

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Толмачёвой Кристины Игоревны на тему «Развитие многоконтинуальных моделей фильтрации суспензии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

### 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Толмачёвой К.И. посвящена разработке математических моделей фильтрации суспензий с учётом коагуляции и мобилизации частиц твёрдой фазы.

Процессы осаждения и вымывания твёрдых частиц, содержащихся в пласте, например, нерастворимых солей или иных примесей имеют принципиальное значение в задачах фильтрации, связанных с добычей жидких углеводородов. Эти же проблемы возникают и при гидроразрыве пласта: для поддержания заданных параметров раскрытия трещины применяется проппант, представляющий собой достаточно прочные керамические частицы, которые, однако, могут разрушаться в процессе эксплуатации и образовывать нежелательные примеси. Необходимость предсказания динамического поведения частиц различной природы, содержащихся в фильтрующейся жидкости, связана с их способностью к осаждению, что приводит к уменьшению проницаемости пористой среды и, следовательно, к снижению расхода при добыче углеводородного сырья. Задачей сервисных служб нефтяных компаний является предотвращение подобных сценариев с помощью технологий очистки как призабойной зоны пласта, так и трещин гидроразрыва. Для этого, обычно, выполняется закачка воды в пласт, которая затем оттуда извлекается. Изменение направления течения, происходящее при этом, способствует мобилизации частиц и удалению их из рабочей зоны. Для прогнозирования надлежащего применения технологий очистки необходимы расчёты, основанные на адекватных математических моделях, учитывающих все значимые детали происходящих процессов осаждения и мобилизации частиц, что и было предметом исследований в представленной работе. Постановкой и решением этих важных задач, относящихся к поддержанию эффективной эксплуатации нефтяных месторождений, и обусловлена

**актуальность** темы диссертации.

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

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и описана степень ее разработанности, сформулированы цели работы и задачи, подлежащие решению, приведены защищаемые положения, отражены новизна и практическая значимость исследования, изложены методы исследования и аргументы, подтверждающие достоверность полученных результатов, даны сведения об апробации и основных публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена обзору научной литературы и известных математических моделей, имеющих отношение к теме диссертации. Описаны модели фильтрации суспензий в пористых средах, взаимодействия дисперсной фазы со скелетом пористой среды с учётом разнообразия механизмов коагуляции и мобилизации частиц. Дана оценка стохастическим моделям: автор отмечает, что при всей их привлекательности с теоретической точки зрения, они требуют использования значительных вычислительных ресурсов и не освобождают от необходимости привлечения замыкающих соотношений. Кроме того, стохастические модели не связаны с детальным описанием физических аспектов коагуляции и мобилизации частиц, которые могут иметь существенное значение при моделировании рассматриваемых процессов. В то же время эти модели приводят к хорошим результатам для коллоидных частиц. Значительное место в обзоре уделено процессам переноса частиц в трещине гидроразрыва и образованию внешней фильтрационной корки на поверхности пористой среды, образующей стенки трещины. Рассмотрены методы и модели очистки трещины гидроразрыва при различных условиях эксплуатации. В конечном итоге, на основании анализа научной литературы автором диссертации были сформулированы и в дальнейшем решены задачи, связанные с фильтрацией суспензий для корректного определения параметров технологических процессов, применяемых при очистке призабойной зоны пласта и трещин гидроразрыва, но оказавшиеся за пределом внимания других исследователей.

Основные предпосылки для достижения поставленных в диссертационной работе целей были заложены во второй главе, посвящённой, по терминологии автора, моделям однофазной многокомпонентной фильтрации суспензий. Прежде всего была проведена классификация частиц на те, которые движутся вместе с потоком суспензии и иммобилизованные частицы, осаждённые на пористом скелете. Соответственно им введены скорости фильтрации суспензии, жидкости и, отдельно, для частиц суспензии. Выведены уравнения фильтрации как ньютоновской, так и неньютоновской жидкостей. Следует отметить, что в последнем случае было проведено осреднение скорости по сечению трубки, а затем результат был записан в терминах пористой среды. В итоге, получены выражения скорости фильтрации и эффективной вязкости для жидкости Гершеля-Балкли. Алгоритм численного исследования задачи основан на конечно-разностной аппроксимации с применением трёх видов построения сетки. С помощью аналитического решения задачи были определены параметры используемой в дальнейшем сетки и получены профили концентрации осаждённых частиц, построенные с применением различных сеток.

Далее была определена критическая скорость жидкости для мобилизации частиц. При этом вычисление силы адгезии частиц осуществлено двумя способами: с использованием потенциала взаимодействия Леннарда-Джонса и с использованием эмпирической формулы, полученной для воды. Здесь же была рассмотрена задача об образовании внешней глинистой корки на поверхности пористой среды.

В третьей главе приведены результаты сопоставления численных исследований с экспериментальными данными. Установлено, что двухпараметрическая новая модель, разработанная автором диссертации, наилучшим образом описывает экспериментальные профили концентрации осаждённых частиц. В то время как классическая модель и однопараметрическая новая модель описывают их только качественно. Существенная разница в описании экспериментальных данных наблюдается при высоких концентрациях частиц, особенно вблизи входной границы. Автором выявлены и описаны, также, эффекты по влиянию размеров частиц на процесс осаждения, самокоагуляции, мобилизации частиц. В диссертации приведена вполне удовлетворительная аппроксимация экспериментальных зависимостей критической скорости мобилизации от диаметра частиц. Представлено

и сравнение численных расчётов с экспериментом по зависимости обратной скорости течения от времени при образовании внешней корки.

В четвёртой главе разработана математическая модель двухфазной фильтрации суспензий на основе принципа взаимопроникающих континуумов. Представленная система уравнений двухфазной фильтрации состоит из уравнений неразрывности жидкостей и фазы взвешенных частиц. Уравнения неразрывности для осаждённых частиц записаны отдельно. В качестве уравнений движения используются модифицированные уравнения Дарси. При этом скорость фильтрации в мелких каналах между осевшими частицами рассмотрена отдельно. Относительная проницаемость и проницаемость упаковки осаждённых частиц, как и скорости, записаны раздельно. Выписаны все необходимые замыкающие соотношения, включая зависимость вязкости суспензии от концентрации взвешенных в ней частиц дисперсной фазы, а также процессы коагуляции и мобилизации этих частиц. Жидкость предполагается слабо сжимаемой.

Для полученной системы уравнений, с заданными начальными и граничными условиями, автором диссертации разработан конечно-разностный алгоритм численного решения поставленной задачи. Шаг по времени, при этом, вычисляется в соответствии с условием устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви. Для тестирования численного алгоритма была рассмотрена задача о фильтрации двух жидкостей, для которой было выписано аналитическое решение.

В краткой пятой главе проведены численные исследования фильтрационных течений вблизи нагнетательных скважин с использованием математической модели и алгоритма, разработанных автором и представленных в предыдущей главе. В ходе исследований было установлено, что признаки, свидетельствующие о факте очистки призабойной зоны пласта. Например, как утверждает автор: «...если приемистость в начале очистки превышает максимальное значение приемистости при заводнении - полная очистка породы очень вероятна; чем меньше скачок приемистости в начале процесса очистки, тем меньше очистится прискважинная зона».

В шестой главе представлено исследование течения суспензии в трещине гидроразрыва и пласте. В этой главе выведены уравнения для двухфазной и, по

аналогии, для четырёхфазной фильтрации. Принято, что жидкость гидроразрыва подчиняется реологическому уравнению Гершеля-Балкли. В основе лежит общепринятое допущение о малости величины раскрытия трещины по сравнению с её длиной. На стенках трещины задаются условия проницаемости. Для вывода уравнений неразрывности в трещине автором приведена процедура осреднения по её сечению. Аналогично выведены и уравнения для течения двух суспензий, при этом относительные плотности были выражены через насыщенности и концентрации частиц дисперсной фазы. Решение задач было проведено с учётом геомеханических эффектов: вдавливания проппанта в стенки трещины и изменения фильтрационных свойств упаковки проппанта при действии сдвигающих напряжений породы.

В итоге было выполнено исследование различных режимов очистки трещины гидроразрыва. Был установлен важный факт, что на снижение проводимости трещины наибольшее влияние оказывает сжатие проппанта. Для различных условий на месторождении и значений входных параметров рабочих сред были определены оптимальные скорости снижения давления в скважине.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы и перспективы дальнейших исследований.

Следует отметить ряд несомненных достоинств выполненной научной работы.

1. Прекрасно выполненный обзор литературы, дающий чёткое представление о дальнейшем предмете исследований с тщательно подобранным перечнем публикаций, результаты которых были так или иначе вовлечены в диссертационное исследование, к которым, прежде всего, относятся экспериментальные данные.
2. Формула для определения критической скорости мобилизации.
3. Численный алгоритм новой модели однофазной фильтрации с двумя параметрами, позволившей добиться адекватной интерпретации экспериментальных зависимостей профилей осаждённых частиц и их мобилизации.
4. Вывод двухфазной модели фильтрации и соответствующего алгоритма для численного моделирования.
5. Математическая модель и результаты исследования течения суспензий в

трещине гидроразрыва, в частности, вывод о значении сжимаемости частиц проппанта на снижение проводимости трещины.

6. К каждой главе даны ссылки на публикации автора, в которых изложены основные результаты исследований по данной главе.

Результаты диссертации являются новыми, оригинальными и достоверными. Достоверность обеспечивается применением математических моделей, основанных на классических законах гидродинамики и геомеханики, тщательным тестированием численных алгоритмов при их реализации, сопоставлением полученных решений с результатами исследований других авторов. Разработанные в диссертации модели могут быть применены для расчета параметров очистки призабойной зоны пласта в зависимости от тех или иных условий на нефтяном месторождении.

Результаты работы Толмачёвой К.И. получили апробацию на ряде международных и российских конференций и научных семинарах. На основе проведенных исследований были опубликованы 12 печатных работ, 7 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science, Scopus, RSCI. Также по материалам диссертации получен 1 патент.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, написана хорошим языком, 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; течения сжимаемых сред и ударные волны; течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии); течение жидкостей и газов в пористых средах; разработка математических методов и моделей гидромеханики. Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает содержание диссертационной работы.

Имеются следующие замечания:

1. На рисунке 3.18 главы 3 диссертации приводится сравнение теоретической зависимости критической скорости мобилизации частиц в трубках в зависимости

от диаметра частиц с экспериментальными значениями этих величин. Результаты сравнения представлены в логарифмической шкале. Не подвергая сомнению положительный результат сравнения, следовало бы обратить внимание на характерное отклонение расчётных значений от экспериментальных для критической скорости в диапазоне размеров частиц от 0,02 см до 0,4 см. Расчётная критическая скорость для частиц размером 0,1 см отличается почти в 2 раза от её экспериментального значения. Как можно объяснить указанный факт?

2. В тексте диссертации на рисунке 3.18 расчётные линии зависимости критической скорости от диаметра частиц построены для внутренних углов, равных  $55^\circ$  и  $45^\circ$ . На аналогичном рисунке 3 автореферата указаны углы  $55^\circ$  и  $50^\circ$ , соответственно.

3. При моделировании процесса образования внешней корки автором учитывалось осаждение на поверхности пористой среды лишь крупных частиц. Это модельное представление требует обоснования, так как более мелкие частицы тоже могут осаждаться, в том числе и на осаждённых крупных частицах. Даже удивительно, что на рисунке 3.21 получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных.

4. Рисунки 3.2 - 3.4 и 3.6 воспринимаются с трудом, так как выбрана не совсем удачная их компоновка, а подписи под этими рисунками следовало бы сделать в одном стиле.

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), 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.

На основании изложенного считаю, что 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, главный научный сотрудник

Института механики имени Р.Р. Мавлютова

— обособленного структурного подразделения

Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук,

заведующий лабораторией «Механика многофазных систем»

Урманчиев Саид Федорович

«01» октября 2023 г.

Я, Урманчиев Саид Федорович, автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Толмачёвой Кристины Игоревны, и их дальнейшую обработку.

Контактные данные:

тел.: +7-927-233-99-02; e-mail: said52@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Подпись Урманчиева С.Ф. заверяю:

учёный секретарь ИМех УФИЦ РАН,

к.ф.-м.н.

Гайнуллина Э.Ф.

Адрес места работы:

450054, г. Уфа, пр-т Октября, 71

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова

— обособленное структурное подразделение УФИЦ РАН

тел.: +7-347-235-52-55, e-mail: imran@anrb.ru

