**Соглашение о предоставлении субсидии:**

**№14.575.21.0146 от 26.09.2017 г.**

**Уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI57517X0146**

**Этап 1 с 26 сентября 2017 г. по 31 декабря 2017 г.**

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

1. Проведен аналитический обзор современной научно-технической литературы по: моделированию пенного ГРП, моделированию выноса проппанта, моделированию влияния перфорации на проведение ГРП, учету температурных эффектов при моделировании ГРП, моделированию повторного ГРП, моделированию формирования упаковки проппантной пачки и ее переупаковки после остановки закачки.

2. Проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 по теме "Праграммы моделирования распространения трещины ГРП".

3. Проведен выбор направлений исследований.

4. Выполнена разработка программы расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде.

5. Проведены расчеты равновесной формы трещины при различных контрастах напряжений в квазистатической постановке с использованием разработанной программы расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде и обобщены результаты.

6. Выполнена разработка физико-математической полной модели ГРП на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта.

7. Выполнена разработка физико-математической модели финальной формы трещины после остановки закачки.

8. Выполнена разработка алгоритма нахождения функции Грина для уравнения Лапласа для построения модели слоистой среды.

**Публикации по результатам выполнения проекта:**

1. On calculation of effective elastic properties of materials with cracks. Кузькин В.А. Лапин Р.Л. DOI: 10.18720/MPM.3222017\_14.
2. An effective method to find green's functions for layered media. Линьков А.М., Марков Н.С. DOI: 10.18720/MPM.3222017\_5.
3. On influence of shear traction on hydraulic fracture propagation. Линьков А.М. DOI: 10.18720/MPM.3232017\_6.
4. On using quasi-random lattices for simulation of isotropic materials. Кузькин В.А. DOI: 10.18720/MPM.3232017\_12.
5. Enhanced vector-based model for elastic bonds in solids. Кривцов А.М., Кузькин В.А. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-4-455-458.

В результате работ 1 этапа:

1. Разработаны 4 математические модели:

- Физико-математическая полная трехмерная модель ГРП на основе метода динамики частиц с учетом слоистости пласта. Разрабатываемая физико-математическая модель основывается на описании движения точечных масс (частиц), взаимодействующих между собой посредством сил упругого взаимодействия. Кроме сил упругого взаимодействия учитывается давление со стороны жидкости, заполняющей трещины, а также давление со стороны жидкости, просачивающейся в поры материала.

- Физико-математическая модель финальной формы трещины после остановки закачки. Разработанная модель описывает динамику трехкомпонентной среды, состоящей из горной породы, жидкости – проппантоносителя и проппанта. Модель позволяет определить: 1) напряженно-деформированное состояние горной породы вблизи трещины; 2) возможность или невозможность дальнейшего роста трещины; 3) финальную форму трещины, при условии, что рассматривается только процесс закрытия трещины; 4) пористость, средний размер пор и проницаемость деформированной горной породы вблизи трещины; 5) распределение проппанта в трещине и его проницаемость; 6) наличие или отсутствие перепродавки проппанта.

- Физико-математическая модель трещины ГРП, основанная на модифицированной постановке задачи о гидроразрыве, с учетом слоистости пласта с использованием функции Грина для слоистой среды. Модель основана на оригинальном подходе к построению функции Грина. Модель описывает распространение трещины гидроразрыва под действием неньютоновской 1 несжимаемой жидкости в упругой среде.

- Физико-математическая модель микросейсмических событий при распространении трещины ГРП. Представленная модель позволяет учитывать хрупкость породы, различать устойчивые и неустойчивые состояния, оценивать энергию микросейсмических событий, а также определять тип события (сейсмическое или асейсмическое) и рассчитывать его основные характеристики.

3. Разработано 2 алгоритма и 4 компьютерные программы для моделирования ГРП:

- Алгоритм нахождения функции Грина для уравнения Лапласа для построения модели слоистой среды. Исследованы ключевые особенности разработанного алгоритма и представлены подходы к определению точности построения функции Грина для слоистых структур.

- Программа расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде. Программа может производить поиск контура равновесной трещины заданного объема, а также выводить графическую интерпретацию полученной трещины.

- Программа расчета скорости роста квазитрехмерной трещины ГРП в высоту в режиме доминирующей вязкости. Результаты работы программы позволяют уточнить расчет скорости роста трещины в высоту в квазитрехмерной постановке в режиме доминирующей вязкости. Возможность предварительного расчета значений скорости роста трещину в высоту позволяет сэкономить время при моделировании распространения трещины в рамках квазитрехмерной модели.

- Программа расчета геометрии трещины в однородной среде с учетом контраста напряжений. Программа позволяет сохранять положение фронта трещины, давление в трещине в конце моделирования, историю изменения раскрытия трещины в источнике, длину и высоту трещины в процессе эволюции трещины.

- Параллельный алгоритм расчета геометрии трещины ГРП в однородной среде с учетом контраста напряжений.

- Программа расчета геометрии трещины ГРП в однородной среде с учетом контраста напряжений с использованием параллельного алгоритма. Программа разработана на основе параллельного алгоритма расчета геометрии трещины ГРП. Программа позволяет сохранять положение фронта трещины, давление в трещине в конце моделирования, историю изменения раскрытия трещины в источнике, длину и высоту трещины в процессе эволюции трещины.

4. Проведены расчеты для определения равновесной формы трещины и исследования взаимному влиянию трещин:

- Расчеты равновесной формы трещины при различных контрастах напряжений в квазистатической постановке с использованием разработанной программы расчета статической формы трещины заданного объема в трехслойной среде и обобщение результатов. Описаны результаты работ по проведению расчетов равновесной формы трещины при различных контрастах напряжений и различных трещиностойкостях в квазистатической постановке.

- Расчеты равновесной формы трещины методом конечных элементов в трехслойной среде с различными упругими модулями и контрастом напряжений и обобщение полученных результатов. Выявлено, что расчеты в пакете ABAQUS для данной задачи, с учетом возможных оптимизаций занимают значительное время. Поэтому, с учетом большого числа возможных параметров, влияющих на равновесную форму трещины, использование данного метода, возможно в связке с другими алгоритмическими методами (такое как машинное обучение) для уменьшения количества расчетов, или как инструмент проверки и верификации других численных методов, например, метода граничных элементов, которые работают значительно быстрее.

- Расчеты с использованием программы, реализующей метод граничных элементов, и c использованием метода конечных элементов, для сравнения эффективности методов. Проведено сравнение результатов, полученных методом граничных элементов и методом конечных элементов для задачи о равновесной форме трещины в слоистой среде при различных физических параметрах слоев: различные коэффициенты трещиностойкости, различных пластовых напряжений.

- Расчеты для исследования взаимного влияния трещин. Разработана модель распространения нескольких трещин под действием равномерно распределенного внутреннего давления.

5. Исследована точность расчета раскрытия в физико-математической псевдотрехмерной модели и методом граничных элементов.

В ходе данного исследования была рассмотрена статическая задача по определению раскрытия трещины гидроразрыва пласта, полученного в псевдотрёхмерной модели.

Полученные на данном этапе результаты будут в дальнейшем использоваться для построения математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ, которые будут использоваться индустриальным партнером при планировании и контроле операции гидроразрыва пласта.

Полученные на данном этапе результаты будут в дальнейшем использоваться для построения математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ, которые будут использоваться индустриальным партнером при планировании и контроле операции гидроразрыва пласта.