

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»

В диссертации Скрылевой Е.И. исследованы многофазные течения в пористой среде с учётом влияния капиллярного давления и других эффектов. В работе описаны экспериментальные исследования, предложены полуэмпирические математические модели для описания двухфазных и трехфазных фильтрационных течений, приведены результаты численного моделирования развития неустойчивости фронтов вытеснения в пористой среде. Также в работе поднимаются важные вопросы масштабирования (т.е. «апскейлинга») гидродинамической неустойчивости фронтов с малых пространственных масштабов, соответствующих размерам керна, на большие масштабы, соответствующие расстояниям между скважинами.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью развития уточненных методов моделирования фильтрационных потоков. Результаты выполненных диссертантом исследований имеют **прикладное значение**, так как могут быть использованы для уточненного моделирования заводнения нефтяных пластов, характеризующихся высокой вязкостью нефти, и для апскейлинга гидродинамических моделей месторождений.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, трёх глав, заключения, одного приложения и списка литературы.

В **первой главе** диссертации приведены экспериментальные данные о вытеснении нефти водой из образцов некоомских песчаников с различными граничными условиями: постоянным объёмным расходом через образец и постоянным перепадом давления между его границами. Также в этой главе приведены результаты численного моделирования вытеснения нефти в условиях эксперимента. Результаты расчётов сопоставлены с экспериментальными данными, а эмпирические константы, характеризующие в математической модели капиллярные эффекты, подобраны так, чтобы модель описывала эксперимент. Предложен метод подсчёта площади нерегулярной поверхности раздела фаз, чтобы оценить площадь контакта между фазами. Исследовано влияние различных параметров на эволюцию поверхности раздела фаз в условиях развития гидродинамической

неустойчивости. Также в первой главе описан метод многомасштабного моделирования нелинейной стадии развития гидродинамической неустойчивости. Метод заключается в оценке параметров зоны смешения при моделировании на микроуровне (масштаб зерна) и учёте подсеточной неустойчивости при моделировании на макроуровне путём добавления дополнительных членов к уравнениям фильтрации.

Вторая глава посвящена капиллярной пропитке пористой среды в условиях микрогравитации. Описаны эксперименты по многократной пропитке пористой среды во время параболических полётов. В главе представлена полуэмпирическая математическая модель для описания процесса многократной пропитки пористой среды. Модель учитывает гистерезис кривых относительной фазовой проницаемости и капиллярного давления, выражающийся в различном виде этих кривых в условиях пропитки и просушки пористой среды. Показано, что построенная модель позволяет описать эксперименты по многократной пропитке путем подбора соответствующих свободных параметров. Введён параметр, выражающий отношение «характерного времени инерции при фильтрационных процессах» к характерному времени капиллярной пропитки. Показано, что учитывать инерционные эффекты в уравнении баланса импульса необходимо, когда этот параметр превосходит единицу.

Третья глава диссертации посвящена исследованию неустойчивого вытеснения нефти из нефтяного пласта, содержащего трещину гидроразрыва, которая в данной работе моделируется областью повышенной пористости и проницаемости. Показано, что наличие трещины гидроразрыва пласта интенсифицирует нефтедобычу, но не увеличивает коэффициент извлечения нефти. Исследован процесс очистки трещины гидроразрыва пласта.

В **приложении** проводится система основных уравнений, записанная в безразмерном виде. Описаны критерии подобия, характеризующие структуру пористой среды и влияние различных сил на течение.

Обоснованность полученных результатов обусловлена использованием классических уравнений механики сплошной среды и теории фильтрации, корректной постановкой задач, а также применением апробированных численных методов. **Достоверность** результатов подтверждается валидацией путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.

Следует отметить **новизну** полученных результатов, например: впервые с использованием метода, запатентованного диссертантом с соавторами, были разработаны математические модели и алгоритмы моделирования на макроуровне с учётом некоторых процессов на микроуровне, а именно,

неустойчивости, возникающей на фронте вытеснения нефти при заводнении пласта.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 21 научной статье, из них 11 опубликованы в изданиях, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus, RSCI. Также по материалам диссертации получен 1 патент и два свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение.

Можно сформулировать следующие **недостатки работы**:

1. Диссертант не ссылается на значительный объем литературы, в которой тоже исследовалась неустойчивость фронтов вытеснения с учетом влияния капиллярного давления. Например, нет ссылок на работы:

[1] J. Hagoort, "Displacement Stability of Water Drives in Water-Wet Connate-Water-Bearing Reservoirs.," Soc Pet Eng AIME J, vol. 14, no. 1, pp. 63–74, 1974, doi: 10.2118/4268-pa.

[2] A. J. Chorin, "The instability of fronts in a porous medium," Commun. Math. Phys., vol. 91, no. 1, pp. 103–116, 1983, doi: 10.1007/BF01206054.

[3] G. M. Homsy, "Viscous Fingering in Porous Media," Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 19, no. 1, pp. 271–311, Jan. 1987, doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.001415.

[4] A. Riaz and H. A. Tchelepi, "Linear stability analysis of immiscible two-phase flow in porous media with capillary dispersion and density variation," Phys. Fluids, vol. 16, no. 12, pp. 4727–4737, 2004, doi: 10.1063/1.1812511.

[5] A. Riaz and H. A. Tchelepi, "Numerical simulation of immiscible two-phase flow in porous media," Phys. Fluids, vol. 18, no. 1, 2006, doi: 10.1063/1.2166388.

и другие основополагающие и обзорные работы в области гидродинамической устойчивости фронтов вытеснения при несмешивающейся фильтрации. В [1,2] показано, что в случае малого капиллярного давления неустойчивость развивается, если подвижность двухфазной жидкости за фронтом вытеснения меньше, чем перед фронтом. Этот результат противоречит утверждениям в диссертации, где написано, что, если «отношение вязкостей (вытесняемой и вытесняющей фаз) больше единицы, то развивается неустойчивость» (стр.84 и 3-й вывод в Заключение). Это неверное утверждение, так как неустойчивость может развиваться, если отношение подвижностей, а не отношение вязкостей больше единицы. Для двухфазной среды понятие подвижности не эквивалентно понятию вязкости. Рассуждение диссертанта на стр. 28–30 применимы к ячейке Хеле-Шоу, где за фронтом вытеснения происходит однофазное течение, но не для пористой среды, где за фронтом вытеснения происходит двухфазное течение.

2. Диссертант использует рис. 1.20 для обоснования сеточной сходимости численного решения. Однако этот рисунок демонстрирует, что численное решение, полученное на сетке $90 \times 90 \times 90$ ячеек, значительно отличается от решений, полученных на сетках $120 \times 120 \times 120$ и $150 \times 150 \times 150$ ячеек. Соответствующие кривые не лежат близко друг к другу, поэтому полагаясь на рис. 1.20 можно прийти к выводу, что сеточной сходимости решения нет. Как нужно понимать утверждение, что «результат не зависит от разбиения расчётной области»?

3. Почему на рис. 1.35 насыщенность нефти у границы $x=0$ остается равной критической насыщенности, если происходит внутрислоево горение? Казалось бы, из-за выгорания углеводородной фазы насыщенность должна опуститься ниже критического значения.

4. На стр. 135 обсуждаются условия на источнике и стоке. В частности, написано, что на источнике задано давление. Если задача плоская, а источник точечный, то в его малой окрестности распределение давления имеет логарифмическую особенность. В этом случае задание давления в точке не приведет к потоку жидкости из источника. Если источник имеет конечный размер, то тогда его размер будет значительно влиять на параметры вытеснения. Однако размер источника в диссертации не приводится. Таким образом, условия, выставляемые на источнике и стоке, сформулированы нестрого. Как в расчетах учитывались источник и сток и условия, выставляемые на них?

5. Не приводятся значения вязкостей и параметров кривых Кори, при которых проведены расчеты, приводящиеся в разделе 3.3.

6. Есть несоответствие между главами 1 и 2, в которых значительное внимание уделено влиянию капиллярного давления, и главой 3, в которой капиллярное давление положено равным нулю. Почему капиллярное давление полагается равным нулю, если в главах 1 и 2 показано, что оно значительно влияет на параметры вытеснения и устойчивость фронта заводнения?

Имеются **замечания к изложению** диссертационного исследования:

1. Не ясно последнее предложение на стр. 10 автореферата «Производные по времени рассчитывались по явной схеме». Обычно для аппроксимации производной какой-либо величины по времени необходимо использовать значения этой величины на явном и неявном слое конечно-разностной схемы. Как можно аппроксимировать производную по времени, используя значения только с явного слоя?

2. Диссертант использует слова «поток конвекции» (стр. 119; стр. 16 в автореферате). Обычно оперируют понятиями «поток жидкости» или «поток массы». Как в диссертации определяется «поток конвекции»?

3. Необходимо констатировать небрежное оформление текста диссертации. Почти на каждой странице есть орфографические и грамматические ошибки, а также стилистические неточности; на стр.76 дважды приводится одно и то же уравнение для скорости реакции; надписи на многих рисунках (например, 1.31 или 3.3) приводятся на английском языке; подписи к некоторым рисункам приводятся на следующей за рисунком странице; имеется путаница с обозначениями и индексами (например, в уравнении (1.2)).

В качестве **пожеланий к дальнейшим исследованиям** можно отметить, что для практического применения результатов главы 1 нужно развить результаты исследования. Для учета подсеточной неустойчивости фронта вытеснения диссертант предлагает использовать уравнение (1.7.1), в котором последний член дается уравнением (1.8.1) с двумя свободными функциями F и D . Подбирая эти функции (путем многократного расчета локальной задачи) удастся описать параметры макротечения. Однако стандартный подход в нефтяной отрасли предполагает масштабирование (апскейлинг) кривых относительной фазовой проницаемости и капиллярного давления, чтобы они описывали процесс вытеснения на больших масштабах по пространству. В прикладных работах кривые относительной фазовой проницаемости, использующиеся в гидродинамическом моделировании на макромасштабе, часто отличаются от кривых измеренных на микромасштабах в исследованиях керна. Результат главы 1 был бы более ярким, если вместо эмпирических функций F и G параметры макротечения удалось бы охарактеризовать кривыми относительной фазовой проницаемости и капиллярного давления, отличными от полученных в эксперименте. Такой метод апскейлинга кривых с микро- на макро-масштаб будет иметь практическое значение. Чтобы результат главы 1 мог быть использован на практике нужно в будущем предложить способ пересчета значений F и G в функции относительной фазовой проницаемости и капиллярного давления. Тогда эти функции, действительно, можно будет использовать в стандартных пакетах программ для гидродинамического моделирования пластовых систем.

Вместе с тем, указанные 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 Скрылёва Евгения Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

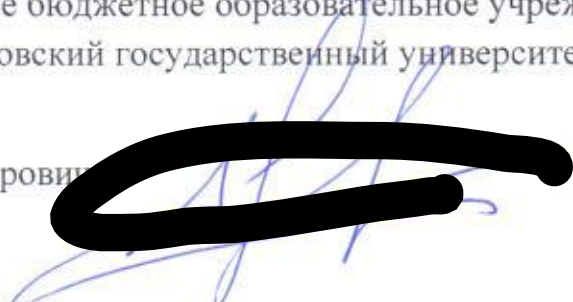
Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,

ведущий научный сотрудник лаборатории общей гидромеханики
научно-исследовательский институт механики,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова»

Афанасьев Андрей Александрович



Контактные данные:

тел.: 8 (495) 939-57-67, e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы:

119192, Москва, Мичуринский пр-т, д.1,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова», научно-исследовательский институт механики,

Тел.: 8 (495) 939-57-67; e-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Подпись ведущего научного сотрудника

НИИ механики А.А.Афанасьева

