

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Осипцова Андрея Александровича «Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

На сегодняшний день более половины новых нефтяных и газовых скважин в РФ проходят процедуру стимуляции добычи с помощью технологии гидроразрыва пласта (ГРП). Эта технология основана на создании трещин в нефтегазоносной пористой среде путем закачки жидкости в скважину с последующим заполнением этих трещин суспензией, содержащей твердые частицы расклинивающего агента (проппанта), которые после остановки закачки под действием сдвигающих напряжений заполняют трещину высокопроницаемым плотно упакованным гранулированным материалом. Существующие компьютерные симуляторы различных этапов гидроразрыва, как правило, используют упрощенные гидравлические модели многофазных течений, основанные на эвристически постулированных уравнениях "эффективной" односкоростной среды. Такие модели не учитывают ряд важных физических факторов, в том числе: эффекты скоростного проскальзывания частиц, приводящие к перераспределению дисперсной фазы в трещине, неньютоновские свойства суспензии (предел текучести), несферичность частиц проппанта, миграцию частиц поперек трещины при закачке и др. В связи с этим возникает проблема построения семейства самосогласованных многоконтинуальных моделей механики многофазных сред для описания течений, формирующихся на различных стадиях применения технологии гидроразрыва пласта. Именно этой проблеме и посвящена рассматриваемая диссертационная работа А.А. Осипцова. Следует отметить, что развиваемые в диссертации математические модели и методы их исследования могут быть использованы и для других приложений, в которых имеют место нестационарные течения многофазных сред в узких каналах и длинных трубах, а также фильтрация жидкости с частицами в пористой среде с изменяющейся пористостью и проницаемостью. В связи с вышеуказанным, тема диссертации А.А. Осипцова несомненно является **важной и актуальной**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных обозначений и списка литературы. Работа содержит

310 страниц, 59 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 371 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, указаны цель и научная новизна исследований, отмечена их научная и практическая значимость.

Первая глава носит обзорный характер. Она посвящена анализу литературы по проблемам механики многофазных сред в технологии гидроразрыва пласта. Подробно описаны гидромеханические явления, сопутствующие реализации технологии гидроразрыва пласта. Приведена ретроспектива развития моделей транспорта проппанта. Отмечено, что управление гидроразрывом осуществляется с помощью компьютерного моделирования на основе симуляторов, использующих для описания различных стадий процесса ГРП довольно упрощенные модели механики многофазных сред. Перечислим кратко эти стадии: 1) стадия закачки – течение суспензии в скважине и транспорт суспензии в вертикальной трещине ГРП, созданной в породе; 2) стадия очистки трещины от гидроразрывной жидкости – многофазная фильтрация в закрытой трещине ГРП, заполненной плотно упакованными частицами проппанта; 3) газожидкостное течение в скважине от перфораций (в местах соединения с трещинами ГРП) к поверхности. Пожалуй, только первая стадия (стационарная закачка эффективно однофазной суспензии в скважину) хорошо описывается известными гидравлическими моделями, а используемые в имеющихся симуляторах ГРП модели транспорта проппанта в трещине ГРП на стадии закачки и модели очистки системы "скважина-трещина" требуют улучшения и развития. Обзор литературы завершается списком нерешенных проблем при моделировании многофазных течений на различных этапах применения технологии гидроразрыва пласта. Сформулирован перечень задач, требующих построения более детальных и обоснованных гидродинамических моделей. *Основные результаты первой главы опубликованы автором самостоятельно в большой обзорной статье в журнале *Journal of Petroleum Science and Engineering* (журнал входит в топ 25 % по цитируемости по системе *Web of Science*). Стоит особо отметить, что по информации с веб-сайта журнала, данная статья автора вошла в число трех самых читаемых (скачиваемых) статей указанного журнала за последний период.*

Во **второй главе** построена квазидвумерная двухконтинуальная модель течения суспензии в узкой вертикальной трещине гидроразрыва. По сравнению с существующими в литературе моделями, полученными в приближении эффективной жидкости, двухконтинуальные уравнения вклю-

чают дополнительный дифференциальный член, содержащий объемную долю и скорость гравитационного осаждения частиц. Проведен ряд численных расчетов для оценки влияния дополнительного слагаемого на перенос и оседание частиц. Дано обобщение модели для описания последовательной закачки различных жидкостей в трещину гидроразрыва, в том числе, жидкостей бингамовской реологии с пределом текучести. В рамках квазидвумерного приближения модель описывает развитие неустойчивости Сэфмана–Тейлора на границе раздела между жидкостями и эффекты гравитационной конвекции, а также формирование областей псевдозатвердевания бингамовской жидкости там, где не превзойден предел текучести. Проведено сравнение результатов численных расчетов в рамках построенной модели с результатами четырех различных наборов экспериментальных данных: 1) гравитационного оплывания тяжелой жидкости в легкой (тестовая задача о прорыве вертикальной "дамбы", разделяющей жидкости разной плотности в ячейке Хеле–Шоу); 2) неустойчивости Сэфмана–Тейлора на границе раздела между ньютоновскими жидкостями (вода и водный раствор глицерина) в ячейке Хеле–Шоу в условиях малой силы тяжести; 3) перенос и осаждение частиц при течении суспензии в вертикальной ячейке Хеле–Шоу с образованием осадка на дне канала; 4) развитие неустойчивости Сэфмана–Тейлора на границе раздела между ньютоновской и бингамовской жидкостями при вытеснении в вертикальной ячейке Хеле–Шоу. Получено удовлетворительное согласие между численным моделированием с использованием построенной модели и различными экспериментальными данными.

В **третьей главе** приведено решение многомасштабной задачи о миграции частиц в горизонтальном сечении вертикальной трещины гидроразрыва пласта. Исследована инерционная миграция малой сферической частицы, осаждающейся под действием силы тяжести в горизонтальном течении ньютоновской жидкости через плоский вертикальный канал. С помощью метода сращиваемых асимптотических разложений для малых, но ненулевых чисел Рейнольдса обтекания частицы неоднородным ограниченным потоком получены решения для скорости миграции и коэффициента боковой силы, действующей на частицу в рассматриваемом течении. В рамках двухконтинуального подхода построена асимптотическая модель течения разреженной суспензии в начальном участке плоского канала. В межфазном обмене импульсом учтена инерционная боковая сила с поправочным коэффициентом за счет присутствия стенки и конечности параметра проскальзывания. Решение строится методом сращиваемых асимптотических

разложений в пределе больших чисел Рейнольдса течения в канале. Полный лагранжев метод используется для расчета полей концентрации частиц. Показано, что на участке стабилизированного течения в профиле концентрации дисперсной фазы может быть два максимума. Этот результат является обобщением известного эффекта Сегре–Зильберберга на случай инерционных частиц, имеющих ненулевую плавучесть. Далее в этой главе строится двухконтинуальная модель инерционной миграции осаждающихся частиц при горизонтальном ламинарном течении разреженной суспензии в вертикальной ячейке Хеле–Шоу. В межфазном обмене импульсом также учитывается инерционная боковая сила. Эволюция гидродинамических параметров среды частиц исследована численно с помощью полного лагранжева метода. В завершение главы построена двухконтинуальная модель течения суспензии в вертикальной трещине гидроразрыва с учетом неоднородного поперечного профиля концентрации частиц, формирующегося за счет миграции частиц к центральной плоскости трещины. По сравнению с существующими в литературе моделями, не учитывающими эффекты миграции, осредненные поперек трещины двумерные уравнения содержат модифицированные коэффициенты, явно зависящие от ширины ядра течения, занятого частицами.

В **четвертой главе** построена трехконтинуальная модель фильтрации суспензии мелких частиц в пористой среде с учетом осаждения и мобилизации частиц, приводящих к повреждению и восстановлению проницаемости и пористости. По сравнению с известными в литературе моделями, учтены эффекты фильтрации чистой жидкости через плотную упаковку осажденных (захваченных) в порах частиц. Для случая постоянной пористости проведено сравнение полученных численно распределений концентрации осажденных и взвешенных частиц с аналитическим решением. Показана сеточная сходимость численного решения к аналитическому. Проведено сравнение численных расчетов, полученных при использовании различных моделей, с имеющимися экспериментальными данными по закачке суспензии в пористую среду. Новая модель фильтрации, всего с одним свободным параметром, хорошо описывает экспериментальные данные вблизи входной границы пористого образца. Далее в этой главе с помощью метода решеточного уравнения Больцмана численно исследовано трехмерное стационарное течение вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости через смешанные плотные упаковки сферических и удлиненных частиц. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментами. Показано, что проницаемость пространственно-периодических смешанных упаковок частиц, отнесенная

к квадрату эквивалентного радиуса частиц, может быть аппроксимирована степенным одночленом как функция пористости в широком диапазоне пористости.

В **пятой главе** представлен вывод асимптотических уравнений модели дрейфа для течения разреженной газожидкостной дисперсной смеси в круглой трубе в приближении длинного канала как предел полных уравнений законов сохранения, записанных для каждой фазы в многоконтинуальном приближении. Определены ключевые предположения, при которых предельная асимптотическая модель дрейфа, содержащая алгебраическое соотношение для скоростей фаз и одно уравнение сохранения импульса смеси в терминах среднеобъемной скорости, строго следует из законов сохранения. Предложена общая модель многофазного течения с произвольным числом компонент в скважине, основанная на комбинации многоконтинуального подхода и модели дрейфа. Проведен анализ гиперболичности многофазной модели и предложено ее замыкание, обеспечивающее гиперболичность в диапазоне параметров, характерном для рассматриваемых приложений. Рассмотрены две модификации классической двухжидкостной модели, описывающей нестационарное двухфазное течение в длинном трубопроводе: модель с учётом градиента уровня жидкой фазы и модель с учётом межфазных сил давления. В модели с учетом градиента уровня жидкой фазы в случае несжимаемых сред аналитически найдено безразмерное условие, обеспечивающее исходной системе уравнений гиперболичность. Для течения типа нефть-газ для различных углов наклона построены графики с областями гиперболичности системы в пространстве определяющих параметров течения.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Специального упоминания заслуживают следующие результаты, полученные в диссертации:

- I. Построение семейства многоконтинуальных моделей, позволяющих описывать многофазные течения на различных стадиях технологии ГРП, включая течение суспензии по трещине, поперечную миграцию и осаждение частиц в трещине, фильтрацию углеводородов в закрытой трещине по направлению к скважине и газожидкостные течения в скважине после ГРП при старте добычи. Указанное семейство включает в себя следующие модели:
 1. Новая квазидвумерная двухконтинуальная модель течения суспензии в трещине гидроразрыва.

2. Многомасштабная модель миграции частиц при течении разреженной суспензии в трещине гидроразрыва.
 3. Трехконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде с учетом осаждения (захвата) частиц в порах и мобилизации частиц.
 4. Новая зависимость безразмерной проницаемости от пористости для упаковки несферических частиц, полученная на основании трехмерных расчетов течения вязкой несжимаемой жидкости в поровом пространстве с помощью метода решеточных уравнений Больцмана.
 5. Комбинированная квазиодномерная модель для многофазных газожидкостных течений в длинных скважинах и трубопроводах с замыкающими соотношениями, обеспечивающими гиперболичность модели.
- II. На основании численного и асимптотического исследования ряда течений показано, что построенные модели позволяют качественно и количественно описывать процессы транспорта суспензии в трещине ГРП, фильтрацию углеводородов в закрытой трещине, заполненной гранулированным материалом, и газожидкостные течения в скважине после ГРП.
- III. С точки зрения развития теории методов возмущений в механике жидкости, особый интерес представляет построенное автором семейство асимптотических моделей, основанных на приближении тонкого слоя для течения в трещине и тонкого канала для скважинной гидродинамики. С использованием асимптотических методов автору удалось строго получить уравнения квазидвумерных и гидравлических многоконтинуальных моделей из полных трехмерных законов сохранения и, таким образом, сделать существенный шаг вперед по сравнению с используемыми в индустрии полуэмпирическими моделями двухфазных течений.
- IV. Особенно интересными в математическом плане, на мой взгляд, являются аналитические результаты, полученные в диссертации с помощью метода сращиваемых асимптотических разложений. Это, прежде всего, решение многомасштабной задачи о миграции частиц при течении суспензии в начальном участке плоского канала (трещины), где решение для концентрации дисперсной фазы вниз по потоку получено путем сращивания решений в нескольких различных асимптотических областях.

Все основные результаты работы являются **новыми** и представляют интерес как для фундаментального направления механики многофазных сред, так и для развития технологии гидроразрыва пласта. Работа выполнена на высоком научном уровне.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью и

непротиворечивостью построенных многоконтинуальных моделей механики многофазных сред, сравнением результатов каждой главы диссертации с экспериментальными данными, совпадением результатов исследования в частных случаях с известными решениями других авторов, тщательным контролем аппроксимации, устойчивости и сходимости численных схем и, где это возможно, сравнением численных и аналитических решений.

Диссертацию отличает внутренняя целостность и единство изложения. Все задачи, решенные автором, объединяет общее технологическое приложение (технология гидроразрыва пласта) и единый метод исследования – многоконтинуальный подход к моделированию многофазных течений и применение асимптотических методов.

Основные результаты выполненных исследований получены лично автором и опубликованы в 24 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в англоязычных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, доложены на представительных научных конференциях и обсуждены на многочисленных семинарах в ведущих научных организациях.

Название диссертации соответствует её содержанию и заявленной специальности. Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно её отражает.

Имеются следующие замечания:

1. Несмотря на то, что в диссертации даны общие постановки задачи, учитывающие нестационарное поведение формы трещины при закачке пропанта, в качестве примеров расчета рассмотрены только случаи заданной формы трещины. Хотелось бы видеть и решение нестационарных задач, а, по возможности, и сопряженных задач об одновременном раскрытии трещины и движении суспензии.
2. Построенные модели течения суспензии в трещине гидроразрыва соответствуют ламинарному режиму течения. Следовало бы привести оценки характерных чисел Рейнольдса течения в трещине и оценить возможность проявления гидродинамической неустойчивости неоднородных двухфазных потоков в трещине и перехода к турбулентному режиму.
3. При сравнении расчетных данных с результатами экспериментов следовало бы приводить доверительные интервалы экспериментальных данных (погрешности измерения).
4. Англоязычный термин "валидация", использованный в тексте диссертации, следовало бы заменить, например, на словосочетание "сравнение с экспериментальными данными".

Указанные замечания ни в коей мере не снижают высокой оценки диссертационной работы в целом.

Проведенный анализ диссертационной работы Осипцова Андрея Александровича позволяет сделать вывод о том, что в ней на основе выполненных автором исследований сформулированы и обоснованы научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в механике многофазных сред, связанное с развитием моделей многофазных течений применительно к описанию различных стадий технологии гидроразрыва, используемой для интенсификации добычи углеводородов.

Таким образом, диссертационная работа А.А. Осипцова "Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта" удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, и соответствует всем пунктам "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Осипцов Андрей Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика
жидкости газа и плазмы,
профессор кафедры гидромеханики
механико-математического факультета
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова
07 ноября 2017 г.

А.В. Аксёнов

Телефон: +74959393958 (служебный)
E-mail: aksenov@mech.math.msu.su
Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва,
Ленинские горы 1, Главное здание МГУ,
Механико-математический факультет

Подпись профессора Аксёнова Александра Васильевича
удостоверяю:

И.о. декана механико-математического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор



В.Н. Чубариков