**Соглашение о предоставлении субсидии:**

**№14.575.21.0146 от 26.09.2017 г.**

**Уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI57517X0146**

**Этап 3 с 01 января 2019 г. по 31 декабря 2019 г.**

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

1. Проведены расчеты генерации микросеймических событий при распространении трещины ГРП;
2. Разработана программа расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин;
3. Разработана методика тестирования программы расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения;
4. Проведено тестирование программы расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения;
5. Разработана программа расчета геометрии трещины при пенном ГРП;
6. Разработана программа расчета выноса проппанта из трещины ГРП;
7. Разработана методика тестирования алгоритма расчета геометрии трещины ГРП с учетом слоистости пласта на основе метода динамики частиц;
8. Проведено тестирование алгоритма расчета геометрии трещины ГРП с учетом слоистости пласта на основе метода динамики частиц;
9. Проведено тестирование алгоритма интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования;
10. Разработана программа многопараметрической оптимизации для интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта на основе прямого численного моделирования;
11. Разработана методика тестирования программы многопараметрической оптимизации для интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта на основе прямого численного моделирования;
12. Разработана методика экспресс-оценки геометрии трещины гидроразрыва на основе обобщения (графики, палетки, формулы) результатов компьютерного моделирования;
13. Разработана методика тестирования алгоритма расчета геометрии трещины при пенном ГРП;
14. Проведено тестирование алгоритма расчета геометрии трещины при пенном ГРП;
15. Разработана методика тестирования алгоритма расчета выноса проппанта;
16. Проведено тестирование алгоритма расчета выноса проппанта;
17. Разработана методика тестирования алгоритма расчета трещины ГРП в рамках физико-математической полной трехмерной модели на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта;
18. Проведено тестирование алгоритма расчета трещины ГРП в рамках физико-математической полной трехмерной модели на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта;
19. Проведена корректировка алгоритма интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта по данным прямого численного моделирования;
20. Проведено тестирование программы многопараметрической оптимизации для интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта на основе прямого численного моделирования;
21. Проведена корректировка программы многопараметрической оптимизации для интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта на основе прямого численного моделирования;
22. Разработаны рекомендации по использованию результатов ПНИ в дальнейших исследованиях и разработках;
23. Проведено обобщение результатов работ ПНИ;
24. Разработан проект Технического задания на выполнение ОКР по теме «Разработка программных модулей симулятора гидроразрыва пласта».
25. Разработана методика тестирования алгоритма 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.
26. Проведено тестирование алгоритма расчета финальной формы трещины после остановки закачки с учетом переупаковки проппантной пачки.
27. Разработана программа расчета геометрии трещины при проведении повторного ГРП.
28. Разработана методика тестирования программы расчета геометрии трещины при повторном ГРП.
29. Проведено тестирование программы расчета геометрии трещины при повторном ГРП.
30. Разработана методика тестирования алгоритма расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.
31. Проведено тестирование алгоритма расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.
32. Разработана методика тестирования алгоритма генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.
33. Проведено тестирование алгоритма генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.
34. Проведены расчеты геометрии трещины ГРП с учетом искривления (выклинивания) слоев, влияние на симметричность трещины ГРП.
35. Проведено тестирование алгоритма расчета сопряженного течения скважина- трещина гидроразрыва пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины.
36. Разработана программа интерпретации параметров пласта и трещины по результатам численного моделирования динамических волновых процессов.
37. Разработана методика тестирования программы для интерпретации параметров пласта и трещины по результатам численного моделирования динамических волновых процессов.
38. Выполнена корректировка алгоритма расчета сопряженного течения скважина-гидроразрыв пласта с учетом возможности волновых явлений, связанных с сжимаемостью жидкости и упругостью конструкции скважины.
39. Проведено тестирование программы для интерпретации параметров пласта и трещины по результатам численного моделирования динамических волновых процессов.
40. Выполнена корректировка программы для интерпретации параметров пласта и трещины по результатам численного моделирования динамических волновых процессов.
41. Разработана методика тестирования программы 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.
42. Проведено тестирование программы 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.
43. Выполнена корректировка программы 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.
44. Выполнена корректировка программы расчета геометрии трещины при повторном ГРП.
45. Разработана методика тестирования программы расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.
46. Проведено тестирование программы расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.
47. Разработана методика тестирования программы расчета микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.
48. Проведено тестирование программы расчета микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.
49. Проведено обучение сотрудников Индустриального партнера использованию разработанных в рамках проекта программных средств моделирования гидроразрыва пласта.

**Публикации по результатам выполнения проекта:**

1. Adapting the explicit time integration scheme for modeling of the hydraulic fracturing within the Planar3D approach. Старобинский Е.Б. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012052/
2. Pseudo-three-dimensional model for hydraulic fracturing with foams. Антонов И.Д. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012055.
3. Neural networks and data-driven surrogate models for simulation of steady-state fracture growth. Мурачев А.С. DOI: 10.18720/MPM.4232019\_10.
4. Influence of compressibility on the foam fracture modeling. Антонов И.Д., Порубов А.В. DOI: 10.1088/1742-6596/1205/1/012048.
5. A model of the proppant flowback: setup of the theoretical framework. Фролова К.П. DOI: 10.2140/memocs.2019.7.175.
6. Optimization of Oil Field Development using a Surrogate Model: Case of Miscible Gas Injection. Симонов М.В. DOI: 10.2118/196639-MS.
7. Production Log Tes Planning Based on the Metod of Value of Information. Кикин П.М.
8. Comparison of design optimization algorithms of a multiply fractured horizontal well. Кривцов А.М. DOI: 10.1088/1742-6596/1268/1/012029.
9. On the implementation of the Planar3D model using the explicit time integration scheme and the statistical front tracking method.
10. Fast Fourier Transform in Planar3D model using an explicit numerical integration scheme.
11. The non-stationary temperature field of the fracturing fluid during the propagation of planar 3D hydraulic crack
12. . Numerical Modeling of Hydraulic Fracturing with Foams and Energized Fluids.
13. A model of hydraulic fractured horizontal well for debit computation of slanged gas and oil.
14. FEMEngine: finite element method C++ code based on functional and template metaprogramming.
15. A Novel Approach to Refinment Reservoir Proxy Model Using Machine-Learning Techniques. Симонов М.В. DOI: 10.2118/198411-MS.
16. Dense suspensions and generalized Fick's law. Кривцов А.М. DOI: 10.33048/semi.2019.16.151.
17. Разработка метода моделирования микросейсмических явлений при развитии трещины гидроразрыва пласта. Марков Н.С. DOI: 10.15372/FTPRPI20190508.

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

1. Программа для ЭВМ «Программа расчета скорости роста квазитрехмерной трещины ГРП в высоту в режиме доминирующей вязкости». Марков Н.С. Свидетельство о государственной регистрации № 2019613238 от 12.03.2019г.
2. Программа для ЭВМ «Программа расчета геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений». Старобинский Е.Б., Свидетельство о государственной регистрации № 2019613118 от 11.03.2019г.
3. Программа для ЭВМ «Программа расчета геометрии трещины ГРП в слоистой, анизотропной, трещиноватой среде методом динамики частиц». Лапин Р.Л., Цаплин В.А., Кузькин В.А. Свидетельство о государственной регистрации № 2019664444 от 07.11.2019г.
4. Программа для ЭВМ «Программа расчета геометрии трещины при пенном ГРП». Антонов И.Д., Порубов А.В. Свидетельство о государственной регистрации № 2019664576 от 08.11.2019 г.
5. Программа для ЭВМ «Программа расчета выноса проппанта из трещины ГРП». Евсеенков А.С., Кузькин В.А. Свидетельство о государственной регистрации № 2019664544 от 08.11.2019 г.

В результате работ 3 этапа:

1. Разработано 6 компьютерных программ:

- Программа расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин. Новизна программы заключается в использовании метода динамики частиц для описания распространения трещин в пласте.

- Программа расчета геометрии трещины при пенном ГРП. Программа позволяет учитывать сжимаемость, неньютоновский характер вязкости и качества пены.

- Программа расчета выноса проппанта из трещины ГРП. Новизна состоит в оригинальном локальном критерии устойчивости, который проверяет возможность возникновения выноса проппанта в зависимости от физико–механических свойств проппанта и нефти, перепада давления в скважине, геометрических размеров трещины и отношения размера средней частицы проппанта к ширине раскрытия трещины.

- Программа многопараметрической оптимизации для интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта на основе прямого численного моделирования. Программа позволяет учитывать частичную заполненность пор породы газом и водой, а также влияния порового давления и параметров пласта на кривую падения давления.

- Программа расчета геометрии трещины при проведении повторного ГРП. Новизна состоит в учете эволюции давления, приложенного к берегам трещины первичного ГРП при повторном ГРП, а также утечки жидкости ГРП в пласт.

- Программа интерпретации параметров пласта и трещины по результатам численного моделирования динамических волновых процессов. Новизна программы состоит в оригинальном подходе к решению проблем, возникающих при исследовании волновых эффектов в скважине.

1. Разработано 15 методик тестирования программ и алгоритмов:

- Разработана методика тестирования программы расчета статической формы трещины заданного объема на основе машинного обучения.

- Разработана методика тестирования алгоритма расчета геометрии трещины ГРП с учетом слоистости пласта на основе метода динамики частиц.

- Разработана методика тестирования программы многопараметрической оптимизации для интерпретации данных мини-ГРП с учетом пороупругого эффекта на основе прямого численного моделирования.

- Разработана методика экспресс-оценки геометрии трещины гидроразрыва на основе обобщения (графики, палетки, формулы) результатов компьютерного моделирования.

- Разработана методика тестирования алгоритма расчета геометрии трещины при пенном ГРП.

- Разработана методика тестирования алгоритма расчета выноса проппанта.

- Разработана методика тестирования алгоритма расчета трещины ГРП в рамках физико-математической полной трехмерной модели на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта.

- Разработана методика тестирования алгоритма 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.

- Разработана методика тестирования программы расчета геометрии трещины при повторном ГРП.

- Разработана методика тестирования алгоритма расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.

- Разработана методика тестирования алгоритма генерации микросейсмических событий при распространении трещины ГРП.

- Разработана методика тестирования программы для интерпретации параметров пласта и трещины по результатам численного моделирования динамических волновых процессов.

- Разработана методика тестирования программы 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.

- Разработана методика тестирования программы расчета влияния анизотропии и слоистости пласта на взаимодействие трещин ГРП/МГРП с естественной трещиноватостью с использованием уравнения баланса для описания течения жидкости по сети трещин.

- Разработана методика тестирования программы расчета микросейсмических событий при распространении трещины ГРП. На основе разработанных методик были проведены тестирования программ, по результатам которых были проведены корректировки программ.

1. Разработаны рекомендации по использованию результатов ПНИ в дальнейших исследованиях и разработках. Выполнено обобщение результатов работ ПНИ.
2. Разработан проект Технического задания на выполнение ОКР по теме «Разработка программных модулей симулятора гидроразрыва пласта».
3. Проведено обучение сотрудников Индустриального партнера использованию разработанных в рамках проекта программных средств моделирования гидроразрыва пласта.
4. В рамках выполнения работ по теме: «Разработка прикладных программных средств для планирования и контроля операции гидравлического пласта с целью повышения эффективности нефтегазодобычи» проведено развитие физико-математических методов и подходов для описания процессов при одиночном и многостадийном гидроразрыве пласта. Разработаны программные модули для моделирования операции гидроразрыва пласта и проведена их адаптация для использования на персональных компьютерах и многопроцессорных вычислительных системах
5. Обобщая полученные результаты можно заключить, что разработанные программы позволяют решать широкий спектр инженерных задач, возникающих при планировании операции гидроразрыва пласта. Тестирование программ и сравнение с известными решениями показало высокую точность результатов, получаемых при работе программ.