

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по исследованиям и разработкам

С. Н. Гаричев

«2019»

2019 г.

М. П.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Диссертация «Численное моделирование многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальной скважине» выполнена на кафедре прикладной механики Московского физико-технического института (государственного университета), Министерства образования и науки Российской Федерации.

В период подготовки диссертации с 2014 г. по настоящее время соискатель Буденный Семен Андреевич является аспирантом кафедры прикладной механики МФТИ. В 2014 г. он окончил Новосибирский Национальный Исследовательский Государственный Университет по направленности «Физика кинетических явлений».

Сдача кандидатских экзаменов подтверждается справкой об обучении, выданной в 2018 г. в Московском физико-техническом институте (государственном университете).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Директор Дирекции по технологиям Публичного акционерного общества «Газпром нефть», Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-Технический Центр» Хасанов Марс Магнавиевич.

По итогам обсуждения диссертации «Численное моделирование многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальной скважине» **принято следующее заключение.**

**Тема диссертации является актуальной,** поскольку основную долю успешности планирования дизайна многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальных скважинах определяет физико-математическая модель инструмента, на базе которого осуществляется планирование дизайна. В свою очередь, несмотря на большое количество подходов к численному моделированию гидроразрыва на сегодняшний день не существует единой общей принятой физико-математической модели, способной связно описать в полной мере все ключевые процессы, протекающие при гидроразрыве при разумных физических допущениях: разрушение породы с неоднородными механическими (упруго-прочностными) свойствами, массоперенос смеси неньютоновской жидкости и твердой фазы в канале трещины.

### **Цели и задачи диссертации**

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов и программного комплекса для анализа многостадийного гидроразрыва пласта. Для достижения поставленной цели автором диссертации решены следующие задачи:

- разработка математической модели и численных алгоритмов для моделирования многостадийного гидроразрыва пласта в рамках модели РЗД – моделирование процессов течения смеси жидкости неньютоновской степенной реологии и дисперсной твердой фазы

в каналах трещин ГРП и в стволе скважины с переменной площадью сечения и произвольного пространственного профиля, роста трещин в неоднородном геологическом разрезе согласно силовому критерию разрушения с учетом вязкостной диссипации энергии, а также взаимного влияния трещин друг на друга за счет индуцированного напряжения;

- апробация реализованных алгоритмов, реализация программного комплекса на базе разработанных численных алгоритмов, позволяющего проводить моделирование дизайна МГРП в стволе скважины путем задания произвольного режима закачки на устье скважины (месте пересечения скважиной земной поверхности), различных типов проппанта и жидкостей, геомеханического разреза с произвольным количеством слоёв, а также пространственного профиля скважины с произвольным количеством стадий ГРП и точек инициации трещин в каждой из них;
- применение разработанного программного комплекса для решения прикладных задач: анализа влияния эффекта концевой экранировки на профиль закрепленной проппантом трещины, анализа влияния вязкостной диссипации на прорыв в перекрывающие слои в геологическом разрезе, анализа эффекта интерференции на закрепленный профиль трещины и ее траекторию распространения.

#### ***Основные результаты диссертации:***

- В рамках кусочно-заданной псевдотрехмерной модели трещины ГРП представлена физико-математическая формализация и построен численный алгоритм для моделирования многостадийного гидроразрыва пласта в стволе горизонтальной скважины – связанного расчета процессов массопереноса смеси жидкости неньютоновской реологии и проппанта в стволе скважины и каналах трещин ГРП, роста трещин согласно силовому критерию разрушения в неоднородном геологическом разрезе с учетом взаимного влияния друг на друга.
- Построены вычислительные алгоритмы позволяют в отдельности и в совокупности проводить: анализ влияния эффекта концевой экранировки на профиль закрепленной проппантом трещины, анализ влияния вязкостной диссипации на прорыв в перекрывающие слои в геологическом разрезе, анализ эффекта интерференции на закрепленный профиль трещины и ее траекторию распространения в породе, анализ режимов закачки, свойств несущей и дисперсной фаз на динамику роста трещин.
- На базе созданного подхода к моделированию МГРП реализован инженерный программный комплекс, позволяющий проводить оценку эффективности применения технологии МГРП в стволе горизонтальной скважины. Реализованный программный комплекс позволяет задавать произвольный режим закачки на устье скважины, различные типы проппанта и жидкости, геомеханический разрез с произвольным количеством слоёв, а также пространственный профиль скважины с произвольным количеством стадий МГРП и точек инициации трещин в каждой из них.

#### ***Научная новизна работы:***

- Предложено расширение классической модели ГРП РЗД до модели, учитывающей неявно вязкостную диссипацию энергии в процессе роста трещины в геологическом разрезе, неоднородном по упруго-прочностным свойствам, путем ввода эффективного коэффициента трещиностойкости.
- Предложен подход расщепления геомеханической и гидродинамической задач, обоснованный наличием временной разномасштабности процессов формирования квазиравновесной трещины (характерные скорости распространения порядка скорости звука в среде) и конвективного массопереноса в канале трещины процесс разрушения породы рассматривается в статической постановке.

- Реализован комплексный подход, позволяющий решать совместно задачи упругости и разрушения в породе с неоднородным геологическим разрезом, массопереноса смеси жидкости неньютоновской реологии и дисперсной фазы в канале трещины и в стволе скважины, а также взаимного влияния трещин друг на друга за счет индуцированных напряжений.

*Практическая ценность* состоит в том, что полученные результаты диссертации позволяют решать прикладные задачи нефтяного инжиниринга в разрезе ГРП:

- Учет вязкостной диссипации энергии при вертикальном росте трещины позволяет разрешить проблему завышения рисков прорыва трещины ГРП во внешние слои и, как следствие, определить подходящие условия и обосновать строительство дополнительных скважин на участках пластов, содержащих газовые шапки и подстилающую воду.
- Учет интерференции трещин позволяет планировать расстояние между кластерами перфораций внутри одной скважины, а также совместно планировать МГРП для нескольких рядом расположенных горизонтальных скважин (технология "zipper frac").
- Эффект концевого экранирования совместно с подбором режима закачки рабочей смеси жидкости и проппанта, а также реологических свойств несущей фазы позволяет контролировать геометрию трещины и, как следствие, контролировать эффективную площадь контакта трещины ГРП, закрепленной проппантом, и целевого слоя в геологическом разрезе.
- Зачастую система поддержания постоянного пластового давления заводнением требует подачи расхода воды на нагнетательных скважинах под давлением, неизбежно ведущим к образованию трещин авто-ГРП. В условиях низкой проницаемости коллектора (когда давление в канале трещины стравливается за счет фильтрации закачки жидкости в пласт) имеют место риски достижения трещин авто-ГРП скважин добывающего фонда. Определение условий формирования трещин авто-ГРП возможно с применением реализованных в работе алгоритмов.
- Путем переноса рассчитанной системы трещин в гидродинамическую модель месторождения предоставляется возможность в оценке эффективности дизайна МГРП с точки зрения дисконтированной накопленной добычи.

*Достоверность результатов*, полученных в диссертационной работе, обусловлена решением уравнений неразрывности фаз и сохранения моментов импульса, использованием обоснованных замыкающих соотношений, наиболее часто встречающихся в научной литературе, а также подтверждающимися практикой в нефтегазовой индустрии при планировании и проведении работ по гидроразрыву пласта. Численные решения проверены на сходимость и сохранение материального баланса. Валидация численного решения также проводилась путем сравнения с результатами аналитических и полуаналитических решений, а также с результатами, полученными в статьях сторонних авторов.

*Материалы диссертации опубликованы автором достаточно полно* в следующих работах:

1. **Budennyu, S.A.** Pseudo 3D hydraulic fracturing model with account for vertical viscous dissipation / R.N. Nikitin, D.A. Mitrushkin, V.O. Demo // XLV International Conference "Advanced Problems in Mechanics", June 22-27, 2017, St. Petersburg, Russia. Book of Abstracts. / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. - St. Petersburg, 2016. P.109-114.
2. **Буденный С.А.** Связанное решение задачи роста трещины гидроразрыва пласта и течения неньютоновской жидкости и проппанта в канале трещина / Р.Н. Никитин, А.В.

Бочкарев // 59 Научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 21-26 ноября, 2016): тезисы докладов / Московский Физико-технический институт. - Долгопрудный, 2016. - С. 1-3.

3. **Budennyy, S.A.** An Enhanced Pseudo-3D Model of Hydraulic Fracture in Multi-Layered Formation // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. - Society of Petroleum Engineers, October 9-1, 2017, San Antonio, United States. Conference paper. - San Antonio, 2017.
4. Bochkarev, A.V. Optimization of multi-stage hydraulic fracturing design in conditions of Bazhenov formation / **S.A. Budennyy**, R.N. Nikitin, D.A. Mitrushkin, A.A. Erofeev, V.V. Zhukov // Oil Industry Journal, 2017(03), 50-53.
5. Гончар Р.П. Моделирование течения смеси рабочей жидкости и проппанта по стволу скважины и роста трещин гидроразрыва пласта / Р.М. Сидтиков, **С.А. Буденный**, А.В. Бочкарев, Р.Н. Никитин // 59 Научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 21-26 ноября, 2016): тезисы докладов / Московский Физико-технический институт. - Долгопрудный, 2016. - С. 1-3.
6. Bochkarev, A.V. Pseudo-3D Hydraulic Fracture Model with Complex Mechanism of Proppant Transport and Tip Screen Out / **S.A. Budennyy**, R.N. Nikitin, D.A. Mitrushkin // XV European Conference on the Mathematics of Oil Recovery. - European Association of Geoscientists and Engineers, August 29 - September 1, 2016, Amsterdam, Netherlands. Conference paper. - Amsterdam, 2016.
7. **Буденный, С.А.** Моделирование многостадийного гидроразрыва пласта в низкопроницаемых неоднородных коллекторах баженовской свиты / А.В. Бочкарев, Р.Н. Никитин, А.А. Ерофеев, Д.А. Митрушкин, Б.В. Васекин, Д.Д. Филиппов, В.А. Кузнецов, В.О. Демо, И.А. Карпов // Совместный семинар EAGE/SPE 2017: "Наука о сланцах, проблемы разведки и разработки". - 10-11 апреля, 2017, Москва. Сборник тезисов.

*Личный вклад соискателя* в работах с соавторами заключается в следующем:

[1, 3] – реализация алгоритма неявного учета вязкостной диссипации энергии при росте трещины в рамках модели P3D; [2, 6, 7] – построение численной модели для связанного решения задачи роста трещины гидроразрыва пласта и течения неньютоновской жидкости и проппанта в канале трещина; [4, 5] – построение численной модели для связанного решения задачи роста нескольких трещин и гидравлики ствола скважины.

*Основные результаты работы* докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Научно-технический семинар компании ООО "Газпромнефть НТЦ" (Санкт-Петербург, 2015);
2. XV Европейская конференция по математике в нефтегазовой отрасли европейской ассоциации геоучёных и инженеров (EAGE) (Амстердам, 2016);
3. Петербургский международный газовый форум совместно с компанией ООО "Газпромнефть НТЦ" (Санкт-Петербург, 2016);
4. Техническая конференция общества инженеров-нефтяников (SPE) "ГРП в России: опыт и перспективы" (Москва, 2016);
5. Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE, на региональном конкурсе студенческих работ (Москва, 2016), где в секции аспирантов получено призовое 1-е место;
6. 59ая всероссийская научная конференция МФТИ, где в секции нефтегазового инжиниринга получено призовое 1-е место (Москва, 2016);
7. Совместный научно-технический семинар общества инженеров-нефтяников (SPE) и европейской ассоциации геоученных и инженеров (EAGE) на тему "Наука о сланцах: проблемы разведки и разработки" (Москва, 2017);
8. Ежегодная техническая конференция и выставка SPE АСТЕ, на международном конкурсе аспирантов (Сан-Антонио, США, 2017), заочное участие.

***Написанное программное обеспечение, содержащее ключевые результаты диссертации, имеет свидетельства о государственной регистрации***

1. №2018612491, Пользовательский интерфейс программы для моделирования и анализа многостадийного гидроразрыва пласта в условиях залежей баженовской свиты, дата регистрации: 16.02.2018;
2. №2018612499, Программа для моделирования роста псевдотрехмерной трещины при гидроразрыве пласта в многослойной литологии с учетом вязкостной диссипации энергии при вертикальном росте в условиях залежей баженовской свиты, дата регистрации: 19.02.2018;
3. №2018612319, Программа для моделирования формирования сети псевдотрехмерных трещин с учетом их взаимодействия и интерференции при многостадийном гидроразрыве пласта в многослойной литологии в условиях залежей трещиноватых коллекторов, дата регистрации: 15.02.2018;
4. №2016663638, Программа для ЭВМ с алгоритмами численного моделирования роста псевдотрехмерной трещины в трехслойной симметричной литологии, дата регистрации: 10.01.2017;
5. №2016662894, Программа для ЭВМ SET-FRAC;
6. №2016662418, Программа для моделирования роста псевдотрехмерных трещин в многослойной литологии и их интерференции при многостадийном гидроразрыве пласта.

Диссертация «Численное моделирование многостадийного гидроразрыва пласта в горизонтальной скважине» ***Буденного Семена Андреевича*** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности ***25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых***.

Заключение принято на заседании кафедры прикладной механики МФТИ. Присутствовало на заседании 19 человек. Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет. Протокол от 01 июля 2019 года.

Зам. зав. кафедрой  
прикладной механики МФТИ, к.ф.-м.н.



Березникова М.В.