Министерство образования и науки Российской Федерации

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт прикладной математики и механики

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

_____ А.М. Кривцов

«___»_____2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

Моделирование трещин в упругих средах методом динамики частиц

по направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»

по образовательной программе

01.04.03_03 Механика и цифровое производство

Выполнила
студентка гр.23642/2 <_____> Д.Р. Ахметова

Руководители:
доцент, к.ф.-м.-н. <_____> В.А. Кузькин

Санкт-Петербург
2018г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 5

1.1 Методы моделирования трещин ГРП 5

1.2 Моделирование методом динамики частиц 6

1.2.1 Моделирование твердой среды 8

1.2.2 Описание течения жидкости в трещинах 10

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ 13

2.1 Описание используемой модели 13

2.2 Алгоритм решения 17

3. РЕЗУЛЬТАТЫ 20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 28

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ (русск А-Я, англ А-я, ссылки) 29

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование – исследование процессов и явлений, путем построения моделей существующих объектов с целью их изучения, предсказания возможного поведения, получения объяснений этих явлений. Оно дает возможность не только получить численные решения, но и визуализировать физические процессы, которые порой трудно описать посредством эксперимента.

Моделирование трещин позволяет охватывать область применения во многих отраслях, одной из которых является нефтяная и газовая добыча. Такие технологии, как интенсификации добычи углеводородов относятся к перечню критических технологий РФ. В их числе главной технологией является гидравлический разрыв пласта [15]. Интересной данная тема покажется и для инженерии, при изучении механики разрушения. Трещиноватость является одним из факторов, влияющих на прочность, напряженно деформационные параметры состояний массивов горных пород, таким образом актуальность захватывает и геологию; также на механико-технологические свойства строительных и природных облицовочных материалов [3], и поэтому требует обширного и подробного изучения.

Целью данной работы является определение причины потери квазиравновесного состояния системы раскрытия трещины. Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Литературный обзор
2. Построение модели трещины ГРП методом динамики частиц
3. Проведение ряда экспериментальных расчетов
4. Анализ полученных данных

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Методы моделирования трещин ГРП

Известно, что традиционно физика делится на экспериментальную и теоретическую, но на сегодняшний день, наряду с ними можно выделить третий раздел – вычислительную физику. Она позволяет решить математические задачи, которые порой требуют нетрадиционного подхода в связи, к примеру, с нелинейностью многих физических процессов и необходимостью исследования совместного движения различных тел, для которого решается система, содержащая большое количество уравнений.

Численное моделирование позволяет получить качественные закономерности природы. Но для реального представления и осознания результатов на помощь приходит возможность визуализации абстракций. Иначе говоря, в качестве результатов мы можем оценить не только численные значения, но и различные графики, диаграммы, траектории движения динамических объектов, модели физических объектов и процессов, протекающих с их участием с течением времени и так далее.

Существует огромное множество различных способов, алгоритмов моделирования, применяемых для самых различных задач, но нас интересует конкретный случай: моделирование трещины в упругой среде, применяемое для гидравлического разрыва пласта.

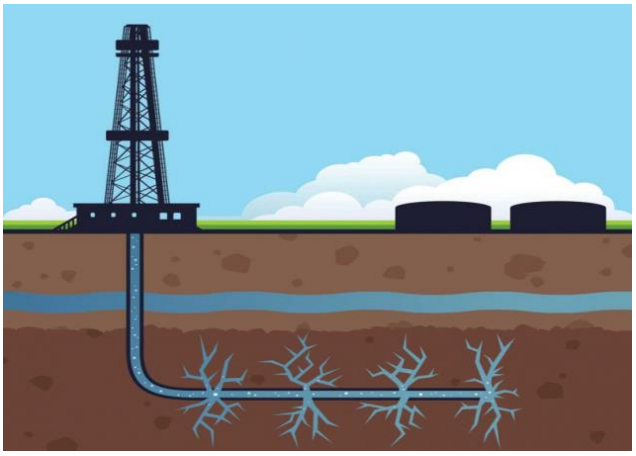

Рисунок 1.1. Схематичное изображение гидроразрыва пласта

Гидроразрыв пласта (Рисунок 1.1) - один из способов интенсификации нефтеоотдачи, используемых инженерами-нефтяниками. Востребованность ГРП связана с трудно извлекаемыми запасами (ТРИЗ) нефти и газа, так как количество резервуаров, которые находятся в малых толщинах пластах с низкой проницаемостью, высокой обводненностью и пониженным нефтенасыщением с каждым годом становится все больше.

С развитием ГРП и, в последствии, ростом количества операций, а также внедрением новых материалов и технологий подходы к его моделированию становились все более усовершенствованными.

История первых работ по симуляторам Pseudo3D [2, 11] и Planar3D [5, 8] берет свои корни в начале 80-х годов XX века. Эти работы впоследствии стали основоположниками таких широко используемых симуляторов, как FracPro, MFrac, GOFHER, StimPlan, TerraFrac и др. С течением времени методы совершенствовались как различными модификациями численных схем, так и усложнением математических моделей, которые стали учитывать все большее число параметров: неньютоновские реологические характеристики жидкости ГРП, концентрацию проппанта, влияющую на вязкость жидкости, различные факторы переноса проппанта. Основным вектором развития являлось численное моделирование, благодаря резкому росту вычислительных мощностей.

1.2 Моделирование методом динамики частиц

Прежде всего необходимо внести понимание, что же такое метод динамики частиц. Это представление материала в качестве совокупности взаимодействующих частиц, таких как материальные точки или твердые тела, которые описываются классическими уравнениями динамики [2]. Взаимодействие частиц описывается посредством потенциалов взаимодействия, основным свойством которых является отталкивание при сближении и притяжение при удалении. Перед началом моделирования

задается некоторое начальное распределение частиц в пространстве (исходная структура материала) и начальное распределение скоростей частиц (механическое и тепловое движение системы в исходном состоянии). Далее задача сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

По мере развития вычислительной техники, данный метод стал все более широко применяться к описанию процессов на промежуточных масштабных уровнях, для моделирования физико-механических свойств материалов и гранулированных сред. В этом случае частицы могут представлять гранулы или зерна материала, однако они могут быть, и не связаны напрямую с некоторыми физическими объектами, а использоваться как конечные элементы для изучения процессов, в которых нарушается континуальность материала. На Рисунке 1.2 пример модели, расчеты и постоение которой принадлежат А.М. Кривцову [16].

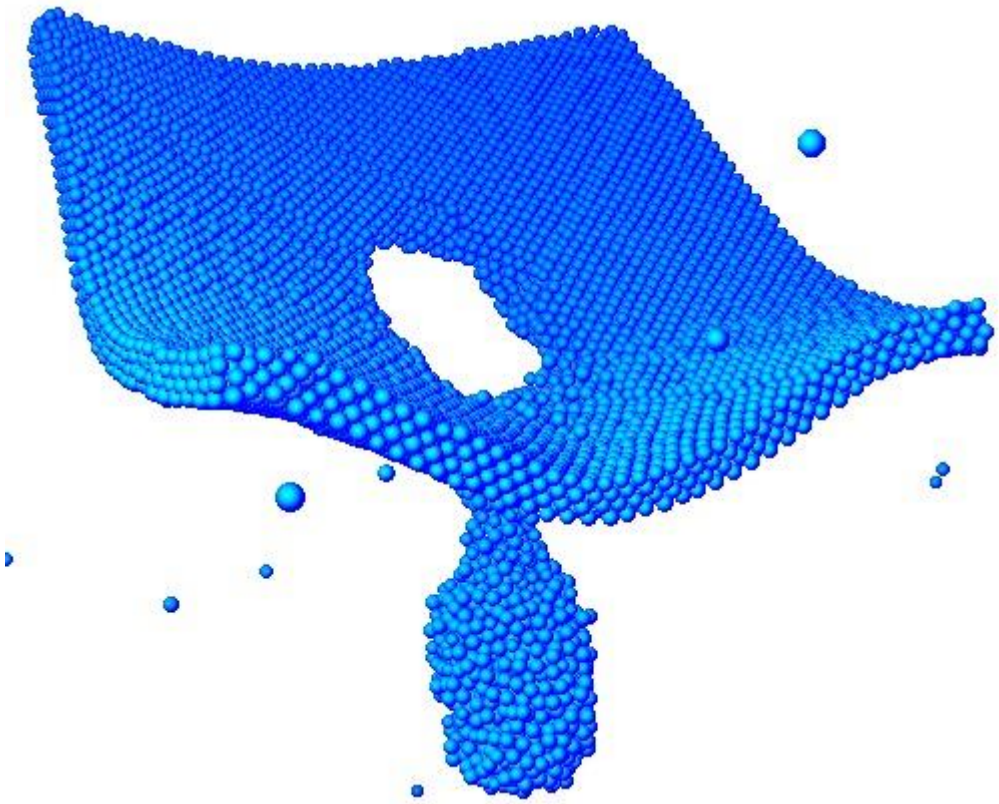

Рисунок 1.2. Моделирование пробивания пластины

Несомненное преимущество метода частиц по сравнению с методами, основанными на концепции сплошной среды, заключается в том, что он

требует значительно меньше априорных предположений о свойствах материала. Действительно, использование только простейшего потенциала взаимодействия (например, типа Леннард-Джонса) и незначительной диссипации позволяет моделировать такие сложнейшие эффекты, как пластичность, образование трещин, разрушение, температурное изменение свойств материала, фазовые переходы. Метод дает возможность естественным образом учитывать взаимодействие трещин, моделировать слоистость материала и не задавать ограничения на форму трещины.

1.2.1 Моделирование твердой среды

При моделировании деформирования и разрушения горных пород в качестве начальных условий, как правило, задают случайное распределение частиц. Случайное распределение позволяется моделировать изотропный материал и избавиться от влияния симметрии решетки на направление развития трещин. Граничные условия определяются условиями задачи. Если моделируется одноосное сжатие керна, то используются свободные граничные условия на свободных границах образца, а также задаются перемещения частиц, обеспечивающие сжатие.

Для моделирования ГРП оптимальным является задание периодических граничных условий по всем направлениям. При этом удается минимизировать влияние конечности образца. Кроме того, путем сжатия/растяжения ячейки периодичности может быть задано распределение пластовых напряжений.

Для моделирования деформируемости породы необходимо задать закон взаимодействия. Если частицы моделируются материальными точками, то закон взаимодействия в общем случае представляет собой зависимость силы межчастичного взаимодействия от расстояний между частицами и углов между связями. Если частицы представляют собой абсолютно твердые тела, то взаимодействие между ними описывается посредством сил и моментов, зависящих как от расстояний между частицами, так и от их взаимной

ориентации. Для задания линейно упругого поведения материала, представляющего наибольший интерес при моделировании ГРП, достаточно соединить частицы линейными пружинками. Такой подход не всегда позволяет корректно описать коэффициент Пуассона. Однако коэффициент Пуассона оказывает слабое влияние на процесс распространения трещины ГРП, поэтому в первом приближении можно не усложнять модель. В случае, если все-таки необходимо точно описать упругие свойства материала, взаимодействие между частицами может описываться посредством связей, реагирующих на растяжение и сдвиг. Примером такой модели являются, например, Bonded, Particle Model (BPM) [14] или V-model [9]. Преимуществом последней модели является то, что она является консервативной. Следовательно, при использовании V-model появляется возможность контролировать диссипацию в системе. Для моделирования квазистатического деформирования породы необходимо добавить еще одну силу, действующую на частицы – силу вязкого трения. Введение вязкого трения позволит погасить нежелательные колебания в системе.

Численное интегрирование уравнений движения осуществляется посредством одного из стандартных методов численного решение обыкновенных дифференциальных уравнений.

При выборе методы важную роль играет его симплектичность. Под симплектичностью понимается сохранение системой объема фазового пространства. С точки зрения механики это означает отсутствие систематического дрифт а энергии. Симплектическим методом является, например, метод Верле (leap-frog). Метод Рунге-Кутты, хотя и обладает более высоким порядком точности, все же не является симплектичным.

Описание разрушения в методе динамики частиц производится одним из следующих способов. В случае, если взаимодействия между частицами описываются непрерывным потенциалом, убывающим с расстоянием, разрушение происходит естественным образом, как только частицы расходятся на достаточное расстояние и перестают притягиваться [1]. Если

взаимодействие описывается пружинками или связями типа BPM или V-model, то необходимо сформулировать условие, при котором рвется связь.

Данное условие в некотором смысле аналогично критерию разрушения, используемому в механике сплошных сред.

Описание течения жидкости в трещинах ГРП также возможно в рамках чисто дискретной постановки. Однако для этого могут потребоваться существенные вычислительные ресурсы. В этой связи более перспективным является использования для описания течения жидкости континуальной теории, в частности, теории смазки, описанной в следующем пункте.

Основным преимуществом метода дискретных элементов в сравнении с континуальными методами (МКЭ, МГЭ) при описании деформирования и разрушения горной породы является простота его программной реализации. Также важен тот факт, что многие сложные эффекты, такие как рост и взаимодействие трещин, влияние естественной трещиноватости и др. в методе дискретных элементов описываются автоматически.

Для моделирования динамики жидкости в трещине ГРП метод динамики частиц должен быть дополнен уравнениями теории смазки, описанными в следующем пункте.

1.2.2 Описание течения жидкости в трещинах

В общем случае жидкость в трещине течет по криволинейному каналу сложной формы, то есть должна описываться трехмерными уравнениями движения. При этом сама жидкость является неньютоновской [10]. К тому же, жидкость используется не только для распространения трещины, но и для переноса проппанта. Таким образом, необходимо привлекать уравнения движения многофазной жидкости или описывать движение частиц в ней.

Размерность задачи при моделировании обычно уменьшается путем осреднения уравнений по ширине канала [2]. Это справедливо, потому что длина и высота трещины существенно превосходят ее ширину. Также можно

пренебречь искривлением канала, заменив его в модели на прямолинейный. В результате получается двумерная модель движения жидкости в канале переменного сечения [4]. Для дальнейшего упрощения задачи, используются ограничения на форму трещины, позволяющие перейти к одномерным уравнениям движения жидкости.

В континуальных моделях (МГЭ, МКЭ) для учета жидкости в трещине используются дополнительные уравнения. Как правило, при этом ограничиваются теорией смазки.

Приведем основные уравнения, используемые для описания течения в узком канале.

• Уравнение баланса массы

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = q_e, \tag{1.1}$$

где w – ширина трещины с жидкостью, $\boldsymbol{q}$ – поток, q_e – источниковый член.

• Определяющее соотношение для потока (теория смазки)

$$\boldsymbol{q} = -D(w, p)\nabla p, \tag{1.2}$$

• Уравнение течения жидкости

$$\frac{\partial w}{dt} - \nabla \cdot (D(w, p)\nabla p) = q_e, \tag{1.3}$$

• В случае Ньютоновской жидкости

$$\frac{\partial w}{dt} - \nabla \cdot \left(\frac{w^3 \nabla p}{12\mu}\right) = q_e, \tag{1.4}$$

где μ – динамическая вязкость жидкости.

• Источниковый член в правой части, как правило, ассоциируется с учетками в пласт.

Для утечек принято использовать уравнение Картера:

$$q_e = \frac{2C_L}{\sqrt{t - t_*(x)}}, \tag{1.5}$$

где C_L – коэффициент Картера, $t_*(x)$ – время прихода фронта жидкости в точку x.

Уравнения, описывающие динамику жидкости перевязаны с

уравнениями механики, описывающими деформирование горной породы через давление, которое для уравнений механики является граничным условием.

В случае, если жидкость содержит проппант система уравнений должна быть модифицирована. Простейший способ учета проппанта – учет влияния вязкости или коэффициентов степенной жидкости от концентрации пропанта.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1 Описание используемой модели

В данной программе реализация модели происходит, основываясь на методе динамики частиц. Следовательно, согласно этому методу, материал может быть представлен как совокупность взаимодействующих частиц.

Уравнение движения для каждой частицы в общем виде выглядит следующим образом:

$$m_i\ddot{\boldsymbol{r}} = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{F}_i - \mu\dot{\boldsymbol{r}}, \tag{2.1}$$

Здесь $\boldsymbol{r}$ -радиус вектор частицы. В правой части равенства рассчитывается сумма сил, действующая на i-ую частицу от j-ых связей, а также диссипативное слагаемое, обратно пропорциональное скорости частицы. μ – коэффициент диссипации. Диссипативное слагаемое добавлено для моделирования квазистатического процесса роста трещин.

В начальный момент времени частицы соединяются и образуют связи, посредством которых происходит взаимодействие между ними. Используется следующие три типа связи: упругая связь, связь с давлением, свободная связь. Сила в связи на частицы действует вдоль линии действия соединяющей частицы. Упругая связь, использующаяся для основного типа частиц моделирующих грунт, характеризуется расстоянием равновесия, критическим расстоянием.

Сила, действующая в упругой связи на частицу, определяется по формуле:

$$\boldsymbol{F} = c(|\boldsymbol{r}| - a)\boldsymbol{e}, \tag{2.2}$$

где $\boldsymbol{e}$ – единичный вектор, направленный вдоль связи, $|\boldsymbol{r}|$ – расстояние между частицами, a – равновесное расстояние, с – жесткость связи. Если длина связи достигает критического значения, то связь разрывается. Условие разрыва упругой связи:

$$L > L_{critical} \tag{2.3}$$

где L –длина связи в текущий момент времени, а $L_{critical}$ – критическая длина. После разрыва связь меняет свой тип. В общем случае связь становится тип свободной. Если разрыв произошел вблизи трещины, которая находится под давлением жидкости, то в этой связи моделируется возникает давление жидкости. Связь с давление реализует постоянное по модулю воздействия давления на границы трещины.

При моделировании использовались периодические граничные условия. Они заключаются в «дублировании» слоя частиц с каждой из сторон области и расположения в противоположной части области. Перемещения и скорости соответствующих частиц в дублированном слое и актуальном полностью совпадают. Для лучшего понимания принципа периодических граничных условий следует обратиться к Рисунку 2.1

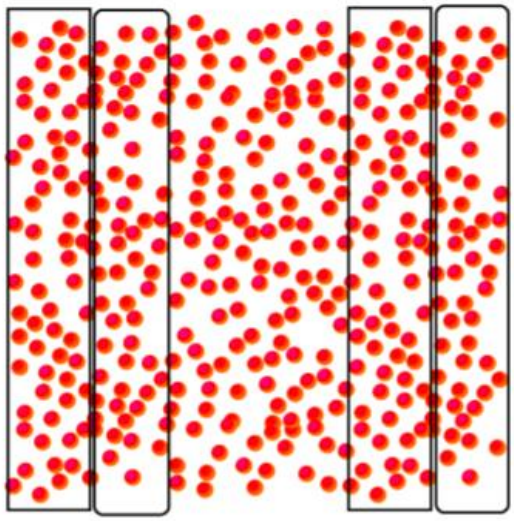

Рисунок 2.1. Периодические граничные условия

Как видно из Рисунок 2.1 с каждой стороны производится дублирование небольшого слоя частиц (прямоугольник и прямоугольник с закругленными краями). Как следствие, при моделировании частицы в левой части «чувствуют» воздействие частиц из правой части. Этот прием позволяет избежать нежелательных граничных эффектов и значительного влияния размеров на результаты моделирования. Аналогичное «дублирование» происходит для верхней и нижней части.

Главным преимуществом является простота задания пластовых напряжений. Необходимая величина пластовых напряжений может быть получена путем наложения на периодическую ячейку соответствующей однородной деформации. Также важно отметить, что при описании ГРП необходимо моделировать бесконечная область. Поэтому конкретные граничные условия не важны – в любом случае решение задачи в конечной области (для конечной ячейки периодичности) соответствует решению для бесконечной области только пока трещина ГРП находится достаточно далеко от границ образца.

Для получения количественных результатов при моделировании ГРП необходимо установить связь параметров дискретной системы (жесткости связи, межчастичного расстояния, масс частиц и др) с макроскопическими параметрами пласта. Связь параметров дискретной системы с макроскопическими параметрами пласта:

$$K = E\sqrt{d}a'\varepsilon_{cr}, \quad E = E_{\text{числ}}\frac{c}{d}. \tag{2.4}$$

где K – модуль объемного сжатия, E – модуль Юнга, c – жесткость связи. Для определения точных значений упругих модулей материала со случайной структурой, моделирующего пласт (см. рис. 3.1), необходимо проведение компьютерного моделирования. В частности, упругие модули могут быть определены из вычислительного эксперимента по одноосному растяжению материала. Модули могут быть вычислены на основе расчета напряжений в образце при заданной деформации.

Параметры, от которых зависит давление жидкости в трещине: V_{liq} – объем закаченной жидкости, V_{fr} – объем трещины. Формула для нахождения:

$$p = \alpha\frac{V_{liq}}{V_{fr}}, \tag{2.5}$$

где α – параметр материала. Если предположить, что закачка жидкости происходит равномерно, то можно ввести параметр q – скорость закачки за одну итерацию. Тогда объем закаченной жидкости равен:

$$V_{liq} = qt, \tag{2.6}$$

где t – время моделирования.

Объем трещины находится в два этапа. Первый, суммирование отклонений длин связи, которые связаны с трещиной, от соответствующей длины. Второй, умножение найденной суммы на коэффициент β – который является подобием плотности связей по расстоянию в материале. Тогда объем трещины будет равен:

$$V_{fr} = \beta \sum\left(l^i - l^i_{eq}\right), \tag{2.7}$$

l – актуальная длина связи и равновесная длина связи.

Данный алгоритм для нахождения объема трещины основан на предположении, что частицы и связи в материале расположены равномерно, а значит для нахождения объема можно вести коэффициент плотности связи по расстоянию в материале – β. Конечная формула для нахождения давления имеет следующий вид:

$$p = \alpha \frac{qt}{\beta \sum(l^i - l^i_{eq})}. \tag{2.8}$$

Данное давление находится на каждой итерации и прикладывается ко всем связям с давлением в рассматриваемой трещине.

Характерной особенностью развития трещины с использованием данной модели жидкости, является скачкообразный рост трещины. Объяснением является – резкое падение давления в трещине при ее росте, что вызвано резким увеличением объема трещины. Таким образом, чтобы рост трещины продолжился необходимо некоторое время, чтобы закаченного объема жидкости хватило для дальнейшего разрушения образца.

2.2 Алгоритм решения

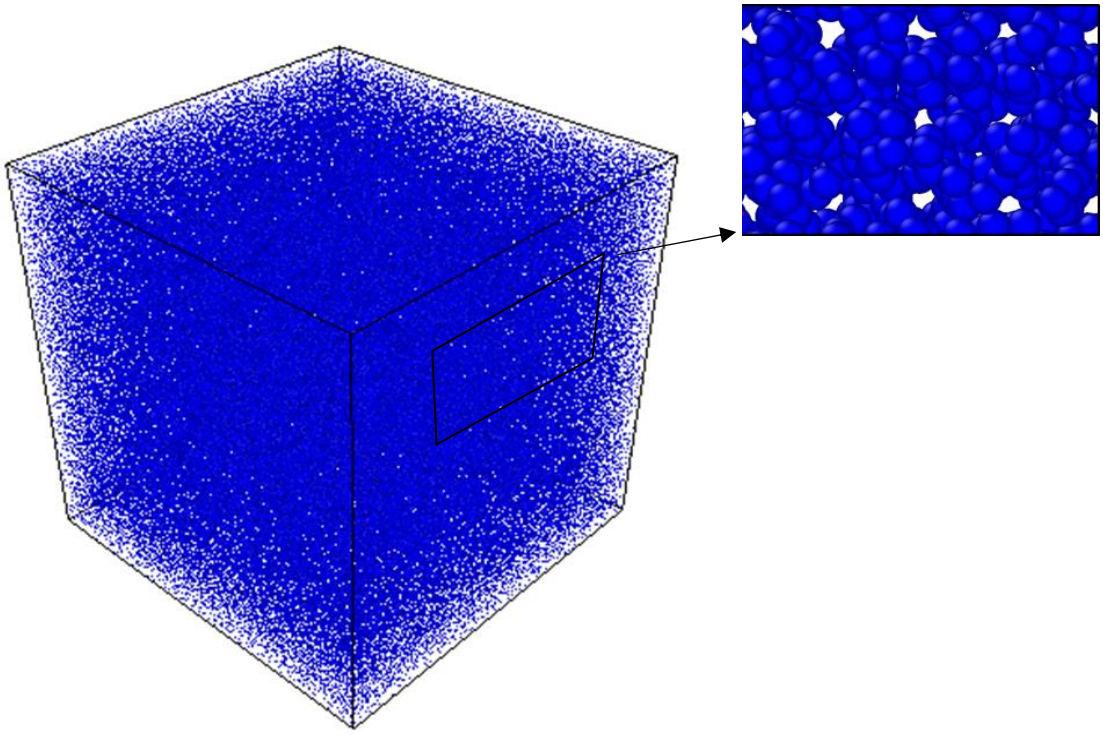

Рисунок 2.2. Модель грунта

В программе главными элементами являются два массива: массив частиц и связей. Атрибутами частиц являются радиус-вектор и скорость, а также несколько атрибутов для задания периодических граничных условий и взаимодействия с массивом связей. У связи кроме номеров частиц, участвующих в связи, есть несколько атрибутов, характеризующих тип связи (жесткость связи, расстояние равновесия и так далее).

Алгоритм работы программы можно разделить на два этапа.

1) Создание начальной конфигурации. Здесь решается задача создания частиц, образования связей между ними. А также образование неоднородностей. Также создаются периодические граничные условия.

2) Интегрирование уравнений динамики, моделирование процесса развития материала.

Далее происходит создание трещины, путем закачки жидкости со

скоростью q. Процесс раскрытия трещины может принять квазистатический характер, либо обратный ему. Более наглядный пример можно наблюдать в следующем разделе на Рисунке 3.1 и 3.2.

Квазистатический процесс – процесс, который происходит “идеально” и находится в состоянии термодинамического равновесия. Приведение системы в квазиравновесное состояние дает возможность упростить анализ модели.

Первым этапом решения поставленных задач было исследование данных, полученных при моделировании раскрытия трещины и сравнение их с существующим аналитическим решением [12].

Трещина нагружена равномерно распределенным внутренним давлением, т.е. существует внешнее однородное растягивающее поле напряжений, которое направлено перпендикулярно.

Для реализации квазистатического процесса на начальном этапе моделирования давления увеличивалось от нулевого давления до конечного значения с небольшим шагом. Как только процесс принял стабильный характер и трещина перестала расти значение давления не изменялось.

Для снятия раскрытия трещины использовался прием введения линии вертикальных узлов, проходящих через трещины вдоль всего материала. Каждому введенному узлу геометрически соответствовали определенные связи в трещине. И раскрытие трещины в этом узле считалось как среднее отклонение длины связи от равновесной.

Следующей задачей является определение границ скорости закачки жидкости. Конкретно задача состоит в том, чтобы система не теряла состояния равновесия. Для решения этой задачи был проведен ряд расчетов с различной величиной q.

В процессе задания начальных параметров для расчетов изменению подвергались следующие величины:

1) q – скорость закачки жидкости
2) S – количество шагов интегрирования
3) L – количество слоев (размер образца)

Для более глубокого понимая перехода системы в неквазистатическое состояние был также проведен анализ давления, объема трещины и количества разорванных связей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе решения задачи о раскрытии трещины, нагруженной равномерно распределенным внутренним давлением, была получена следующая модель раскрытия:

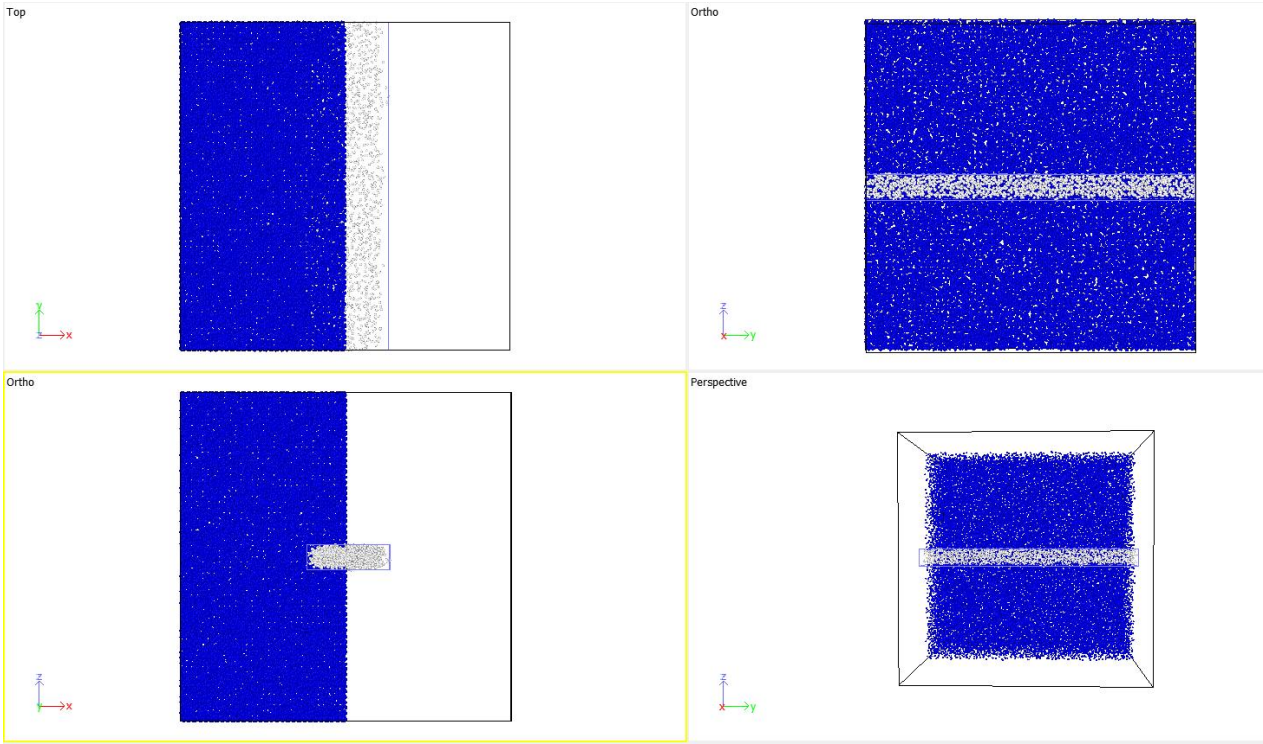

Рисунок 3.1. Модель раскрытия продольной трещины (двумерный случай)

Для решения задачи о моделировании раскрытия трещины и сравнения полученных данных с аналитическим решением был построен трехмерный график функции f(z)=(x,y); где z – отклонение частиц под действием давления от их первоначального положения, x и y – координаты частиц, которые считаются неизменными, в связи с тем, что растяжение трещины происходит в плоскости вдоль оси z.

$$z = z_2 - z_1 \tag{3.1}$$

Где z_1 – координата частицы по оси z при p=0, z_2 – после раскрытия трещины. В момент раскрытия p = 2,7e-4. В результате моделирования было получено следующее численное решение

(рисунок 3.2):

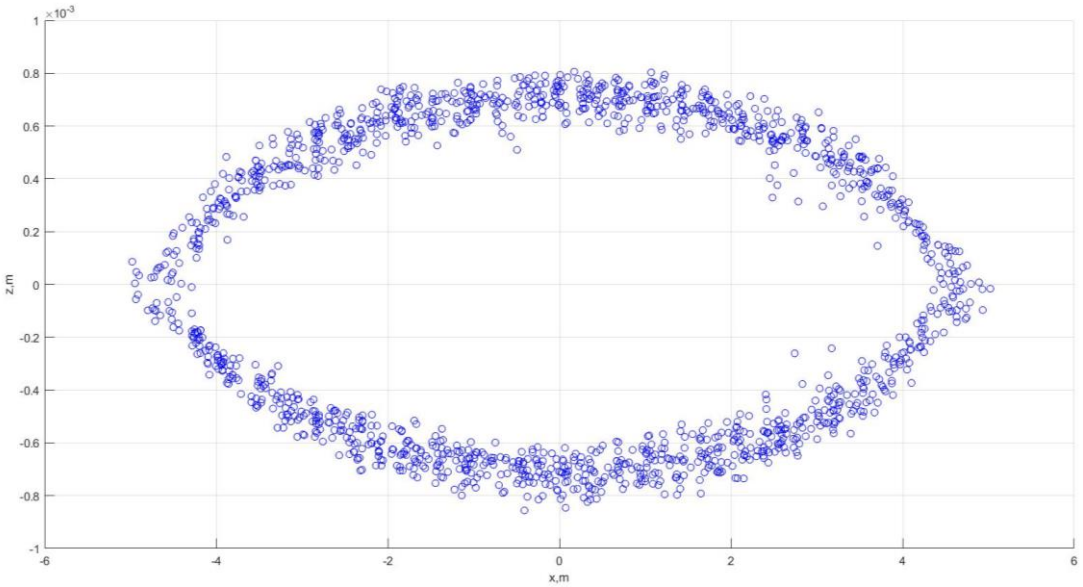

Рисунок 3.2 Численное решение для раскрытия продольной трещины методом моделирования

Функция перемещения для аналитического решения задана следующим образом [11]:

$$y = \frac{4l}{E} p \left[\left(1 - \left(\frac{x}{l} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{3.2}$$

где p – приложенное давление, E – модуль Юнга, l – радиус трещины.

E = 6, 48 ;

P = 2,7e-4 ;

l = 4,5 (считается раскрытие трещины по оси x)

В результате аналитического расчета был получен график, указанный на Рисунке 3.2:

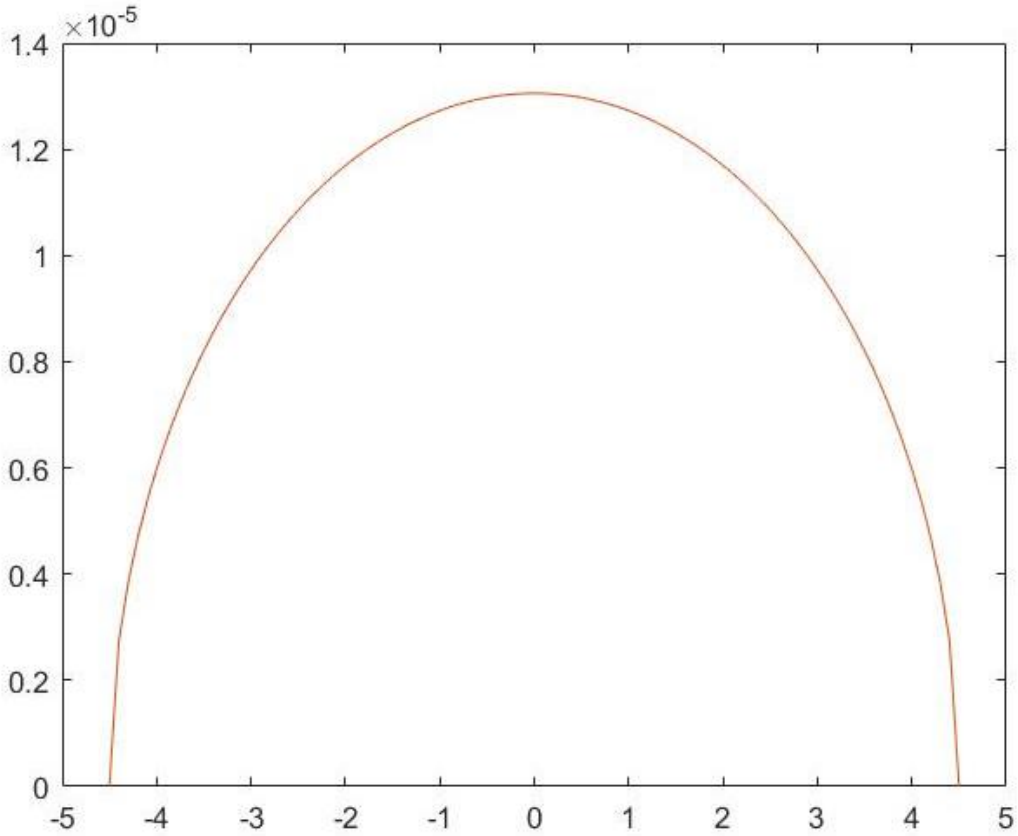

Рисунок 3.3 Численное решение для раскрытия продольной трещины аналитическим методом

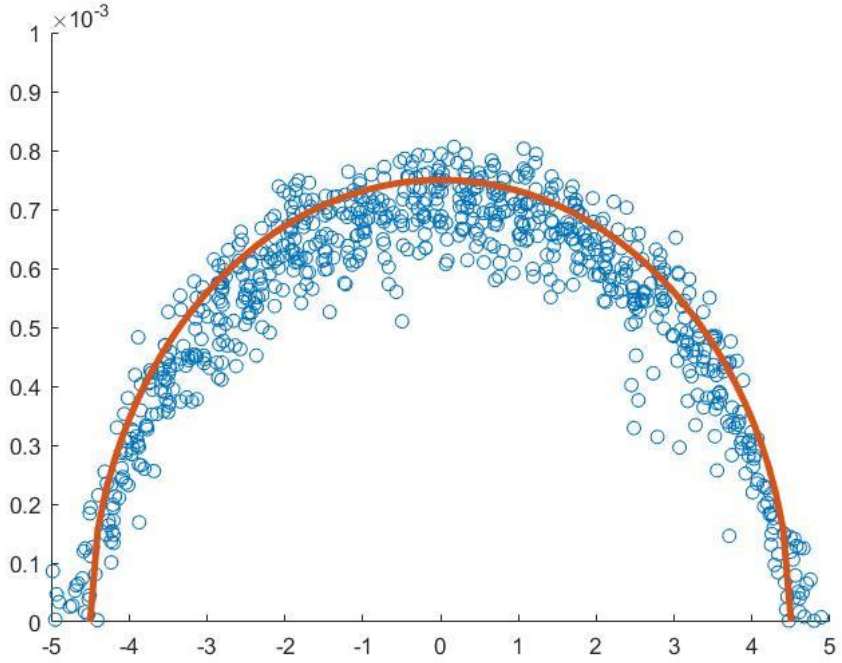

Рисунок 3.4. Задача о раскрытии трещины под действием внутреннего давления. Линия – аналитическое решение теории упругости, точки – результаты моделирования методом динамики частиц

Сравнение раскрытий, полученных при моделировании материала с аморфной структурой и аналитическим решением позволяют сделать вывод, что результат моделирования задачи о растяжении плоскости с трещиной под действием постоянного однородного поля напряжений хорошо согласуется с аналитическим решением аналогичной задачи.

Далее было проведено множество численных экспериментов и расчетов для определения границ квазистатического процесса.

Для этого менялась скорость закачки жидкости q от меньшего к большему значению. В результате чего было получено следующая численная граница: при q∈(0;5e-6] – система находится в квазиравновесном состоянии (Рисунок 3.5); при q > 5^{e} процесс роста трещины неквазистатический (Рисунок 3.6).

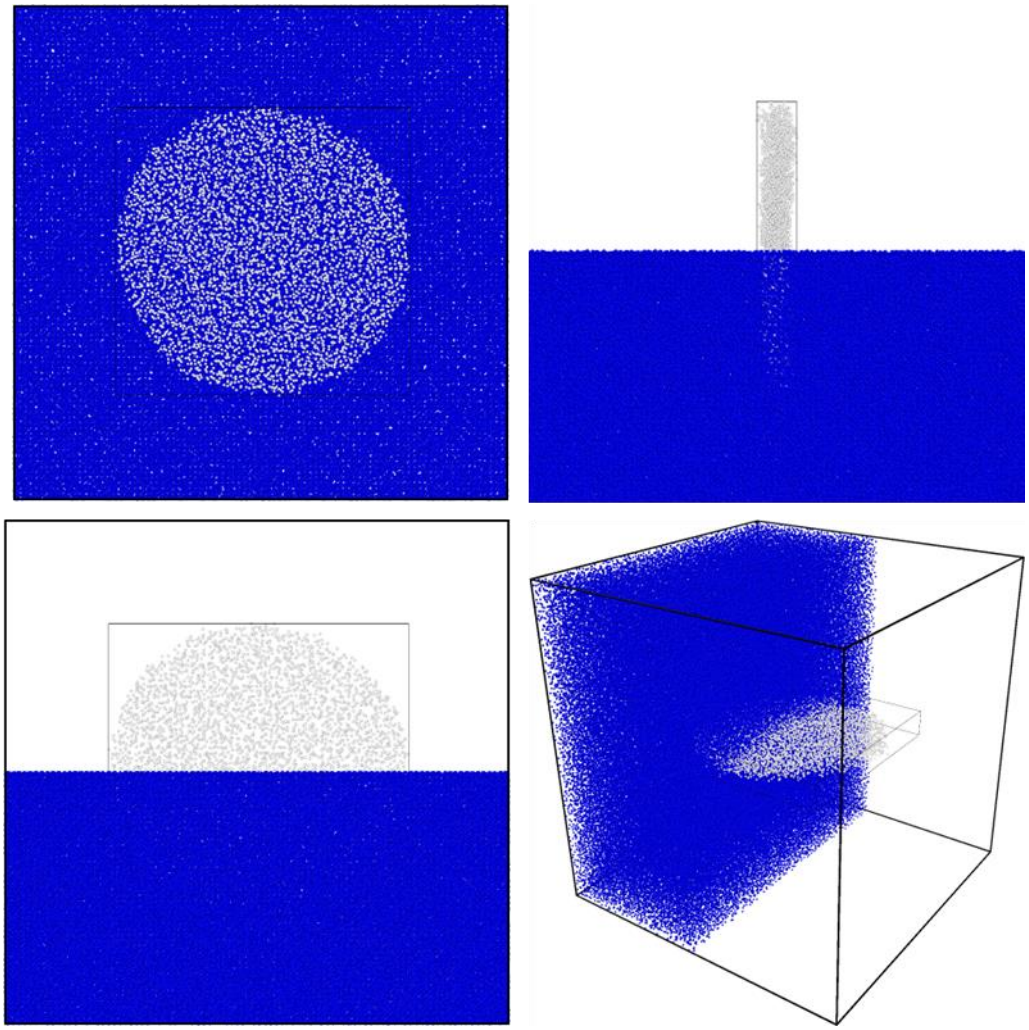

Рисунок 3.5. Построенная модель, демонстрирующая квазистатический рост трещины (q=1e-6 $м^3/с$)

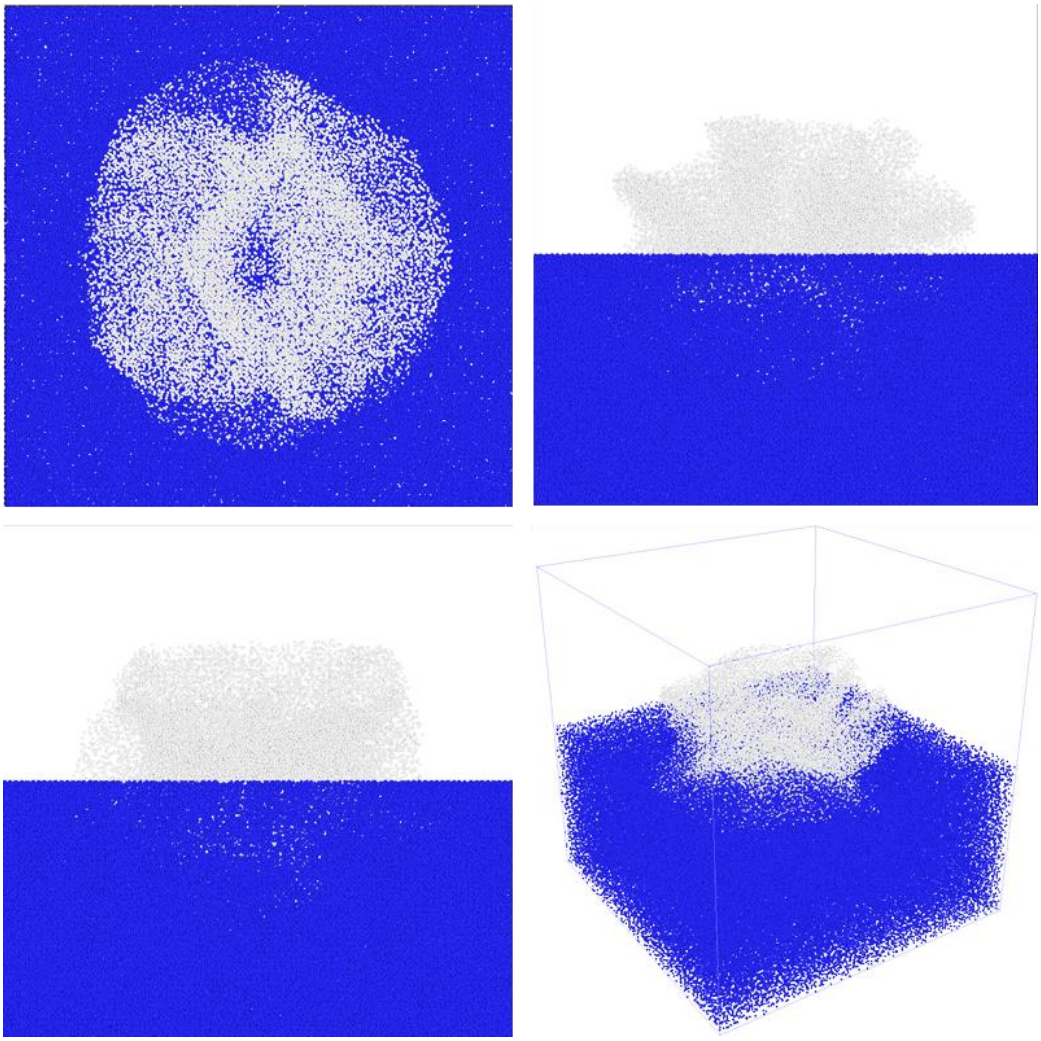

Рисунок 3.6. Построенная модель, демонстрирующая неквазистатический рост трещины (q=5e-5 м^3/ч)

На рисунке 3.6 видно хаотичное распределение частиц, отображающих поведение трещины под влиянием нагрузки, созданной посредством закачки жидкости в пласт.

После получения квазистатических границ был проведен анализ выходных данных: количества разорванных связей (N), объема трещины (V), давления в пласте (P). Анализ необходим для понимания выхода процесса роста трещины из состояния равновесия.

Для оценки влияния различных параметров были построены следующие зависимости:

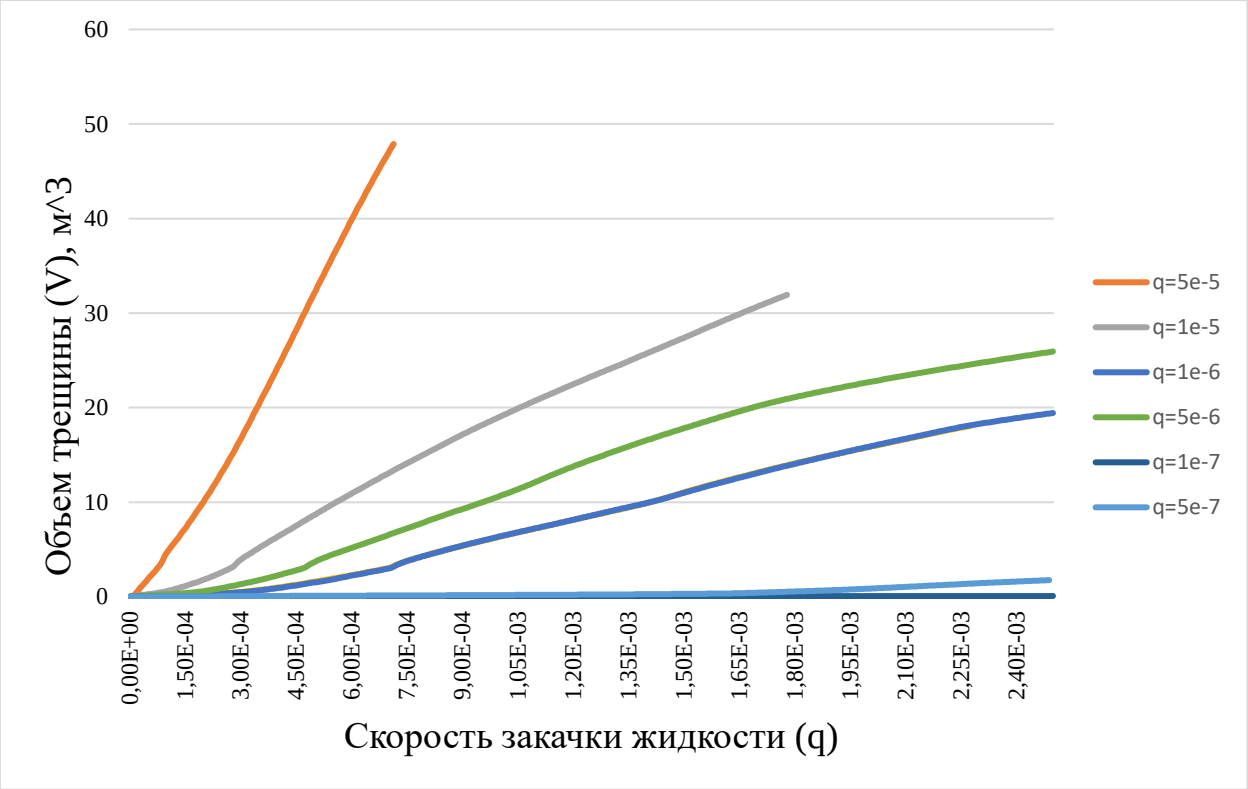

Рисунок 3.7. График зависимости объема трещины V от скорости закачки жидкости q

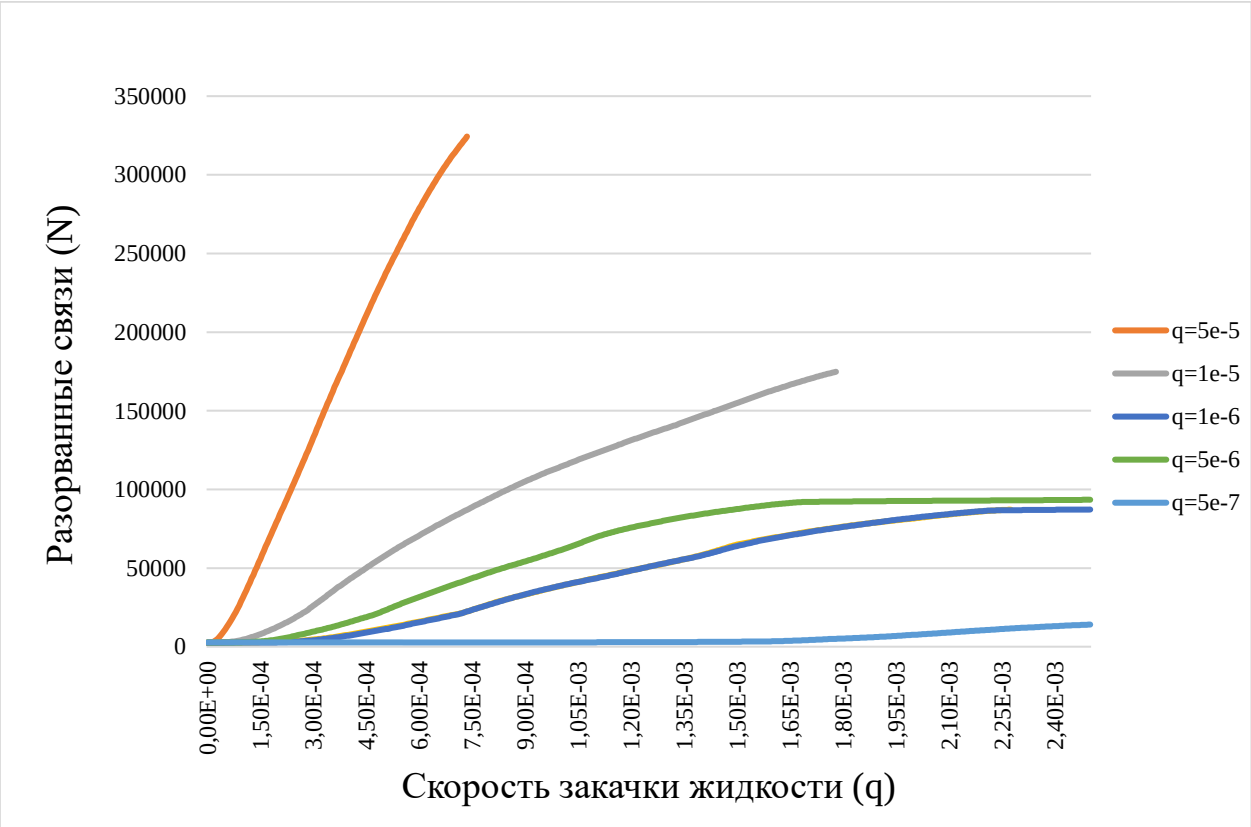

Рисунок 3.8. График зависимости количества разорванных связей N от скорости закачки жидкости q

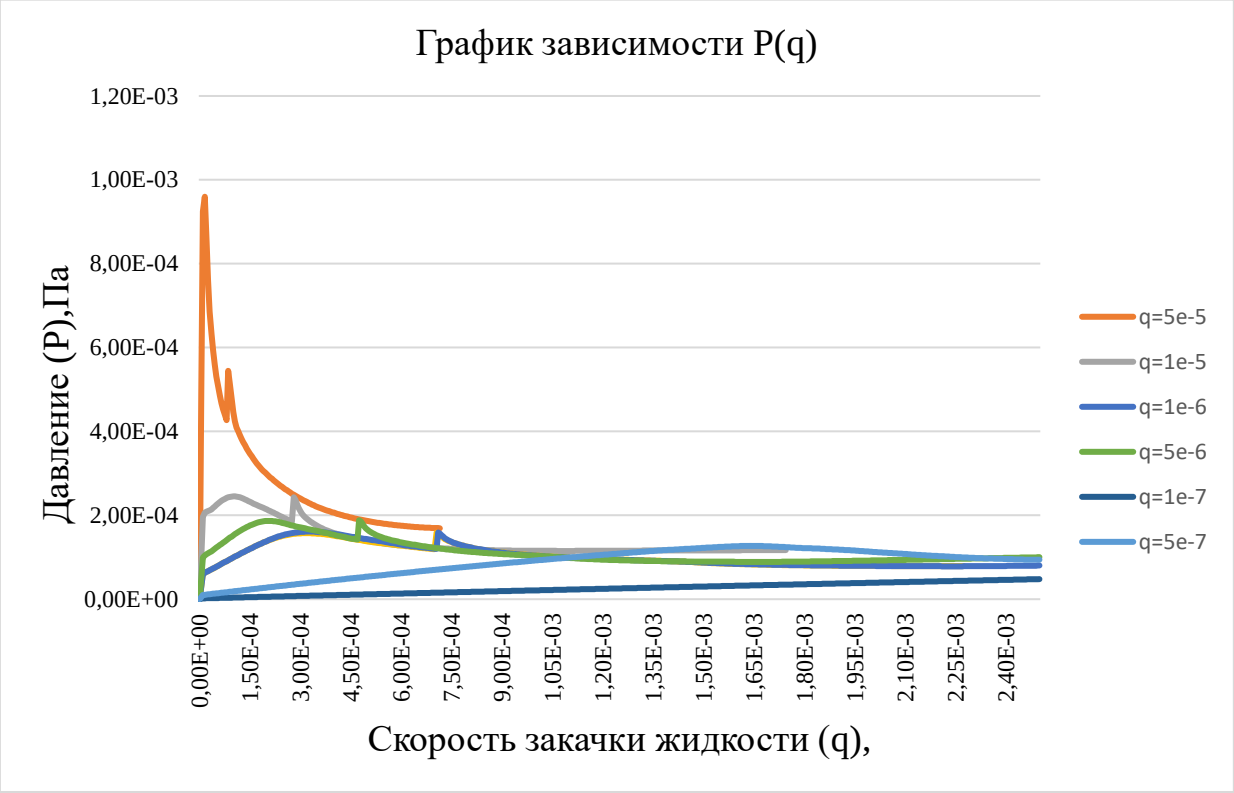

Рисунок 3.9. График зависимости количества разорванных связей N от скорости закачки жидкости q

Из рисунков 3.7 и 3.8 видно, что с увеличением скорости закачки жидкости q объем трещины и количество разорванных связей растет и потеря квазиравновесного состояния системы на данные параметры никак не влияет. Рисунок 3.8 является более показательным. Видно, что при скорости закачки q=5e-5 $м^3/с$ кривая давления P ведет себя менее линейно и устойчиво по сравнению с более маленькими скоростями. Непосредственно сама нелинейность давления в начальный момент времени объясняется тем, что в начале моделирования мы производим апроксимацию по давлению, и используем немного другую формулу (обратная зависимость между объемом и давлением).

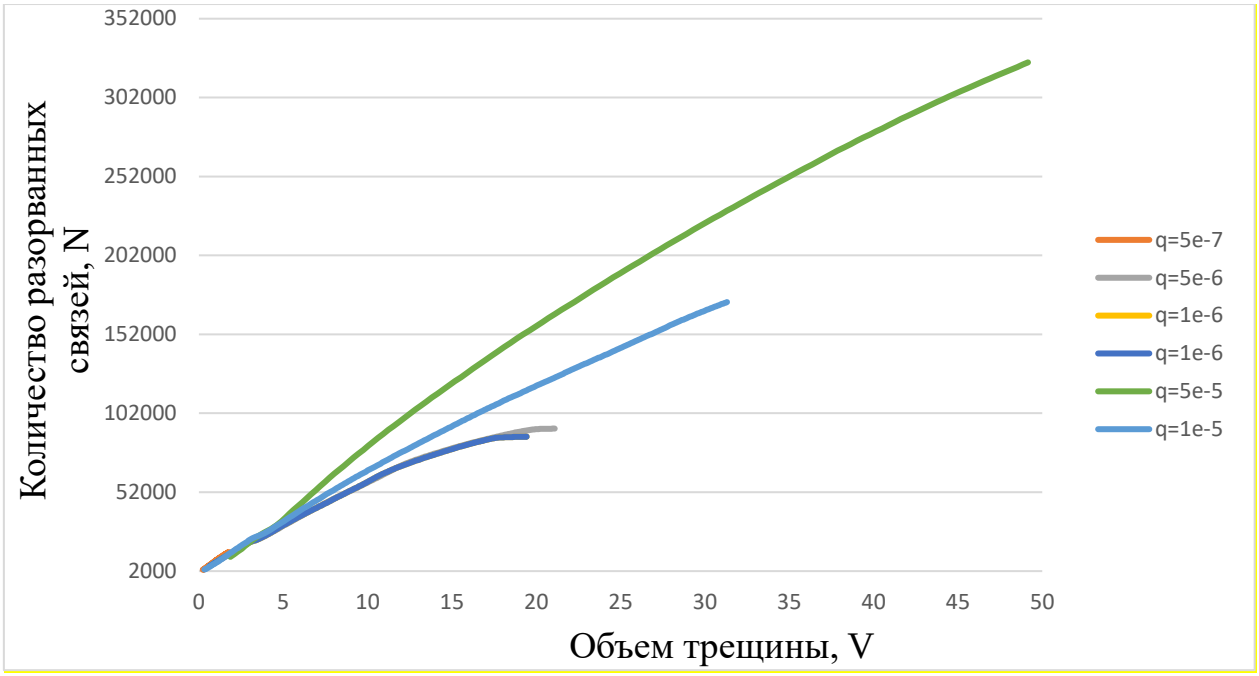

Рисунок 3.9. График зависимости количества разорванных связей N от объема трещины V

На рисунке 3.9 представлен результат анализы роста трещины с течением времени. Видно, что раскрытие при больших скоростях происходит быстрее и с большими объемами. Это связано с тем, что образовывается не одна трещина, а нескольно.

Так как проведенный анализ не дал показательных результатов, следующим этапом был произведен расчет потенциальной и кинетической энергии и проведен анализ полученных данных. Полученные данные, к сожалению, не дали положительных результатов, поэтому здесь не указаны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был изучен гидравлический разрыв пласта, существующие на сегодняшний день модели раскрытия трещины. Подробно разобран метод динамики частиц и моделирование, основанное на нем.

Для решения поставленных задач была использована существующая программа, которая позволила построить трехмерную модель упругой среды и создать в ней трещину.

Сравнение раскрытий, полученных при моделировании материала с аморфной структурой и аналитическим решением позволяют сделать вывод, что результат моделирования задачи о растяжении плоскости с трещиной под действием постоянного однородного поля напряжений хорошо согласуется с аналитическим решением аналогичной задачи.

Было проведено множество численных экспериментов и рассчетов для определения границ квазистатического процесса.

Для этого менялась скорость закачки жидкости q от меньшего к большему значению. В результате чего было получено следующая численная граница: при $q \in (0;5\text{-}6]$ – система находится в квазиравновесном состоянии; при $q > 5\text{-}6$ процесс роста трещины неквазистатичный.

После получения квазистатических границ был проведен анализ выходных данных: количества разорванных связей (N), объема трещины (V), давления в пласте (P). Анализ необходим для понимания выхода процесса роста трещины из состояния равновесия.

Так как анализ не дал корректных результатов, в дальнейшем планируется исследовать различные параметры и выявить закономерность перехода системы в неквазистатическое состояние.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.В. Аксаков, О.С. Борщук, И.С.Желтова [и др.] Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта: от математической модели к программной реализации // Нефтяное Хозяйство. – 2016. –№11. –С. 35-40;

2. Лапин В.Г., Черный С.Г. и др. Математические модели и численные методы // – 2014, – С. 268-271;

3. Редькин Г.М. Математическое моделирование трещиноватости массива горных пород // Известия высших учебных заведений. СевероКавказский регион. Технические науки, – no. 4, – 2005. – С. 79-82;

4. Barree R.D. A new look at fracture-tip screen-out bevavior // Petr. Tech. – 1991. – Vol. 43. – С. 138-143;

5. Clifton R.J., Brown U., Wang J-J. Multiple Fluids, Proppant Transport, and Thermal Effects in Three-Dimensional Simulation of Hydraulic Fracturing // SPE18198. – 1988;

6. D.O. Potyondy, The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: current trends and future directions // Geosystem Engineering. – Vol. 18. – Issue 1. – 2015;

7. Economides M.J. Hydraulic Fracture Optimisation with a p-3D Model. s.l. / T.Pitakbunkate, M.Yang, P.P.Valko// SPE 142303. – 2011

8. Kurashlga Mlchlo, Clifton R.J. Integral Equations for the Problem of a 3D Crack in an Infinite, FluidFilled, PoroelasticSolid // SPE 19386. – 1989;

9. Kuzkin V.A., Asonov I.E. Vector-based model of elastic bonds for simulation of granular // Physical review E 00, 001300 – 2012;

10. Majidi R., Miska S.Z. Thompson Modeling of drilling fluid losses in naturally fractured formation // SPE114630. – 1957, – С 261-269;

11. Meyer B.R., Cooper G.D., Nelson S.G. Real-Time 3-D Hydraulic Fracturing Simulation: Theory and Field Case Studies// SPE 20658. – 1990;

12. Meyer B.R. Design Formulae for 2-D and 3-D Vertical Hydraulic Fractures: Model Comparison and Parametric Studies// SPE 15240. – 1986;

13. Paderin G.V. Modified Approach to Incorporating Hydraulic Fracture Width Profile in Unified Fracture Design Model // SPE 182034. – 2016;

14. P.A. Cundall, O.D.L. Strack A discrete numerical model for granular assemblies // Géotechnique, Vol. 29, Is. 1, 1979, - C. 47-65;

15. Техносфера.ком - http://tekhnosfera.com/modelirovanie-protsessov-initsiatsii-i-rasprostraneniya-treschin-gidrorazryva-plasta#ixzz5HdymTcAA;