

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

31.10.2017 № ИПМех/01-2141.2-548

На № \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ИПМех РАН

академик РАН



**ОТЗЫВ**

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН на диссертационную работу **Осипова 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 диссертации.** В настоящее время одной из основных и наиболее эффективных технологий повышения добычи на нефтяных и газовых скважинах является технология гидравлического разрыва нефтегазоносного пласта, основанная на закачке жидкости с твердыми частицами проппанта (расклинивающего агента) под большим давлением (несколько сотен атмосфер) через скважину для создания трещин в пористой среде. После завершения закачки трещины, заполненные плотно упакованным гранулированным материалом, создают каналы высокой проницаемости для транспортировки углеводородов из глубин пласта к скважине и на поверхность. Скважины могут быть как вертикальными, так и околоризонтальными с несколькими кластерами перфораций, обеспечивающих доступ из скважины к породе (так называемый многостадийный гидроразрыв пласта, как правило, используемый в низкопроницаемых породах). В настоящее время до 85% прироста добычи

нефти в России обеспечивается за счет применения технологии ГРП. В горизонтальных скважинах, доля бурения которых за последние годы существенно возросла, применяется многостадийный гидроразрыв, при котором создается не одна, а несколько трещин, что приводит к существенному повышению нефтеотдачи. В связи с этим повышается технологическая сложность операций. Еще одной тенденцией является все более активное освоение запасов нефти и газа, относящихся к категории трудноизвлекаемых, где помимо сложности самих технологических операций, дополнительные ограничения и риски приносит геологическая обстановка. В связи с этим в последнее время существенно повышается потребность в наукоемких решениях для проведения высокоточных инженерных расчетов с помощью компьютерных симуляторов, используемых при проектировании и сопровождении работ по гидроразрыву.

Несмотря на значительную историю развития математических моделей для описания процессов, сопровождающих гидроразрыв пласта (начиная с классических работ С.А. Христиановича, Ю.П. Желтова, Г.И. Баренблатта, В.М. Ентова и др.), именно гидромеханические аспекты указанных моделей остаются наименее разработанными. В симуляторах гидроразрыва для описания многофазных течений, как правило, используются упрощенные гидравлические модели, основанные на моделях односкоростных «эффективных» сред. Поэтому диссертация А.А. Осипцова, посвященная развитию и обоснованию многоконтинуальных моделей для описания многофазных течений на различных этапах применения технологии гидроразрыва пласта, включая закачку суспензии в трещину, фильтрацию в закрытой трещине и газожидкостные течения в скважинах в процессе очистки и вывода скважины на добычу, несомненно является актуальной и современной.

**Новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Несомненным достоинством диссертации является широкий круг рассмотренных проблем, важных для понимания и управления процессом гидроразрыва пласта. Автор

продемонстрировал владение разнообразными методами анализа – от тонких асимптотических подходов и метода сращиваемых асимптотических разложений до современных конечно-разностных методов и метода решеточного уравнения Больцмана. Существенным положительным моментом является строгость математических формулировок рассмотренных задач, основанных на законах сохранения в рамках модели взаимопроникающих континуумов, анализ параметров подобия исследуемых процессов, границ применимости полученных решений, а также, где это возможно, сравнение с экспериментальными данными. Наиболее существенными научными результатами, полученными в диссертации, являются следующие:

1. Для моделирования закачки и размещения проппанта в трещине построена квазидвумерная двухконтинуальная модель транспорта проппанта в трещине с учетом двухскоростных эффектов. Проведено обобщение модели с учетом предела текучести несущей фазы (реологическая модель Бингама), а также наличия нескольких последовательно закачиваемых жидкостей. Проведено систематическое исследование влияния поперечной миграции частиц на распределение проппанта в трещине гидроразрыва.
2. Для течения в закрытой трещине во время очистки после гидроразрыва пласта проведено численное моделирование фильтрации через упаковку несферических частиц проппанта и получена новая зависимость проницаемости от пористости в широком диапазоне изменения пористости.
3. Построена новая многоконтинуальная модель фильтрации суспензии в пористой среде, которая описывает процесс очистки трещины гидроразрыва заполненной гранулированным материалом. В силу универсальности модель также может быть использована для описания утечки бурового раствора в пласт при бурении (с сопутствующим загрязнением и кольматацией прискважинной зоны), фильтрации воды в окрестности нагнетательных скважин с кольматацией, что приводит к снижению приемистости нагнетательных скважин.
4. Построена комбинированная модель многофазного течения в скважине в процессе очистки после гидроразрыва и вывода скважины на в

эксплуатационный режим. Новым элементом является обоснование модели дрейфа и строгий вывод данной модели из законов сохранения с определением строгих границ применимости подхода на основе использования асимптотических методов, а также анализ областей гиперболичности построенных моделей.

По совокупности данные результаты составляют семейство согласованных моделей механики многофазных сред, равномерно покрывающих все стадии реализации технологии гидроразрыва пласта.

Все перечисленные выше основные результаты диссертации являются **новыми** и представляют значительный научный интерес для фундаментальной и прикладной гидродинамики. **Достоверность** полученных результатов обеспечена четкостью и строгостью математических постановок задач, последовательным применением асимптотических методов для вывода уравнений из законов сохранения механики сплошных сред в многоконтинуальном приближении, использованием надежных численных методов, детальной верификацией получаемых численных результатов, а также сравнением полученных результатов с известными точными решениями и лабораторным данными.

**Значимость полученных результатов для науки и практики.** Построенное в диссертационной работе семейство моделей по сути открывает новое направление в моделировании многофазных течений на основе строгого многоконтинуального подхода, что позволяет сделать существенный шаг вперед по сравнению с распространенными полуэмпирическими и эвристически постулированными моделями в приближении эффективной среды. Говоря о практической значимости, стоит отметить, что результаты диссертации могут быть использованы на производственных предприятиях нефтегазовой отрасли при создании симуляторов для дизайна и контроля применения технологии гидроразрыва пласта.

### **Замечания по работе и дискуссионные моменты:**

1. Используемые на практике гидроразрывные жидкости бывают химически и механически нестабильными, поэтому при построении модели транспорта пропанта в трещине гидроразрыва пласта автору следовало бы оценить возможность реализации и влияние химической и механической деградации гидроразрывной жидкости (сшитого геля) за время гидроразрыва.
2. В диссертации не обсуждается роль эффектов неизотермичности рассматриваемых течений, хотя в развиваемых автором моделях, в принципе, имеется возможность учета указанных эффектов, приводящих к вариациям коэффициентов переноса гидроразрывной жидкости.
3. Некоторые разделы диссертации, в частности, раздел, посвященный применению метода решеточного уравнения Больцмана, изложены слишком кратко, без обсуждения деталей численного алгоритма и реализации используемых методов.
4. Недостаточное внимание уделено новым перспективным жидкостям гидроразрыва, таким, как, например, суспензии с добавками синтетических волокон.

**Заключение по работе.** Сделанные замечания ни в коей мере не умаляют достоинств представленной диссертации и не снижают ее высокой оценки. Диссертация Осипцова А.А. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. Все полученные в диссертации результаты объединяет единство приложения – технология гидроразрыва пласта, и единство методов исследования – многоконтинуальный подход при формулировке базовых моделей многофазных течений и строгие асимптотические подходы для моделей упрощенных.

Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном числе примеров и расчетов в пространстве параметров соответствующих задач. Следует отметить глубокое

понимание автором деталей процесса гидроразрыва пласта. Кроме того, производит впечатление внушительный список крупных международных конференций и научных семинаров, на которых обсуждались результаты работы.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы для развития механики многофазных сред и при создании симуляторов гидроразрыва пласта для повышения нефтедобычи.

Материалы диссертационной работы могут быть востребованы в РГУНГ им. И.М. Губкина, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, ИМех МГУ им. М.В. Ломоносова, ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ИГ им. М.А. Лаврентьева СО РАН, ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, ИММ КазНЦ РАН, Физико-техническом институте, а также в других академических институтах, вузах и НИИ нефтегазового профиля. Результаты диссертационной работы могут быть также использованы (и, отчасти, уже используются) в отраслевых научно-технических организациях, таких как ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ООО «Газпромнефть Научно-Технический Центр», ООО «Роснефть-УфаниПИНефть», ООО «Лукойл-Инжиниринг», ООО «Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым». Материалы диссертации могут быть полезны для модернизации университетских учебных курсов по гидродинамике, механике многофазных сред и теоретическим основам технологических процессов.

Основные результаты диссертации достаточно полно изложены в 24 статьях в журналах перечня ВАК и в англоязычных изданиях, индексируемых в системах Scopus и Web of Science.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Диссертация и автореферат аккуратно оформлены, число замеченных опечаток незначительно.

Работа обсуждена и положительно оценена на Семинаре «Прикладная механика сплошных сред» (рук. д.ф.-м.н. А.Н. Рожков) Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН.

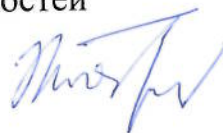
Диссертационная работа соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. Можно констатировать, что диссертация А.А. Осипцова есть научно-квалификационная работа, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в механике многофазных сред, связанное с развитием моделей многофазных течений применительно к описанию гидроразрыва пласта. Автор диссертации, Осипцов Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Ведущий научный сотрудник  
Лаборатории механики сложных жидкостей  
ИПМех РАН  
д.ф.-м.н., доцент



В.А. Калиниченко

Ведущий научный сотрудник  
Лаборатории механики сложных жидкостей  
ИПМех РАН  
д.ф.-м.н., профессор



Э.В. Теодорович

Старший научный сотрудник  
Лаборатории механики сложных жидкостей  
ИПМех РАН  
д.ф.-м.н.



А.В. Базилевский