

Отзыв официального оппонента Урманчеева С.Ф.
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.

Актуальность темы

Рассматриваемая диссертационная работа А.А. Осипцова посвящена созданию теоретических основ технологии гидроразрыва пласта (ГРП), широко используемой для увеличения эффективности добычи нефти и газа.

По существу процесс гидроразрыва представляет собой создание трещины в пласте и, как научная проблема, в первую очередь, стал предметом исследования в области механики деформируемого твердого тела. Первые теоретические результаты, ставшие классическими, были получены в середине предыдущего столетия в работах С.А. Христиановича, Ю.П. Желтова, Г.И. Баренблатта, в которых была определена схема расчета параметров ГРП. В дальнейшем многими авторами были созданы различной степени сложности математические модели, учитывающие технологические особенности проведения ГРП. В силу очевидной специфики научная проблематика образования трещины ГРП стоит несколько особняком от задач теории хрупкого разрушения вообще и разрушения горных пород в частности, представленных в работах Г.И. Баренблатта, В.М. Ентова, Р.В. Гольдштейна, Г.П. Черепанова и других авторов. Принципиальной особенностью трещины гидроразрыва является поступление в неё специальной жидкости, взаимодействие с которой и обуславливает динамику развития трещины. При этом существенным фактором является просачивание жидкости в пористый пласт через стенки трещины. После создания трещины ГРП путём закачки чистой жидкости для предотвращения закрытия трещины производится закачка жидкости с частицами проппанта. Математические модели взаимодействия трещины с жидкостью гидроразрыва описаны в многочисленных публикациях, в частности, В.М. Ентова, Э. Пирсона (J.R.A. Pearson), Н.Н. Смирнова. На основе теоретических исследований были созданы коммерческие симуляторы для определения технологических режимов проведения ГРП.

В общей постановке задачу моделирования ГРП следует отнести к механике многофазных сред. Однако, в целом, научное содержание большинства практически используемых методик расчёта ГРП и симуляторов существенно отстаёт от современных достижений механики многофазных сред, в которой накоплены значительные знания и опыт при исследовании процессов осаждения частиц дисперсной фазы, движении в ячейках Хеле-Шоу,

гидродинамической устойчивости и многих других аспектах поведения дисперсных систем.

Немаловажной проблемой, решению которой автор уделил значительное внимание, является построение математически обоснованных и эффективных методов решения уравнений разработанных им математических моделей.

Безусловно, можно утверждать, что тема исследования диссертационной работы А.А. Осипцова является актуальной и весьма своевременной для решения экономически важной задачи эффективного извлечения углеводородного сырья в условиях непрерывно возрастающей сложности условий его добычи.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации

Приведенный в диссертационной работе А.А. Осипцова перечень научных положений чётко отражает результаты проделанной работы и основан на итоговых научных выводах.

В процессе исследований автор последовательно придерживался принципа проведения оценок, получения асимптотических приближений в зависимости от предельных значений безразмерных управляющих параметров, что позволяло практически в каждой конкретной задаче иметь возможность сравнения её решения с известными в научной литературе результатами. Важную роль для обоснования выводов в процессе исследований играли весьма удачно подобранные тестовые задачи.

В диссертации численное решение задач сопровождается пошаговым описанием процедуры вычислений с указанием условий сходимости и контролем точности вычислений, а также обсуждением применения того или иного алгоритма. В частности, это позволило обоснованно провести сравнение численных решений при исследовании образования «пальцев» с результатами экспериментальных наблюдений.

В итоге, вывод о необходимости применения разработанной автором двухконтинуальной модели при описании переноса проппанта получил обоснование в ходе численного эксперимента. Одновременно было показано, что транспорт проппанта в трещине ГРП может с удовлетворительной точностью быть описан при помощи общепринятого односкоростного подхода в случае применения стандартной технологии ГРП с использованием высоковязких жидкостей, что может служить хорошей рекомендацией для других исследователей.

При решении задачи о неустойчивости Сэфмана-Тэйлора было показано, что физически обоснованные результаты могут быть достигнуты только при определённой точности многосеточного метода.

Подавляющее большинство алгоритмов расчета ГРП использует осреднённые значения концентрации проппанта по сечению трещины. Однако условия сдвигового течения дисперсной системы в трещине с учетом осаждения частиц делают указанное допущение не вполне обоснованным.

Автором была поставлена и решена задача о течении жидкости с пропантом в трещине с неоднородным поперечным профилем концентрации частиц. В ходе исследования были получены реалистические зависимости продольного градиента давления: продольный градиент может как убывать, так и возрастать с уменьшением ядра течения.

При решении задачи о миграции частиц при течении разреженной суспензии в трещине двухконтинуальный подход позволил провести аналогию с течением запыленного газа, несмотря на различие отношений плотностей фаз, что позволило установить формирование складок в среде частиц.

Значительным достижением диссертационной работы А.А. Осипцова для создания более совершенных и научно обоснованных алгоритмов моделирования фильтрационных процессов в трещине следует признать разработку многоконтинуальной модели фильтрации суспензии в плотной упаковке, состоящей из частиц пропанта, представленной в четвертой главе. Численный алгоритм решения задачи был тщательно протестирован: произведена верификация на решениях, полученных методом характеристик для задачи о кольматации, проведено сравнение с многочисленными данными лабораторных исследований по определению профиля концентрации взвешенных и осажденных частиц. Необходимость в создании новой модели была продиктована тем, что в классических моделях не учитывается уменьшение величины проницаемости пористой среды, образованной осажденными частицами, по сравнению с проницаемостью пористой среды в исходном состоянии.

Построение степенной аппроксимации зависимости проницаемости от пористости было получено на основе сравнения расчетов проницаемости различных модельных пространственно-периодических упаковок методом решёточных уравнений Больцмана с экспериментальными данными.

Для исследования нестационарных газожидкостных течений в скважине после гидроразрыва пласта предложена комбинированная математическая модель, состоящая из многоконтинуального подхода и модели дрейфа, что позволяет исследовать течения с произвольным количеством фаз и компонент с учетом межфазных взаимодействий. Последовательное обоснование данного подхода приведено в пятой главе диссертации. Там же проведён анализ гиперболичности многожидкостной модели, на основе которого предложено замыкание, обеспечивающее гиперболичность в заданном диапазоне изменения параметров задачи, характерных для приложений.

Все выводы по диссертации сопровождаются данными численных исследований в сопоставлении с результатами экспериментов и исследований других авторов, количественными оценками, определением конкретных значений параметров задач и установленными пределами их изменения, при которых тот или иной эффект оказывал существенное влияние на рассматриваемый процесс, что свидетельствует об обоснованности выводов и научных положений.

Оценка новизны и достоверности полученных результатов

Основным научным результатом диссертации является семейство моделей механики многофазных сред, отражающих процессы, сопровождающие гидроразрыв пласта. При этом автор преодолел рамки целого ряда общепринятых упрощающих гипотез и доказал значимость и обоснованность необходимости построения новых моделей исходя из более широких допущений.

Семейство моделей включает нижеследующие составляющие, соответствующие рассмотренным и решённым новым задачам.

1. Двухконтинуальная модель течения суспензии в трещине гидроразрыва.

Применение данной модели к решению задачи о течении суспензии в тонкой вертикальной трещине гидроразрыва позволило установить дополнительное слагаемое, содержащее объёмную долю и скорость осаждения частиц, то есть учитывающее двухскоростные эффекты, и, в итоге, существенно уточнить закономерности процесса переноса проппанта.

При описании гидродинамической неустойчивости Сэфмана-Тэйлора удалось выявить некоторые качественные особенности её развития, например: увеличение отношения вязкостей приводит к увеличению длины проникновения «пальцев» в ньютоновских жидкостях, а при уменьшении отношения вязкостей происходит увеличение ширины области проникновения вытесняющей жидкости в вязкопластическую.

Представляет интерес вывод о том, что в отсутствии неустойчивости на интерфейсе зона псевдозатвердевания не формируется и вязкопластическая жидкость ведёт себя как ньютоновская. Кроме того, установлено, что увеличение числа Бингама приводит к увеличению степени взаимного влияния «пальцев».

2. Модель миграции частиц в трещине гидроразрыва.

Математическая модель миграции частиц в трещине построена с учетом трёх существенно отличающихся линейных масштабов, соответствующих, в порядке убывания, высоте трещины, её ширине и характерному размеру частиц. Модельные представления предусматривают решение во внутренней области на масштабе радиуса частицы и во внешней области на озееновском масштабе. В этом случае естественно применение метода сращиваемых асимптотических разложений. Следует отметить, что новизна постановки задачи о нахождении боковой подъемной силы, действующей на одиночную частицу в сдвиговом потоке вязкой жидкости, состоит в том, что скорость проскальзывания частицы перпендикулярна плоскости, в которой определены вектор скорости жидкости и её градиент. В ходе численных исследований установлено, что боковая сила, действующая на частицу, всегда направлена от стенок к центру канала, максимум этой силы достигается на стенке канала, а в центре канала она равна нулю.

Вычислительный эксперимент продемонстрировал, что при движении суспензии возможно пересечение траекторий частиц, что ведёт к кумуляции частиц на некотором удалении от стенок, в то же время пристеночная область оказывается свободной от частиц.

Учёт неоднородного поперечного профиля концентрации частиц, формирующегося за счёт миграции частиц к центральной плоскости трещины, позволил сделать существенный для практических приложений вывод о том, что с увеличением интенсивности поперечной миграции глубина проникновения частиц в трещину увеличивается по сравнению со случаем равномерного распределения.

3. Трехконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде.

Особый интерес представляет решение задачи о фильтрации суспензии в трещине, заполненной гранулированным материалом, например, пропантом. Дело в том, что в известных моделях об осаждении частиц в гранулированных средах не учитывается образование пористой среды осажденными частицами. Причем с меньшей проницаемостью, чем проницаемость гранулированной среды. Естественно, что фильтрация через образованную пористую среду также не учитывается. В соответствии с представленной математической моделью удалось добиться удовлетворительного соответствия расчетных и экспериментальных результатов по определению концентрации осажденных частиц по глубине их проникновения.

4. Новая безразмерная степенная зависимость проницаемости от пористости.

В четвёртой главе получена весьма ценная для расчетной практики зависимость, связывающая пористость среды из пространственно-периодических смешанных упаковок частиц с отношением проницаемости к квадрату эквивалентного радиуса частиц. Определён также диапазон изменения пористости, при котором зависимость с высокой точностью аппроксимирует экспериментальные данные. Новая зависимость получена на основе серии численных расчетов течения в плотной упаковке частиц с помощью метода решеточных уравнений Больцмана.

5. Комбинированная квазиодномерная модель для нестационарных газожидкостных течений в длинных скважинах и трубопроводах.

Общепринятой моделью для исследования течений двухфазных сред считается модель дрейфа, предложенная впервые Зубером (N. Zuber et al, 1964-1966). При этом данная модель широко используется и в современных коммерческих программных продуктах.

Однако в последнее время в коммерческие симуляторы стали внедряться и модели, построенные в рамках многожидкостного подхода (в частности, благодаря усилиям автора диссертации). В контексте установления связи между двумя подходами была поставлена задача о строгом выводе модели дрейфа из более общих соображений, описываемых в механике многофазных сред. Вывод

уравнений сопровождался учётом и оценкой вклада всех видов межфазных взаимодействий в приближении «длинного канала».

Обобщённая одномерная модель для течения некоторого конечного числа жидкостей была сформулирована для осреднённых по сечению скважины величин. В итоге была представлена комбинированная модель многофазного течения в скважине с произвольным количеством фаз, объединяющая достоинства многожидкостного подхода и, в случае допустимых упрощений, модели дрейфа. Для наглядности и удобства компьютерной реализации структура комбинированной модели была представлена в виде графа.

Важным теоретическим достижением исследований в пятой главе диссертации стало установление безразмерного условия, обеспечивающего гиперболичность исходной системе для несжимаемых сред с учётом градиента уровня жидкой фазы

Представленный анализ наглядно демонстрирует, что полученные в диссертационной работе научные результаты, являются новыми и практически значимыми. Особенный интерес при оценке всей работы представляет её комплексный характер с чётко заданным направлением на создание современной теоретической базы для разработки компьютерных симуляторов, предназначенных для обеспечения эффективных технологий проведения гидроразрыва пласта.

Достоверность полученных результатов обеспечивается, прежде всего, применением математических моделей, основанных на фундаментальных законах сохранения; тщательным тестированием применяемых алгоритмов; сопоставлением с экспериментальными данными и результатами исследований других авторов.

Практическая значимость

Построенные в диссертационной работе модели многофазных течений в трещине ГРП и скважинах будут, несомненно, востребованы и, насколько известно оппоненту, уже используются при создании отечественного программного обеспечения для дизайна и планирования работ по гидроразрыву пласта. О широком признании практической значимости результатов также говорит значительное количество опубликованных статей в журналах из перечня ВАК и трудах представительных конференций, индексируемых в системах Scopus и Web of Science, а также 6 полученных автором патентов на изобретения, в том числе в США.

Замечания по работе и дискуссионные моменты

1. Жидкости гидроразрыва, обычно применяемые в технологиях добычи углеводородного сырья, содержат полимерные добавки, что значительно усложняет их реологические свойства. В частности, вязкость жидкости может сильно меняться в рабочем диапазоне изменения температуры в системе жидкость-пласт. В диссертации представлены исследования лишь изотермических течений. Было бы целесообразным привести

оценки о степени влияния температурного фактора на протекание процессов, связанных с добычей углеводородного сырья. Возможно ли проявление тепловых эффектов, связанных с зависимостью вязкости от температуры при вытеснении жидкостей?

2. В качестве одного из важных диагностических показателей оценки динамической связи в системе скважина-пласт используется хаммер-эффект (hammer-effect), очевидно являющийся проявлением нестационарных процессов, моделированию которых посвящена пятая глава диссертации. Возможно ли применение разработанной математической модели для исследования этого интересного явления?
3. В заключительном пункте второй главы (с. 89) содержится нетривиальный вывод: «в отсутствии неустойчивости (Сэфмана-Тэйлора) на интерфейсе зоны псевдозатвердевания не формируются и, следовательно, бингамовская жидкость ведёт себя как ньютоновская». Было бы желательным сопроводить данный вывод, сделанный на основании модельных расчетов, пояснением физического содержания.
4. В основных результатах по третьей главе (с. 180) есть вывод об «...аккумуляции частиц на двух плоскостях (кольце) на некотором расстоянии от стенок, с формированием пристеночных слоёв без частиц». Возможен ли указанный эффект при учёте проницаемости стенок трещины? Насколько повлияет проницаемость стенок на явление аккумуляции?
5. Полагаю, что список использованной литературы было бы целесообразным представить в алфавитном порядке.
6. В ряде случаев нарушен порядок следования рисунков за их упоминанием в тексте диссертации.

Общие выводы по диссертации

Оценивая диссертационную работу в целом, можно утверждать, что полученные результаты являются новыми, достоверными и представляют несомненный научный интерес. Результаты исследования следует расценивать как значительный вклад в развитие механики многофазных сред и методы математического моделирования задач гидродинамики.

Содержание диссертации в достаточной степени отражено в публикациях автора, включая их достаточное число в изданиях, рекомендованных ВАК для представления материалов к защите докторских диссертаций, результаты работы многократно обсуждались на российских и международных научных конференциях, а практическая значимость результатов подтверждена патентами.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Диссертационная работа представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором

исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в механике многофазных сред. Указанные замечания не отражаются на общей положительной оценке этой работы.

Диссертационная работа «Модели механики многофазных сред для технологии гидроразрыва пласта» соответствует требованиям пп. 9-11, 13, 14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Андрей Александрович Осипцов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы,
профессор, главный научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова
Уфимского научного центра
Российской академии наук, г. Уфа.
Урманчиев Саид Федорович

27.11.2017

Почтовый адрес: 450054, г. Уфа, проспект Октября, 71

Телефон: +7-927-233-99-02

Электронная почта: said@anrb.ru

Подпись Урманчиева С.Ф. заверяю:



Учёный секретарь ИМех УНЦ РАН, к.ф.м.н. Рафикова Г.Р.