практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

**В первой главе** приведен обзор научной литературы по теме исследования. Описаны особенности фазового состояния газоконденсатных флюидов, указаны причины снижения продуктивности газоконденсатных скважин, особое внимание уделено явлению ретроградной конденсации флюида газоконденсатных месторождений. Отмечены различия относительных фазовых проницаемостей газовой и жидкой фаз в зависимости от газонасыщенности породы, приведена схема «динамической конденсации» газоконденсатной смеси в призабойной зоне скважины. Описано большое количество способов моделирования фазового состояния газоконденсатных систем, обосновано использование кубического уравнения состояния для расчета теплофизических свойств модельной смеси. Показаны



сложности, возникающие при расчете фазового состояния вещества при переходе из газового в газоконденсатное состояние. Приведен обзор работ, посвященных фильтрации газоконденсатных смесей. Отмечается, что в ряде работ исследовались неустойчивые режимы фильтрации, но механизм их возникновения до конца не изучен.

**Во второй главе** приведено описание экспериментального стенда «Пласт-2» (модернизированного стенда «Пласт») и методик подготовки и проведения эксперимента: методики измерения коэффициента проницаемости засыпки экспериментального участка, методики гомогенизации модельной смеси. Представлены средства измерений и содержание основных этапов проведения экспериментальных исследований.

**Третья глава** посвящена описанию математической модели процесса одномерной изотермической двухфазной фильтрации. Приведены основные уравнения и обоснованы допущения модели. Представлен метод расчета теплофизических свойств исследуемого флюида и состава равновесных фаз. Приведено описание численных методов расчета фазового состава бинарной смеси и решения системы дифференциальных уравнений сохранения. Показаны результаты верификации математической модели по данным экспериментов и независимых расчетов.

**В четвертой главе** представлены результаты математического моделирования процесса двухфазной фильтрации модельной смеси и результаты экспериментальных исследований. Приведены условия, при которых возможно возникновение неустойчивых режимов фильтрации, в том числе автоколебательных и режимов с периодической блокировкой расхода. Представлены результаты измерений состава модельной смеси «метан–н-пентан» на выходе из экспериментального участка в различные фазы колебаний массового расхода, показано изменение соотношения компонентов смеси при накоплении жидкости в пористой засыпке модели пласта и последующего ее выхода. Отмечено качественное согласие результатов экспериментов и численного моделирования. Дан анализ физических процессов, обуславливающих возникновение неустойчивых режимов фильтрации.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационном исследовании.



Содержание работы полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы как по формуле – «область естественных наук, изучающая на основе идей и подходов кинетической теории и механики сплошной среды процессы и явления, сопровождающие течения однородных и многофазных сред...», так и по области исследований (пункт 7) – «фильтрация жидкостей и газов в пористых средах».

### **Научная новизна**

В экспериментах подтверждено возникновение режимов течения двухфазной среды «метан–н-пентан» в виде затухающих и установившихся во времени колебаний расхода протекающей смеси в модели пласта. Показано, что колебания вызваны периодической конденсацией части смеси и увеличением гидравлического сопротивления по тракту ее течения. Определены параметры смеси от которых зависит возникновение режима установившихся колебаний расхода.

В результате численных экспериментов определены области параметров, при которых возможно возникновение установившихся колеблющихся режимов течения бинарной модельной газоконденсатной смеси «метан–н-пентан». Полученные результаты эксперимента подтверждают результаты, полученные численным моделированием.

### **Практическая значимость**

Автором теоретически и экспериментально показана возможность существования неустойчивых режимов фильтрации модельной газоконденсатной смеси. Полученные данные могут быть использованы при разработке новых методов воздействия на газоконденсатные пласты в ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина», ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБУН ОИВТ РАН, ООО Газпром ВНИИГАЗ.

По материалам работы автором опубликовано 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 5 – в статьях, индексируемых в библиографической базе данных Scopus. Автором получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

### **Замечания и вопросы по диссертации**

1. В работе указана приборная погрешность измерительных средств, оценена погрешность других физических величин, полученных косвенным путем. На



странице 76 определена относительная погрешность коэффициента проницаемости от 10 до 30 %, что является хорошим результатом, учитывая сложность эксперимента. Однако не указана методика оценки погрешности.

2. На странице 75 указано, что осуществлялось вакуумирование экспериментального участка перед началом экспериментов. Учитывая возможную подвижность засыпки, ее фильтрационные свойства могли меняться. Каким образом контролировалась величина коэффициента проницаемости экспериментального участка в ходе всех экспериментов?

3. На страницах 85 – 87 указано, что давление смеси поддерживалось постоянным на входе в экспериментальный участок. Но не ясно, поддерживалась ли постоянной температура?

4. На странице 90 записано уравнение сохранения импульса в виде одномерного закона Дарси, однако не указана область применения такой формы.

5. На страницах 96-99 показаны схема дискретизации и трехточечная центрально-разностная аппроксимация уравнений фильтрации по оси  $x$ . Но не показана схема аппроксимации во времени.

6. На странице 99 указано, что использован программный модуль «DIFSUB», решающий дифференциальные уравнения методом Адамса. Но в тексте нет пояснений о том, какой применен порядок метода, к какой из осей он применен и оценена ли погрешность решения.

7. На странице 101 представлена блок-схема пакета программ. Из нее не ясно, при положительном результате работы второго блока сравнения происходит переход в результат работы пятого блока сравнения или в точку перед блоком «DIFSUB». Похожая ситуация возникает с четвертым блоком сравнения.

8. Удалось ли выделить область существования автоколебательных режимов фильтрации без конденсатных «пробок» в зависимости от режимных параметров?

Отмеченные замечания не снижают высокий уровень работы.

### **Заключение по работе**

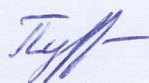
Диссертация Молчанова Д.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком научном уровне. Полученные результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Основные



результаты работы в полной мере отражены в автореферате и публикациях автора. Работа полностью соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Молчанов Дмитрий Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составил доцент кафедры Тепломассообменных процессов и установок ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", к.т.н. Пурдин Михаил Сергеевич.

Оппонент



Пурдин Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры Тепломассообменных процессов и установок Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ",  
г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1,  
тел.: 8 (495) 362-70-40, [PurdinMS@mpei.ru](mailto:PurdinMS@mpei.ru).

Подпись доцента Пурдина М.С. заверяю:



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ",  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1,  
тел. (495) 362-7001, [mpei.ru](mailto:mpei.ru), [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru).