

**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 диссертационной работе Скрылевой Е.И. рассматриваются задачи, связанные с неустойчивым вытеснением вязкой жидкости из пористой среды. В работе проводится серия вычислительных экспериментов, моделирующих многофазное просачивание жидкости сквозь пористую среду с учётом различных факторов: мелкомасштабная неустойчивость, развивающаяся на фронте вытеснения, экзотермические химические реакции между фазами, капиллярные эффекты. Результаты численного моделирования сопоставляются с экспериментальными данными.

**Актуальность** темы исследования обосновывается тем, что в работе описываются методы математического моделирования, позволяющие более точно описывать фильтрационные процессы, в том числе учитывать подсеточную неустойчивость. Кроме того, полученные результаты имеют **практическую значимость**. Исследование капиллярной пропитки в условиях микрогравитации могут найти применение в космических технологиях, в то время как исследование фильтрации в условиях земной гравитации могут оказаться полезными при рассмотрении различных методов увеличения нефтеотдачи и выборе оптимальных способов воздействия на пласт.

Материал диссертации Скрылевой Е.И. состоит из введения, обзора литературы, трёх глав, заключения, одного приложения и списка литературы. Каждая глава диссертации является завершённым исследованием, обусловленным общим предметом диссертационного исследования.

**Первая глава** посвящена трехмерному моделированию неустойчивого вытеснения нефти из образца пористой среды. Результаты численного моделирования сопоставляются с данными эксперимента по вытеснению модели нефти из образца неокомского песчаника. В главе предлагается метод многомасштабного моделирования фильтрационных процессов, когда при моделировании на макроуровне учитываются процессы, происходящие на мелком масштабе путём добавления дополнительных потоковых членов в определяющие уравнения. Метод реализован на задаче термогазового воздействия на пласт, когда учёт неустойчивости фронта вытеснения оказывается особенно важным из-за увеличения площади контакта между флюидами, вступающими в химическую реакцию.

Во **второй главе** рассматривается капиллярная пропитка пористой среды в условиях микрогравитации. Приводится описание двух видов экспериментов: пропитка пористой среды сформированной стеклянными шариками во время параболических полётов и пропитка пористой среды на околоземной орбите. Также приводится обработка экспериментальных данных. Для экспериментов во время параболических полётов особое внимание уделяется пористой среде содержащей неоднородности проницаемости. Проведено численное моделирование процесса многократной пропитки пористой среды, когда режим пропитки несколько раз сменяется режимом дренажа, результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными. Исследовано влияние учёта нестационарного члена в уравнении баланса импульса на результаты моделирования. Для математического описания процесса пропитки пористой среды за счёт капиллярного давления в условиях микрогравитации на околоземной орбите предлагается математическая модель с дополнительным потоковым членом в уравнении баланса массы, который отвечает за размытие фронта пропитки за счёт капиллярных сил. Эмпирические константы в математической модели подбираются на основе экспериментальных данных. Предложен

безразмерный критерий, показывающий, в каком случае необходимо учитывать капиллярное давление при моделировании процесса фильтрации за счёт внешнего перепада давления.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию фильтрации в области содержащей зону повышенной пористости и проницаемости. Показано, что наличие около добывающей скважины одной или двух таких зон приводит к интенсификации нефтедобычи. Также в главе приводятся результаты численного моделирования процесса очистки трещины гидроразрыва пласта, которая моделируется диссертантом как зона повышенной пористости и проницаемости. Показано, что в коротких трещинах гидроразрыва процесс очистки идёт быстрее. В случае, когда жидкость гидроразрыва пласта имеет высокую вязкость, прорыв нефти может произойти через скважину и трещина гидроразрыва оказывается не подключенной к процессу добычи.

**Обоснованность и достоверность** полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием основных законов сохранения, корректности постановок задач, применением апробированных численных методов, а также сравнением полученных результатов с экспериментальными данными.

Следует отметить некоторые **новые** результаты, впервые полученные в диссертации. Впервые был разработан способ моделирования процессов фильтрации на макроуровне с учётом возможных процессов на микроуровне, а именно, неустойчивости, возникающей на фронте вытеснения углеводорода из пласта, что оказывает существенное влияние на результат моделирования, особенно при протекании химических реакций, метод был реализован на примере задачи термогазового воздействия на пласт. На основе экспериментального базиса подобраны эмпирические константы для

математических моделей, описывающих неустойчивое многофазное течение в пористой среде. Впервые разработана математическая модель, описывающая капиллярную пропитку пористой среды в условиях микрогравитации, которая учитывает размытие фронта вытеснения не только за счет диффузии и дисперсии, но и за счёт неустойчивости поверхности раздела фаз.

Основные результаты, представленные в диссертации, изложены в 21 научной статье, из них 11 опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus, RSCI. Также по материалам диссертации опубликованы 2 главы в монографиях, 1 учебное пособие, получен 1 патент и 2 свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение.

По работе имеются следующие замечания:

1. В разделе 1 изучается численно развитие неустойчивости Сэффмана-Тейлора при вытеснении жидкостей разной вязкости в пористой среде. При этом на численном решении в силу численной диффузии формируется зона перемешивания, в которой присутствуют обе жидкости и требуется аппроксимировать вязкость смеси в области смешения (это помимо дисперсии, которая может возникать при фильтрации в силу извилистости линий тока в порах). От выбора формулы для аппроксимации вязкости в зоне смешения будет зависеть морфология пальцев (форма и размеры) [см. Boronin, S. A., Osipov, A. A., & Desroches, J. (2015). Displacement of yield-stress fluids in a fracture. *International Journal of Multiphase Flow*, 76, 47-63.]. Подбор такой аппроксимации из условия совпадения с экспериментом в исследовании не проводился.
2. Относительные проницаемости выбраны по формулам, которые в тексте упоминаются как модель Брукса-Кори, но нам представляется

что это просто модель Кори, а модель Брукса-Кори все-таки содержит более сложные выражения.

3. В разделе 3 изучается течение в конфигурации скважина и две двукрылые симметричные трещины ГРП, которые исходят из скважины и находятся под прямым углом друг к другу. Фактически от скважины отходят четыре вертикальных трещины ГРП под углом 45 градусов друг к другу. Такая конфигурация вряд ли возможна в реальности, так как трещина ГРП распространяется вдоль наименьшего главного напряжения в пласте, и, как правило, это единственное направление, то есть в реальности была бы одна двукрылая трещина, не две.
4. На с. 74 указан “метод общего понижающего градиента”, который как правило в литературе называется методом градиентного спуска.
5. Для результатов, представленных в разделе 1.6, желательно было бы представить некоторые метрики, которые показали бы качество аппроксимации.


Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и являются скорее рекомендациями, а также уточнениями по области применения полученных решений. 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 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,  
профессор, директор проектного центра по энергопереходу и ESG,  
автономная некоммерческая образовательная организация высшего  
образования «Сколковский институт науки и технологий»

Осипцов Андрей Александрович



*подпись*

Дата подписания

26.05.2023

Контактные данные:

тел.: 8 (495) 280-14-81, e-mail: a.osiptsov@skoltech.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защита диссертация:

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы:

121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой  
бульвар, д. 30 стр.1

автономная некоммерческая образовательная организация высшего  
образования «Сколковский институт науки и технологий»

Тел.: +7 (495) 280-14-81; e-mail: inbox@skoltech.ru

Подпись руководителя проектного центра по энергопереходу и ESG  
Сколковского института науки и технологий

А.А. Осиптова удостоверяю:

МЕНЕДЖЕР  
ПО ПЕРСОНАЛУ  
ПОЧЕПЦОВА

