

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Скрылёвой Евгении Игоревны
на тему: «Исследование влияния неустойчивости Саффмана- Тейлора,
капиллярных эффектов и химических взаимодействий между фазами на
процесс вытеснения вязкой жидкости из пористой среды»
по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Ухудшение структуры запасов углеводородов, снижение запасов нефти, извлечение которой не требует значительных экономических затрат, приводит к необходимости применения методов увеличения нефтеотдачи, а также к вовлечению в разработку нетрадиционных месторождений углеводородов. Диссертация Скрылевой Е.И. посвящена вопросам математического моделирования многофазной фильтрации разновязких жидкостей в пористой среде. Рассматриваемые процессы происходят в ходе заводнения месторождений нефти для поддержания пластового давления, при проведении гидроразрыва пласта. Несмотря на то, что возникающая неустойчивость фронта заводнения была обнаружена несколько десятилетий назад, целый ряд вопросов остаются нерешенными, что приводит к раннему прорыву воды к добывающим скважинам, падению извлекаемости нефти, снижению эффективности мер по интенсификации добычи. К фундаментальным вопросам рассматриваемой темы относится многомасштабность фильтрации, необходимость решать задачи с высоким пространственным разрешением (миллиметры, доли миллиметров) на большом масштабе (сотни метров, километры). До конца неизученными являются вопросы многофазной фильтрации химически реагирующих жидкостей, а также вопросы влияния капиллярных эффектов, изучение которых требует постановки специальных экспериментов в условиях низкой гравитации. Всем вышесказанным обуславливается актуальность темы диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Защищаемые положения, выводы и рекомендации обоснованы путем проведения теоретических и экспериментальных исследований и сопоставления полученных результатов. Предложенные математические модели учитывают капиллярные эффекты, химическое взаимодействие между фазами, неоднородности пористости и проницаемости, а также подсеточную неустойчивость. Теоретические модели валидированы сопоставлением с экспериментальными данными. Крупномасштабное моделирование осуществлялось на основе метода, запатентованного автором диссертации с соавторами.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Основным подтверждением достоверности сделанных выводов служит сопоставление полученных теоретических результатов с данными лабораторных и натурных экспериментов. Достоверность уравнений аналитической модели обусловлена строгим выводом её положений из общих законов и уравнений гидродинамики, физически обоснованных гипотезах и упрощениях. Достоверность результатов лабораторного моделирования подтверждается повторяемостью и воспроизводимостью полученных данных в пределах погрешности лабораторных измерений.

Следующие результаты, полученные в диссертации, представляют особый интерес:

1. Предложены алгоритмы моделирования на макроуровне с учетом процессов фильтрации на микроуровне: неустойчивости фронта вытеснения вязкой жидкости жидкостью с более низкой вязкостью, влияния химического взаимодействия между вытесняющей и вытесняемой жидкостями.

2. Разработана математическая модель капиллярной пропитки пористой среды в условиях низкой гравитации, учитывающая неустойчивость границы раздела фаз.
3. Показана роль инерционных эффектов при течении вязкой жидкости в неоднородной пористой среде.
4. Продемонстрировано, что вследствие неустойчивости фронта вытеснения жидкости гидроразрыва в процессе очистки трещины ГРП возможен прорыв пластовой жидкости, частично блокирующей трещину.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Практическая значимость работы обусловлена её направленностью на решение актуальных задач нефтедобывающей промышленности. Применение модели двухфазного фильтрационного течения, учитывающей влияние капиллярных сил на границах раздела фаз, позволяет более адекватно описывать явления, возникающие при продвижении фронта вытеснения в нефтегазовом коллекторе в процессе его заводнения. Созданные математические модели могут лежать в основу цифровых двойников месторождений, расчёты на основе данных моделей помогут сделать выводы о целесообразности применения тех или иных методов увеличения нефтеотдачи на месторождениях с конкретными характеристиками.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и приложения, объем диссертации 190 страниц, она включает 82 рисунка и 9 таблиц. Список цитируемых научных публикаций содержит 174 наименования.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, рассматриваемой в диссертации, дается характеристика степени разработанности темы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, отражены новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, кратко излагаются методы исследования, приводятся защищаемые положения, обосновывается

достоверность полученных результатов, даются сведения об апробации, основных публикациях автора по теме диссертации, о личном вкладе автора.

После введения следует **Обзор литературы**, в котором автор рассматривает как классические публикации по теме фильтрации жидкости в пористых средах (начиная с работы Дарси 19-го века), так и публикации последних лет, включающие сведения об экспериментальных и теоретических исследованиях, в том числе с применением методов машинного обучения. Автор останавливается на гидродинамических симуляторах – программных средствах, предназначенных для моделирования фильтрации жидкости при разработке месторождений с использованием той или иной расстановки добывающих и закачивающих скважин. Основным выводом данного раздела является необходимость дальнейшего развития моделей с учетом неустойчивости фронта вытеснения на мелком масштабе и химического взаимодействия между фазами.

Первая глава посвящена трехмерному моделированию развития неустойчивости фронта вытеснения жидкостей разной вязкости из пористой среды. Выполнен анализ данных экспериментальных исследований, продемонстрирована возможность определения капиллярных характеристик горных пород и насыщающих жидкостей на основе рассмотренных экспериментов, определены коэффициенты в математических моделях. Предложен метод для расчета площади межфазовых поверхностей при моделировании неустойчивого вытеснения из пористой среды. Проведен расчет эволюции поверхности раздела фаз при различных определяющих параметрах, результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными. Рассмотрена зависимость площади поверхности раздела жидкостей от отношения вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей. Предложен и исследован алгоритм учета мелкомасштабной неустойчивости при расчетах на макроуровне. Проведено математическое моделирование химических взаимодействий в пористой среде с учетом нерегулярности границы контакта между фазами.

Вторая глава представляет результаты исследования влияния капиллярных эффектов на фильтрацию в пористой среде в условиях низкой гравитации. Рассмотрены очень интересные эксперименты в самолете и на околоземной орбите. Разработаны математическая модель и численный алгоритм для моделирования процесса многократной пропитки пористой среды при низкой гравитации. Найдены условия, при которых возникает необходимость учета капиллярных сил.

В третьей главе рассмотрено влияние области повышенной проницаемости (в частности, трещины гидоразрыва пласта) на вытеснение жидкостей разной вязкости. Рассматривается течение двух несжимаемых флюидов в поровом пространстве, проницаемость которого зависит от пространственной координаты. Показано, что в рамках рассмотренной модели наличие трещины ГРП ускоряет извлечение нефти, но при этом суммарный объем добытой нефти не изменяется по сравнению с разработкой без гидоразрыва.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы.

Результаты, приведенные в диссертации, являются новыми, оригинальными и достоверными. Достоверность обеспечивается применением математических моделей, основанных на классических законах фильтрации вязкой жидкости, теории упругости, законах сохранения. Выполнено сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными, сопоставление полученных решений с результатами исследований других авторов. Разработанные в диссертации модели могут быть применены для расчета гидродинамических моделей нефтяных месторождений, разрабатываемых с применением заводнения для поддержания пластового давления и при проведении гидоразрыва пласта..

Результаты работы Скрылевой Е.И. получили апробацию на ряде международных и российских конференций и научных семинарах. На основе проведенных исследований были опубликованы 21 печатная работа, 12 из

которых опубликованы в рейтинговых международных журналах, индексируемых научными базами Web of Science и/или Scopus. Опубликованы 2 главы в монографиях, 1 учебное пособие, получен 1 патент и 2 свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение.

Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, логично структурирована, результаты понятно изложены, рисунки и таблицы наглядно представляют соответствующую им информацию. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы», а именно следующим ее направлениям: реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях; ламинарные и турбулентные течения; течение жидкостей и газов в пористых средах; пограничные слои, слои смешения, течения в следе; точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред; разработка математических методов и моделей гидромеханики. Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает содержание диссертационной работы.

Имеются следующие замечания:

1. Обзор литературы содержит повторение одного предложения на стр.17. В целом обзор желательно заканчивать перечнем тех нерешенных, но актуальных задач, которые будут рассмотрены в диссертации, т.е. постановкой задачи.
2. В главе 1 на страницах 25-30 излагается стандартная теория неустойчивости Саффмана-Тейлора, но без ссылки на первоисточник.
3. На стр.31 упоминается программа, но о какой программе идет речь не говорится.

4. На стр.32 говорится, что жидкости смешивающиеся, но межфазного массообмена нет. Что имеется в виду под термином «смешивающиеся» остается неясным.
5. В тексте встречается термин «антидиффузия», он требует пояснений.
6. Стр.39, рис.1.6а – выход на константу 0,5 желательно пояснить.
7. Стр.42 – сколько поровых объемов было проакачано до установления стабильных показаний перепада давления?
8. Стр.64 – есть ссылка на соотношения 1.6.4, но нет самих соотношений.
9. Стр.65 – «потоки моделируются алгебраически» - непонятное высказывание.
- 10.Стр.87 – «В условиях пониженной гравитации основной движущей силой течения жидкостей становятся капиллярные эффекты» - высказывание выглядит неточным, если есть разница давлений, жидкость будет перемещаться от области высокого давления в область низкого давления.
- 11.Стр.126 – не очень корректное утверждение в п.3 «... жидкость поднимается на большую высоту с каждой последующей параболой», все-таки влияние оказывает не «парабола», а изменение силы тяжести.
- 12.Стр.14-141 «ограничителя потоков по Кузьмину» - хорошо бы добавить ссылку на публикацию.

Высказанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном

университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Скрылев Евгения Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской
академии наук
Турунтаев Сергей Борисович

«26» мая 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-79-39, e-mail: stur@idg.ras.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы
поиска полезных ископаемых»

Адрес места работы:

119334, Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН
Тел.: +7 (495) 939-79-39, e-mail: stur@idg.chph.ras.ru

Подпись директора Института динамики геосфер имени академика
М.А. Садовского РАН С.Б. Турунтаева удостоверяю

ученый секретарь ИДГ РАН,
к.ф.-м.н.

Д.Н. Локтев

«26» мая 2023 г.

