

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Толмачёвой Кристины
Игоревны
на тему: «Развитие многоконтинуальных моделей фильтрации
суспензии»
по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертационная работа Толмачёвой К.И. посвящена построению многоконтинуальных моделей фильтрации суспензии. Учитывается перенос, осаждение и вымывание твердых частиц суспензии, проведено сравнение численных расчетов с экспериментами по загрязнению и очистке пористых образцов. Построенные модели используются для описания течений в прискважинной зоне и трещине гидроразрыва пласта. Предложен алгоритм определения оптимальной скорости очистки породы и трещины гидроразрыва.

Актуальность темы исследования обосновывается тем, что в доступной литературе до сих пор не сформулирована универсальная модель фильтрации с учетом захвата и вымывания твердых частиц. Формулы для интенсивности осаждения и мобилизации частиц подбираются для разных экспериментов индивидуально и содержат свободные параметры. Кроме того, полученные результаты имеют **практическую значимость**. Модель фильтрации суспензии может быть использована не только для описания нефтесервисных процессов, таких как течения в прискважинной зоне и трещине гидроразрыва, но и для описания течения магмы, закачки углекислого газа в пласт, течения грунтовых вод и других процессов.

Диссертация Толмачёвой К.И. состоит из введения, шести глав и списка литературы. Каждая глава диссертации является завершенным исследованием, обусловленным общим предметом диссертационного исследования.

Первая глава посвящена обзору литературы. Обсуждаются задачи фильтрации суспензии, задачи о захвате и вымывании твердых частиц суспензии, влияние миграции частиц на проницаемость породы. Проведен обзор существующих моделей для описания течения в трещине гидроразрыва,

перечислены основные факторы, влияющие на характер течения в пласте и трещине.

Во **второй главе** была построена модель фильтрации суспензии с одной жидкой фазой. Модель учитывает миграцию мелких твердых частиц, а также течение жидкости внутри упаковки осажденных частиц. В работе представлен численный алгоритм, который был реализован в программном коде. Была показана сеточная сходимость решения и хорошее совпадение с имеющимися аналитическими решениями. Также во второй главе была рассмотрена задача об отрыве сферической частицы от плоской поверхности, что позволило получить формулу для критической скорости мобилизации частиц и сократить число свободных параметров модели.

В **третьей главе** было проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными по загрязнению и очистке пористых образцов. Полученная ранее формула для критической скорости мобилизации показала хорошее совпадение с экспериментальными значениями. Выражения для интенсивности захвата частицы были разделены на категории в зависимости от значений концентрации взвешенных частиц в растворе суспензии и отношения размеров фильтруемых частиц к размеру зерен пористой среды.

В **четвертой главе** была построена модель фильтрации с двумя жидкими фазами. Была показана сеточная сходимость численного решения и совпадение с имеющимися аналитическими решениями.

Предложенная модель фильтрации с двумя жидкими фазами была использована в **пятой главе** для описания процессов заводнения и очистки прискважинной зоны. На основании анализа результатов численных расчетов был предложен алгоритм для определения эффективности и оптимальной продолжительности очистки.

В **шестой главе** была построена сопряженная гео- и гидромеханическая модель для описания процесса очистки трещины гидроразрыва. Модель учитывает сжатие и вдавливание проппанта, неньютоновскую реологию жидкости гидравлического разрыва и приток жидкости из пласта в трещину.

Для определения оптимального (с точки зрения максимальной добычи нефти) времени снижения давления в скважине было проведено численное параметрическое исследование. В результате для заданного диапазона параметров месторождения в зависимости от значений входных параметров оптимальное время снижения давления может быть определено с использованием построенной блок-схемы.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием основных законов сохранения, корректности постановок задач, сравнением полученных результатов с аналитическими решениями и экспериментальными данными.

Следует отметить некоторые **новые** результаты, впервые полученные в диссертации. Была построена модель фильтрации суспензии с учетом конечной проницаемости упаковки захваченных частиц. Впервые была построена модель очистки трещины гидроразрыва, включающая в себя описание таких эффектов, как нестационарный приток из пласта, упругоспластические сжатие и вдавливание проппанта, неньютоновскую реологию закачиваемой жидкости. Для описания процессов захвата частиц был предложен алгоритм для выбора замыкающего соотношения, для описания процесса вымывания частиц была предложена формула для определения критической скорости мобилизации. Также на основе численных расчетов был предложен способ для определения оптимальной продолжительности очистки прискважинной зоны.

Основные результаты, представленные в диссертации, изложены в 12 научных статьях, из них 7 опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus, RSCI. Также по материалам диссертации получен 1 патент, удостоенный первого места на конкурсе «Успешный патент 2021» в категории «Финалисты – крупный бизнес».

Имеются некоторые замечания к диссертационному исследованию и его оформлению:

1. При определении параметров модели на основе обработки экспериментов путем минимизации среднеквадратичного отклонения (формулы 3.2 и 3.3; таблицы 3.3 и 3.5) точность в несколько знаков после запятой, конечно, может быть получена в результате проведения арифметических действий, но не имеет физического смысла, т.к. экспериментальные данные измерены с существенно меньшей точностью.

2. Формула (3.7) фактически представляет не скорость коагуляции (осаждения) частиц в порах, а уравнение изменения концентрации частиц в несущей фазе в предположении, что срыва частиц не происходит. В противном случае в уравнении был бы еще один член, ответственный за срыв (вымывание) частиц. Лучше писать уравнение в полном виде, а затем рассматривать отдельные его члены. Введя для них соответствующие обозначения.

3. При расчете очистки прискважинной области и трещины гидравлического разрыва с помощью разработанных моделей нестационарной фильтрации суспензий время расчета требует очень большого количества шагов интегрирования. Известно, что каждый шаг интегрирования может вносить стохастическую ошибку. Величина которой зависит от размера шага расчетной сетки и порядка точности расчетной схемы. При этом стохастическая ошибка возрастает пропорционально корню квадратному из общего количества шагов интегрирования. Поэтому, авторам рекомендовано провести оценки накопления ошибки интегрирования с учетом выбранной численной схемы, размеров расчетной сетки и количества шагов интегрирования в конкретной задаче.

4. В работе присутствует определенная неаккуратность оформления (ссылка на литературу на стр. 53, концентрация закачанных частиц 10^4 на стр.9)

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 Толмачёва Кристина 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, профессор кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Смирнов Николай Николаевич

02.10.23

Контактные данные:

тел.: +79164415300, e-mail: mech.math.msu@inbox.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы:

_Москва 119992, Ленинские Горы, 1, МГУ, мехмат
Тел.: +7 495 9392090; e-mail: office@math.msu.ru

Подпись профессора кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Н.Н. Смирнова удостоверяю:

Декан механико-математического ф-та МГУ

Член-корр. РАН

А.И.Шафаревич

