

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **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.

Область исследований, представленных в диссертации, относится к разработке новых моделей многофазных течений и их применению к решению ряда конкретных задач, возникающих в нефтедобывающей индустрии. Специфический круг приложений, для которых результаты диссертации могут быть непосредственно использованы, относится к технологиям гидроразрыва пласта (ГРП). Особая значимость разработки указанных технологий возникла в последние годы в связи с необходимостью разработки отечественных средств моделирования ГРП и их применения в практических условиях. Технология ГРП применяется на нефтяных и газовых скважинах для увеличения добычи. В основе технологии лежит процедура создания трещин в породе путем закачки многофазной смеси жидкости с частицами в скважину и затем в породу. Дизайн и планирование работ по ГРП проводится с помощью симуляторов, которые основаны на упрощенных математических моделях, не учитывающих существенные физические факторы, в частности, двухскоростные эффекты при течении суспензии в трещинах ГРП.

В диссертации рассмотрены задачи многофазных течений, возникающих на всех этапах технологической цепочки гидроразрыва. Следует отметить, что несмотря на то, что теория многофазных течений начала активно развиваться с середины прошлого века, до сих пор не имеется неких общепринятых “стандартных” моделей даже для двухфазных сжимаемых течений. Поэтому любое продвижение в создании новых достоверных моделей имеет немалое значение в формировании единой точки зрения в теории многофазных течений. Отметим также, что уровень моделей, которые в настоящее используются в технологиях ГРП недостаточен для адекватного описания явлений. Как правило, это модели некоей “эффективной” однородной среды, с параметрами, учитывающими ее многофазность. В действительности, необходимо развивать модели реальных многофазных течений, учитывающие относительное движение составляющих смеси и их взаимодействие. Именно эти аспекты моделей разнообразных процессов, сопутствующих ГРП, рассмотрены в диссертации. При этом особое внимание обращается на соответствие результатов полученных на основе разработанных моделей с известными

теоретическими и экспериментальными данными. В свете всего вышесказанного актуальность работы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения и пяти глав. Во **введении** описана актуальность тематики исследований, ее новизна и значимость, а также данные об аprobации работы и личный вклад автора. В **первой главе** приведен детальный обзор и анализ литературы по механике многофазных сред в применении к технологиям ГРП. На основе обзора подчеркивается многомасштабность процессов, происходящих при закачке проппанта в трещину гидроразрыва, систематизируются данные о действии боковой силы на частицу в сдвиговом потоке вязкой жидкости, развитии теории вязкости суспензий. Также сформулированы актуальные задачи моделирования процессов в технологической цепочке ГРП, требующие создания усложненных достоверных моделей многофазных течений. **Вторая глава** содержит результаты исследований по моделированию течения суспензии в трещине ГРП. На основе двухфазной двухскоростной модели течения жидкости с частицами представлены новые модели течения (в том числе с осаждением частиц) и результаты численных расчетов с использованием разработанных моделей. В **третьей главе** исследуется динамика инерционной миграции частиц, с помощью асимптотических и численных методов проводится анализ различных режимов течения, в том числе для двухскоростной модели. **Четвертая глава** посвящена моделированию фильтрационных течений в трещине гидроразрыва, заполненной плотно упакованными частицами проппанта. Здесь, в частности, разрабатывается модель фильтрации в среде с двумя масштабами пористости, которые возникают при осаждении частиц проппанта в порах. Также с использованием численного решения решеточного уравнения Больцмана даны оценки проницаемости “цифрового керна” плотных упаковок сферических и удлиненных частиц. В **пятой главе** проводится исследование одномерных моделей газожидкостных течений в трубах. С использованием двухскоростной модели течения проведено обоснование модели дрейфа для некоторой области параметров течения. Представлена новая модель трубного течения с одним давлением, являющаяся гиперболической в области изменения параметров течения, характерных для прикладных задач. И, наконец, в **заключении** сформулированы основные результаты представленной диссертации.

Результаты исследований, изложенные в диссертации, получены на основе теории многофазных моделей механики сплошных сред, использования методов асимптотических разложений и численных методов решения дифференциальных уравнений. Их достоверность обеспечивается строгостью и

непротиворечивостью построенных моделей, сравнением результатов каждой главы диссертации с имеющимися 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.

Результаты диссертации являются новыми и практически значимыми. Основным результатом является построение семейства многофазных, многоскоростных моделей, позволяющих описывать 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. Модель учитывает двухскоростной характер течения и предназначена для описания течения суспензии с осаждением частиц, сопровождающимся ростом осадка на дне трещины, гравитационной конвекцией и неустойчивостью Сэфмана-Тейлора границы раздела между жидкостью и суспензией.

2. Многомасштабная двухконтинуальная модель миграции частиц при течении разреженной суспензии в трещине гидроразрыва, учитывающая эффекты поперечной миграции частиц.

3. Трехконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде с учетом осаждения (захвата) частиц в порах и мобилизации частиц, предназначенная для описания динамики пористости и проницаемости.

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. Предложенная зависимость дает более точное соответствие проницаемости с экспериментальными данными.

5. Комбинированная одномерная осредненная модель течения многофазных газожидкостных течений в длинных скважинах и трубопроводах. Определяющие уравнения модели являются гиперболическими в области параметров течения характерных для приложений.

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.

Важно отметить, что развивающийся автором многоконтинуальный многоскоростной подход к течениям, сопутствующим гидроразрыву пласта, является наиболее перспективным направлением, обеспечивающим адекватность описания явлений. При создании моделей чрезвычайно важно учитывать математическую корректность задач, изучаемых с их использованием. В этом смысле в работе особенный интерес представляет построение одномерной гиперболической модели для многофазных течений в скважинах на основе многоконтинуального подхода, которая построена в области параметров течения, характерном для нефтегазовых приложений. Обеспечение гиперболичности модели в заданной области параметров позволяет сформулировать корректную постановку начально-краевой задачи, что обеспечивает сходимость по сетке и устойчивость численного расчета, а значит обеспечивает достоверность полученных численных решений.

По материалам диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. В расчетах по многоконтинуальной модели течения суспензии в трещине ГРП используется ограничитель потоков Superbee. Данный ограничитель дает наиболее точный профиль разрывных решений в одномерных задачах, но насколько мне известно в двумерных расчетах иногда может давать не очень хорошие результаты. Использовались ли для сравнения результатов другие ограничители?
2. Во второй главе численно изучается неустойчивость Сэфмана-Тейлора при вытеснении, которая является неустойчивой в том смысле, что возмущения растут быстрее с уменьшением длины возмущения. Это означает, что в расчетах стабилизирующим фактором является численная вязкость разностной схемы. Это, в свою очередь, означает, что схема более высокого порядка точности может приводить к качественно другой картине течения. Возможно автору следовало бы провести хотя бы единичный расчет для сравнения с результатами, полученными методом более высокой точности. Для корректного описания данной неустойчивости необходимо введение в модель диссилативных механизмов, конкретный вид которых автору следовало бы обсудить.
3. Результаты по зависимости проницаемости от пористости получены на основе цифровой модели керна (направление, активно развиваемое различными коллективами исследователей в мире). Можно ли на основе

изложенной в диссертации методики получить и другие континуальные характеристики керна, такие как, например, зависимость относительных проницаемостей от насыщенности и от капиллярного числа при многофазной фильтрации и делались ли попытки таких исследований?

4. В главе 5 осреднение течения в трубе проведено только по радиусу. Для более точного описания трубного течения целесообразно проводить также осреднение и по угловой координате. Приведет ли это к изменениям в уравнениях осредненного течения?
5. Автор употребляет термины “условная” и “безусловная” гиперболичность. Эти термины не употребляются в русскоязычной литературе и позаимствованы из англоязычной литературы. Следовало бы более точно формулировать эти понятия.
6. В некоторых местах можно было бы для удобства читателя улучшить изложение. Так, например, в параграфе 4.1.2 следовало бы выписать рассматриваемую систему уравнений на одной странице, чтобы не искать упоминаемые уравнения по отдельности. На стр. 224 сказано, что уравнение (5.4) является следствием уравнения (5.60), хотя по-видимому имелось ввиду уравнение (5.2). Также в уравнении (5.4) не определено что такое e_z .

Указанные замечания никоим образом не умаляют чрезвычайно высокого уровня исследований, представленных в диссертации и общей положительной ее оценки. Полученные результаты являются актуальными, имеют научную новизну и могут быть использованы для практических применений. Материал и выводы, представленные в диссертации, являются достоверными и научно обоснованными. Основные положения выполненных исследований 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, обсуждены на многочисленных семинарах в ведущих научных организациях и получены лично автором. Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями и отражает содержание диссертации.

На основании вышеизложенного можно заключить, что в диссертации Осипцова Андрея Александровича сформулированы и обоснованы научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в механике многофазных сред, связанное с развитием семейства моделей многофазных течений применительно к описанию различных стадий технологии гидроразрыва, используемой для интенсификации добычи углеводородов.

Диссертационная работа Осипцова Андрея Александровича «Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта» полностью соответствует всем критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в “Положении о присуждении ученых степеней”, утвержденном Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а сам соискатель А.А. Осипцов безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н.,
главный научный сотрудник лаборатории Дифференциальных уравнений и
смежных вопросов анализа ИМ СО РАН

28 ноября 2017 г.



Е.И. Роменский

Подпись д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории
Дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа ИМ СО РАН
Роменского Е.И. заверяю

Руководитель организационного отдела ИМ СО РАН Н.З. Киндалева

Роменский Евгений Игоревич
доктор физико-математических наук,
специальность 05.13.16 – применение вычислительной техники,
математического моделирования и математических методов в научных
исследованиях (по отраслям наук),
главный научный сотрудник лаборатории Дифференциальных уравнений и
смежных вопросов анализа, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, <http://www.math.nsc.ru>

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, д. 4,

Телефон: +7-383-3297657

Электронная почта: evrom@math.nsc.ru