

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»

В диссертации Толмачёвой К.И. рассматриваются модели течения суспензий в пористых средах. Такие модели востребованы во многих практических приложениях. В применении к нефтепромысловым задачам расчет течения суспензий связан с проблемами загрязнения околоскважинных зон пласта при нагнетании в пласт воды, содержащей различные примеси, и оценки эффективности их очистки. В задачах гидравлического разрыва пласта (ГРП) течение суспензий характерно как для создания трещин (закачка проппанта при закреплении трещины), так и для последующего освоения скважины с очисткой трещины ГРП (приток флюида из пласта в трещину и из трещины в скважину с переносом частиц проппанта). Другие приложения включают проникновение в пласт фильтрата технологического раствора при бурении и ремонте скважин, перенос высвобождаемых глинистых или песчаных частиц породы пласта при добыче углеводородов и фильтрации подземных вод, и т.д.

Важным элементом моделей фильтрации суспензий является описание процессов осаждения и застревания, мобилизации и переосаждения твердых частиц, включая формирование вторичной пористой среды. Существующие модели не универсальны, а их свободные параметры требуют настройки на экспериментальные данные, не всегда доступные в требуемом объеме. Диссертация Толмачевой К.И. посвящена развитию моделей фильтрации суспензий с учетом течения во вторичной пористой структуре и уточненным расчетом скоростей осаждения и мобилизации частиц, что определяет **актуальность** выбранной темы.

Как показывает проведенный в диссертации литературный обзор, для многих прикладных задач, включая нефтепромысловые процессы, наиболее применимы континуальные макромоделли течения суспензий. Из их анализа и сравнения с экспериментальными данными следует, что используемые соотношения для осаждения неколлоидных частиц, а также мобилизации осажденных частиц требуют уточнения как с точки зрения функционального вида, так и значений свободных параметров. В ряде приложений актуален учет течения флюида через вторичную пористую среду, формируемую осажденными частицами. В приложении к очистке трещин ГРП требуют уточнения расчет притока флюида из пласта в трещину и учет

геомеханических эффектов. В диссертационной работе автор делает акцент на соответствующем развитии моделей фильтрации суспензий и исследовании перечисленных процессов.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы составляет 161 страницу, она включает 66 рисунков. Список цитируемых научных публикаций содержит 118 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описывается степень ее разработанности. Формулируются цели работы и решаемые задачи, приводятся защищаемые положения. Отражены новизна и практическая значимость результатов, методы проведения исследований. Аргументируется достоверность полученных результатов. Приведены сведения об апробации и основных публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена анализу опубликованных исследований по развитию моделей фильтрации суспензий в пористых средах. Рассмотрены преимущества континуального подхода для решения прикладных задач по сравнению со стохастическим. Рассмотрены основные положения и уравнения континуальных моделей, их особенности и различия. Значительное внимание уделено замыкающим соотношениям для описания коагуляции пористой среды взвешенными частицами (оседание и застревание) и мобилизации взвешенных частиц и области их применимости. В связи с применением моделей фильтрации суспензий для расчета течений в трещинах ГРП рассмотрены основные механизмы, связанные с переносом твердых частиц и изменением параметров трещины и пористой среды во времени. Описаны аналитические модели для расчета притока к трещинам ГРП, распределения давления в пласте при фильтрации слабосжимаемого ньютоновского флюида и процесса очистки трещины. Сформулированы направления для развития рассматриваемых моделей в рамках диссертационной работы.

Во второй главе сформулирована модель однофазной фильтрации суспензии в пористой среде, представленной двумя континуумами. Отличием предлагаемой модели является учет течения флюида через вторичную пористую среду, сформированную осажденными частицами. Представлены уравнения модели и используемые замыкающие соотношения. Описано обобщение модели на случай реологии Гершеля-Балкли, характерной для технологических жидкостей ГРП. Рассмотрены численная аппроксимация и алгоритм на основе неявной схемы для давления и явной для концентраций. Описано аналитическое решение задачи о фильтрации суспензии и представлена верификация результатов численного расчета для различных типов сеток. Предложена модель и выведено выражение для

критической скорости мобилизации частиц. Описана модель формирования внешней глинистой корки.

В третьей главе представлено сопоставление расчетов по предложенной модели с экспериментальными данными. Рассмотрен ряд экспериментов по кольматации, самокольматации и мобилизации для различных условий. Для настройки значений свободных параметров модели использован метод градиентного спуска. Показано преимущество предложенной модели по сравнению с моделью, не учитывающей фильтрацию через упаковку осажденных частиц. Обоснована применимость полученного выражения для скорости мобилизации частиц. Выполнено сравнение модельных расчетов с экспериментом по формированию внешней глинистой корки и течению жидкости с реологией Гершеля-Балкли.

В четвертой главе представлено обобщение модели на случай двухфазной фильтрации. Сформулирована замкнутая система уравнений, представлены численная схема и алгоритм. Выполнена верификация численного алгоритма в сравнении с аналитическим решением задачи Бакли-Левретта (без переноса взвешенных частиц).

В пятой главе разработанная модель фильтрации суспензии использована для расчета процессов кольматации пористой среды в окрестности нагнетательной скважины при закачке в пласт воды и последующей обратной очистки. Представлен анализ эффективности очистки на основе изменения скин-фактора и параметра относительной приемистости.

В шестой главе рассмотрена задача двухфазного течения в трещине ГРП при очистке трещины с учетом притока флюида из пласта и геомеханических эффектов при взаимодействии стенок трещины и частиц проппанта. Рассмотрены и сопоставлены аналитические и численные методы расчета притока флюида из пласта в трещин. Исследовано относительное влияние геомеханических эффектов на очистку трещины ГРП. С использованием модели проведены расчеты различных режимов очистки трещины ГРП и предложена блок-схема для определения оптимального режима изменения забойного давления при очистке.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, выводы и направления применения разработанных моделей.

На мой взгляд, следующие результаты, полученные в диссертации, заслуживают упоминания:

1. Предложено обобщение для однофазной и двухфазной моделей фильтрации суспензии, учитывающее течение флюида через вторичную пористую среду, сформированную осажденными частицами. Проведена верификация по опубликованным экспериментальным данным, показана

более высокая точность расчета профиля концентрации осажденных частиц по предложенной модели в сравнении с классической.

2. Развита сопряженная двухфазная модель течения в трещине ГРП при ее очистке, включающая уточненный расчет притока пластового флюида в трещину, учет геомеханических эффектов сжатия и вдавливания в стенки пропанта, сжимаемости флюидов и вязкопластичной реологию вытесняемой жидкости ГРП.

3. Предложена модель и выведено выражение для расчета критической скорости мобилизации частиц на основе условия отрыва сферической частицы от плоской поверхности в потоке ньютоновской жидкости.

4. На основе сопоставления модельных расчетов с опубликованными экспериментальными данными определены диапазоны применения различных замыкающих соотношений для захвата и мобилизации частиц, оценены свободные параметры и их связь с характеристиками течения.

5. Предложены схемы расчета и анализа эффективности процессов кольтматации и обратной очистки для нагнетательных скважин, процесса очистки трещины ГРП с применением разработанных моделей.

Результаты диссертации являются новыми, оригинальными и достоверными. Достоверность обеспечивается применением математических моделей, основанных на классических законах гидромеханики и геомеханики; валидацией реализованных численных алгоритмов по аналитическим решениям и экспериментальными данным; сопоставлением полученных решений с результатами исследований других авторов. Помимо рассмотренных в диссертации процессов кольтматации и очистки для нагнетательных скважин и скважин с трещинами ГРП на нефтяных месторождениях, разработанные в диссертации модели могут быть развиты и применены для расчета процессов проникновения в пласт технологических жидкостей при бурении и ремонте скважин, выноса глинистых и песчаных частиц из пласта при добыче углеводородов, фильтрации сточных вод и решения других актуальных прикладных задач.

Результаты работы Толмачёвой К.И. получили апробацию на ряде международных и российских конференций и научных семинаров. По итогам проведенных исследований опубликованы 12 печатных работ, включая 7 статей в изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus; получен в соавторстве 1 патент на изобретение.

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Текст диссертации написан хорошим языком и логично структурирован. Встречаются отдельные опечатки в формулах и неточности в обозначениях, но они не препятствуют правильному

пониманию содержания работы. Результаты понятно изложены и наглядно проиллюстрированы рисунками и таблицами. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» по следующим направлениям: течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии); течение жидкостей и газов в пористых средах; 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 с достаточной полнотой отражает содержание диссертационной работы.

По тексту диссертации возникли следующие замечания:

1. В обзоре не охвачены модели фильтрации суспензий, учитывающие зависимость интенсивности осаждения или мобилизации частиц от концентрации дополнительного компонента в жидкой фазе, например, солености воды. Такие модели используются, в частности, для расчета процессов проникновения в пласт фильтра бурового раствора и низкоминерализованного заводнения (LSW).

2. Валидация численного алгоритма для двухфазной модели выполнена сравнением с аналитическим решением для фронта насыщенности в задаче Бакли-Левретта. Целесообразно было бы включить в сопоставление непрерывную часть решения в области за фронтом, а также провести сопоставление с аналитическим решением для задачи вытеснения с переносом примеси.

3. Предположения, используемые при выводе модели, не всегда хорошо согласуются с рассматриваемыми прикладными задачами. Так, выражение для критической скорости мобилизации учитывает связь скорости жидкости со скоростью фильтрации, справедливую для относительно однородных пористых сред, таких как упаковка проппанта в трещине ГРП. Но при этом флюид считается ньютоновским, тогда как для жидкости ГРП важен учет вязкопластичной реологии. В модели двухфазного течения предполагается равенство концентраций взвешенных частиц в фазах, хотя приток пластового флюида в трещину ГРП не связан с вымыванием проппанта. Также принятие одинакового вида функций относительных фазовых проницаемостей для крупных и мелких каналов не учитывает существенное различие в их распределении по размерам.

4. Используемые выражения для скин-фактора и параметра приемистости в задаче об анализе эффективности очистки не вполне точны и

не учитывают различие в условиях на скважине при закачке и обратной добыче флюида, поэтому выводы к главе 5 требуют некоторого уточнения.

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 Толмачёва Кристина Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе ФБГУН Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН)

Индрупский Илья Михайлович

« » 2023 г. _____

Контактные данные:

тел.: 8-499-1355467, e-mail: i-ind@ipng.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Адрес места работы:

119333, г. Москва, ул. Губкина, дом 3

Институт проблем нефти и газа Российской академии наук

тел.: 8-499-1355467, e-mail: i-ind@ipng.ru