**Соглашение о предоставлении субсидии:**

**№14.575.21.0146 от 26.09.2017 г.**

**Уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI57517X0146**

**Этап 2 с 01 января 2018 г. по 31 декабря 2018 г.**

**В результате выполнения работ по проекту на втором этапе:**

1. Разработана физико-математическая модель анизотропного слоистого пласта с естественными трещинами.
2. Разработан алгоритм расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения.
3. Разработана программа расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения.
4. Разработана физико-математическая модель пенного ГРП.
5. Разработана физико-математическая модель выноса проппанта.
6. Разработан алгоритм расчета трещины ГРП в рамках физико-математической полной трехмерной модели на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта.
7. Разработана физико-математическая модель учета температурных эффектов при моделировании ГРП.
8. Разработана методика тестирования программы расчета роста геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений.
9. Выполнено тестирование программы расчета геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений.
10. Выполнена корректировка программы расчета геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений.
11. Разработана физико-математическая модель мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта.
12. Разработана методика тестирования программы расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде.
13. Выполнено тестирование программы расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде.
14. Разработан алгоритм расчета геометрии трещины при пенном ГРП.
15. Разработан алгоритм расчета выноса проппанта.
16. Разработана программа расчета геометрии полностью трехмерных трещин.
17. Разработан алгоритм расчета геометрии трещины ГРП с учетом температурных эффектов при моделировании ГРП.
18. Разработан графический интерфейс для программных средств моделирования гидроразрыва пласта.
19. Разработан алгоритм интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования.
20. Разработана методика тестирования алгоритма интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования.
21. Разработан алгоритм расчета геометрии трещины с использованием функции Грина для слоистой среды и универсальных асимптотик для отслеживания фронта трещины ГРП для плоской трехмерной трещины ГРП с учетом контраста упругих модулей.
22. Разработан алгоритм расчета финальной формы трещины после остановки закачки с учетом переупаковки проппанта.
23. Разработана физико-математическая модель повторного ГРП.
24. Разработан алгоритм учета анизотропии и слоистости пласта при взаимодействии трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использования уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.
25. Разработан алгоритм генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.
26. Разработана физико-математическая модель сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений.
27. Разработана программа расчета геометрии трещины ГРП с использованием функции Грина для слоистой среды и универсальных асимптотик для отслеживания фронта трещины ГРП для плоской трехмерной трещины ГРП с учетом контраста упругих модулей.
28. Разработан алгоритм расчета геометрии трещины при проведении повторного ГРП.
29. Разработана программа генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.
30. Разработан алгоритм расчета сопряженного течения скважина- трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины.
31. Разработана методика тестирования алгоритма расчета сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины.

**Публикации по результатам выполнения проекта:**

1. On the Use of the Continuum Mechanics Methodfor Describing Interactions in Discrete Systemswith Rotational Degrees of Freedom. Иванова Е.А. DOI: 10.1007/s10659-018-9676-3/
2. Two-dimensional model for hydraulic fracturing wiyh foams. Антонов И.Д.
3. Correspondence principle for simulation hydraulic fractures by using pseudo 3D model. Марков Н.С.
4. Numerical models for hydraulic refracturing on vertical oil wells. Братов В.А.
5. Statistical Method For Tracing Hydraulic Fracture Front Without Evaluation Of The Normal. Степанов А.Д.
6. Temperature of rock formation and fracturing ﬂuid during the hydraulic fracturing process. Бабенков М.Б. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012076.
7. Чувствительность кривой падения давления во время гидравлического разрыва пласта к пороупругим эффектам. Кривцов А.М. DOI: 10.33048/semi.2018.15.143.
8. Оптимизация дизайна гидроразрыва пласта. Кривцов А.М. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012011.
9. Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине. Кривцов А.М. DOI: 10.33048/semi.2018.15.140.

**Создание результата интеллектуальной деятельности в процессе выполнения проекта. Полученные охранные документы:**

1. Программа для ЭВМ «Программа расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде на основе машинного обучения». Мурачев А.С., Цветков Д.В., Калюжнюк А.В., Осокина А.Е. Свидетельство о государственной регистрации № 2018665711 от 10.12.2018г.
2. Программа для ЭВМ «Программа расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде». Мурачев А.С., Цветков Д.В. Свидетельство о государственной регистрации № 2018666795 от 20.12.2018г.

**Диссертации на соискание ученых степеней, защищенных по результатам научных исследований и разработок:**

1. «Устойчивость и тепловые эффекты в кристаллических материалах при больших деформациях». Панченко А.Ю., Специальность 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела. Дата защиты 27.12.2018 г.

В результате работ 2 этапа:

1. Разработано 7 физико-математических моделей:

- Физико-математическая модель анизотропного слоистого пласта с естественными трещинами предназначена для описания пласта, состоящего из произвольного числа анизотропных упругих слоев, каждый из которых характеризуется своим тензором жесткости, трещиностойкостью, коэффициентом утечек и сжимающими напряжениями.

- Физико-математическая модель пенного ГРП предназначена для описания трещины гидроразрыва, распространяющейся симметрично относительно ствола скважины в одной плоскости под действием давления сжимаемой жидкости в слоистой линейно-упругой среде, состоящей из плоскопараллельных слоев, каждый из которых характеризуется модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, трещиностойкостью и коэффициентом утечек Картера, с учетом переноса проппанта и переменной скорости закачки жидкости гидроразрыва.

- Физико-математическая модель выноса проппанта. Физико-математическая модель выноса проппанта предназначена для моделирования дезинтеграции проппантной пачки в процессе добычи.

- Физико-математическая модель учета температурных эффектов при моделировании ГРП. Физико-математическая модель трещины ГРП с температурными эффектами предназначена для описания влияния температурных эффектов на трещину гидроразрыва, распространяющуюся симметрично относительно ствола скважины в одной плоскости под действием давления неньютоновской несжимаемой жидкости степенной реологии в слоистой линейно-упругой среде, состоящей из плоскопараллельных слоев, каждый из которых характеризуется модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, трещиностойкостью и коэффициентом утечек Картера, с учетом переменной скорости закачки жидкости гидроразрыва.

- Физико-математическая модель мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта. Модель мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта предназначена для описания распространения трещины мини-ГРП в пороупругой среде в условиях осевой симметрии.

- Физико-математическая модель модели повторного ГРП. Физико-математическая модель повторного ГРП предназначена для определения формы трещины гидроразрыва и ее ориентации относительно начальной трещины ГРП методом динамики частиц.

- Физико-математическая модель сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений. Физико-математическая модель сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины предназначена для описания динамических явлений при гидроразрыве пласта в том числе оценки роста давления по длине скважины в результате отражения и фокусировки волн давления.

1. Разработано 12 алгоритмов и 5 компьютерных программ:

- Алгоритм расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения. Алгоритм определения статической формы трещины, основанный на методах машинного обучения, определяет процедуру определения формы трещины заданного объема.

- Алгоритм расчета трещины ГРП в рамках физико-математической полной трехмерной модели на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта. Алгоритм расчета геометрии трещины ГРП с учетом слоистости пласта на основе метода динамики частиц описывает процедуру расчета геометрии трехмерной трещины ГРП на основе модели трехмерной трещины ГРП.

- Алгоритм расчета геометрии трещины при пенном ГРП. Алгоритм расчета геометрии трещины ГРП при проведении пенного ГРП определяет процедуру расчета геометрии трещины ГРП и давления внутри трещины на основе модели пенного ГРП.

- Алгоритм расчета выноса проппанта. Алгоритм расчета выноса проппанта определяет процедуру расчета параметров проппантной пачки в трещине ГРП на основе модели выноса проппанта.

- Алгоритм расчета геометрии трещины ГРП с учетом температурных эффектов при моделировании ГРП. Алгоритм учета температурных эффектов при расчете геометрии трещины ГРП в модели определяет процедуру расчета поля температуры внутри трещины ГРП и его влияния на реологические свойства жидкости гидроразрыва на основе модели учета температурных эффектов при расчете геометрии трещины ГРП.

- Алгоритм интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования. Алгоритм интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования с учетом порового давления описывает процедуру многопараметрической оптимизации для минимизации целевой функции — отклонения наблюдаемых данных от результатов численного моделирования и определения пластовых условий (сжимающие напряжения, коэффициент утечек).

- Алгоритм расчета геометрии трещины с использованием функции Грина для слоистой среды и универсальных асимптотик для отслеживания фронта трещины ГРП для плоской трехмерной трещины ГРП с учетом контраста упругих модулей.

- Алгоритм расчета финальной формы трещины после остановки закачки с учетом переупаковки проппанта. Алгоритм определения финальной формы трещины после остановки закачки определяет процедуру расчета геометрических характеристик трещины после остановки закачки.

- Алгоритм учета анизотропии и слоистости пласта при взаимодействии трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использования уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин. Алгоритм учета анизотропии и слоистости пласта при взаимодействии трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин определяет процедуру расчета геометрии трещин ГРП/МГРП на основе модели взаимодействия трещин ГРП/МГРП с естественной сетью трещин с учетом анизотропии пласта с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.

- Алгоритм генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП. Алгоритм основан на физико-математической модели микросейсмических событий при распространении трещины ГРП и предназначен для описания микросейсмических явле-ний, возникающих при распространении

- Алгоритм расчета геометрии трещины при проведении повторного ГРП. Алгоритм описания геометрии трещины ГРП при проведении повторного ГРП определяет процедуру расчета геометрии трещины на основе модели повторного ГРП.

- Алгоритм расчета сопряженного течения скважина- трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины. Алгоритм расчета сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины предназначен для анализа реакции скважины с трещиной на происходящие в ней нестационарные процессы, интерпретации пластовых условий и параметров трещины и определения возможности фокусировки волн и воздействия нестационарных процессов на развитие трещины ГРП.

- Программа расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения. Программа разработана на основе алгоритма расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения и определяет процедуру определения формы трещины заданного объема.

- Программа расчета геометрии полностью трехмерных трещин. Программа основана на основе алгоритма расчета геометрии трещины ГРП с учетом слоистости пласта на основе метода динамики частиц и описывает процедуру расчета геометрии трехмерной трещины ГРП на основе модели трехмерной трещины ГРП.

- Программа расчета геометрии трещины ГРП с использованием функции Грина для слоистой среды и универсальных асимптотик для отслеживания фронта трещины ГРП для плоской трехмерной трещины ГРП с учетом контраста упругих модулей. расчета геометрии трещины с использованием функции Грина для слоистой среды и универсальных асимптотик для отслеживания фронта трещины ГРП для плоской трехмерной трещины ГРП с учетом контраста упругих модулей определяет процедуру расчета геометрии трещины ГРП и давления внутри трещины на основе модели трещины ГРП с учетом слоистости пласта с использованием функции Грина для слоистой среды, универсальных асимптотик для отслеживания фронта и явного метода интегрирования.

- Программа генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП. Программа описывает микросейсмические явления, возникающие при распространении трещины ГРП.

- Графический интерфейс для программных средств моделирования гидроразрыва пласта. Графический интерфейс предназначен для наглядной и более удобной работы с другими модулями программных средств моделирования гидроразрыва пласта, задания для них входных данных, обработка полученных результатов.

3. Разработано 3 методики тестирования программ и алгоритмов:

- Разработана методика тестирования программы расчета роста геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений. На основе разработанной методики проведено тестирование программы, по результатам которого была проведена корректировка программы расчета геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений.

- Разработана методика тестирования алгоритма интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования. На основе разработанной методики на Этапе 3 будет проведено тестирование и корректировка алгоритма интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта.

- Разработана методика тестирования алгоритма расчета сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины. На основе разработанной методики на Этапе 3 будет проведено тестирование и корректировка алгоритма расчета сопряженного течения скважина-трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины