

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Ли Кайжуй
на тему: «Распространение трещины гидравлического разрыва в
неоднородных средах» по специальности 01.02.04 – «Механика
деформируемого твердого тела»

В диссертации рассматривается численное моделирование распространения трещины гидравлического разрыва в неоднородных средах. Изучается численное асимптотическое решение для начального состояния существующей трещины с зоной отставания жидкости, и на основе этого асимптотического решения моделируется эволюция существующей трещины от начального повторного открытия до начального распространения. Кроме того, в диссертации построена плоско-трехмерная модель для распространения гидравлической трещины в неоднородных средах, характеризующих неоднородной трещиностойкостью. Серия численных экспериментов проведена для исследования влияния неоднородной трещиностойкости пласта на рост трещины.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 153 страниц, список литературы содержит 168 наименований.

Во **введении** освещена общая характеристика диссертационного исследования,

включающая актуальность темы, цели, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования, научную новизну и так далее. Кроме того, представлен обзор работ по гидравлическому разрыву пласта (ГРП).

В первой главе исследуется асимптотическое решение для начального условия модели раскрытия существующей гидравлической трещины плоской деформации. Сложность этой задачи состоит в том, что задача является нестационарной в области с переменной границей. Используется метод возмущения для построения решения на основе определения производной, которое не требует начального условия. Кроме того, приведены модельные решения при различных уровнях горного давления для получения зависимости между горным давлением и решением модели.

Во второй главе исследуется моделирование эволюции плоско-деформированной трещины гидроразрыва с зоной отставания жидкости от начального открытия до начального распространения. Сложность этой задачи состоит в том, что давление жидкости и раскрытие трещины нелинейно связаны друг с другом по уравнению упругости и уравнению неразрывности. Дополнительно усложняет эту задачу то, что эти два уравнения рассчитываются не в одной и той же области трещины, и кончик трещины имеет сингулярность. С этой целью в алгоритме принята неявная разностная схема для построения решения нелинейной системы уравнений, и уравнение упругости преобразовано в кусочно-интегральную сумму для упрощения расчета. Чтобы уменьшить число итераций и сэкономить время расчета, использованы уточненные оцененные значения длины

заполненной жидкостью зоны, длины открытой трещины и раскрытия открытой трещины на следующем шаге по времени. Результаты показывают, что на первом этапе фронт трещины движется быстрее фронта гидравлической жидкости и приводит к увеличению длины зоны отставания жидкости. На этом этапе трещина характеризуется «острой» вершиной. На втором этапе «острая» вершина открывается из-за увеличения доли заполненной жидкостью зоны и развивается к «закругленной» вершине, а зона отставания жидкости быстро уменьшается.

В третьей главе исследуется влияние неоднородности прочности материала на рост трещины и изучена динамика распространения трещины и динамика движения жидкости в плоско-трехмерной трещине. В этой главе построена плоско-трехмерная модель трещины гидроразрыва с этапом до роста и этапом распространения с учетом неоднородной трещиностойкости пласта. В этой модели метод конечных объемов использован для решения уравнения движения жидкости с граничными условиями потока, метод трехмерных разрывных смещений выбран для решения уравнения упругости и вычисления коэффициента интенсивности напряжений на границе трещины. Конечная сопряженная нелинейная система модель решена методом Ньютона.

В четвертой главе подробно представлен численный алгоритм для решения плоско-трехмерной модели из третьей главы и проведена проверка этого алгоритма. Самое главное, что численное решение эволюции неравномерного распространения трещины приведено в этой главе. Помимо этого, большое количество численных экспериментов проведено для исследования влияния

размера, положения и доли неоднородной зоны с меньшей или больше трещиностойкостью, чем трещиностойкость остальных областей на распространение трещины. Получены результаты, характеризующие рост трещины:

- Наличие ослабленных областей приводит к локальной выпуклой форме трещины на ослабленных областях, наличие областей повышенной прочности приводит к локальной вогнутой форме трещины на областях повышенной прочности.
- Эффект ускорения роста ослабленных областей проявляется с уменьшением значения трещиностойкости ослабленных областей, эффект замедления роста областей повышенной прочности проявляется с увеличением значения трещиностойкости в областях повышенной прочности.
- При наличии ослабленных областей поверхности трещины развиваются быстрее благодаря большей скорости роста ослабленных областей, что уменьшает раскрытие трещины в целом. Наоборот, наличие областей повышенной прочности замедляет развитие поверхностей трещины и увеличивает общее раскрытие трещины.
- Доля ослабленных зон (как и доля зон повышенной прочности) сильно влияет на форму трещины и общую скорость роста трещины. Чем больше доля ослабленных зон (или чем меньше доля областей повышенной прочности), тем больше общая скорость роста трещины, и форма трещины изменяется с круглого профиля до приближенного эллиптического профиля и далее до приближенного прямоугольного профиля.
- Форма трещины, площадь поверхностей трещины и общая скорость роста трещины

более чувствительны к ослабленным областям, чем к областям повышенной прочности.

Основное **содержание диссертации** изложено в **пяти статьях**, которые опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах RSCI, Web of Science и Scopus.

Результаты, полученные в диссертации, имеют **теоретическое и прикладное значение**, так как результаты в первой и второй главах могут быть использованы для моделирования роста плоско-деформированной гидравлической трещины с зоной отставания жидкости, и плоско-трехмерная модель гидравлического разрыва пласта с неоднородной трещиностойкостью может быть использована в исследовании неравномерного роста трещины в горных породах.

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием апробированных методов исследования и сравнением с известными результатами, полученными другими учеными.

Основные положения исследования были представлены на всероссийских и международных конференциях, докладывались на научных семинарах.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание и выводы работы.

Отметим **некоторые замечания**, возникшие при анализе диссертации:

- Раздел 1: в постановке задачи необходимо было бы упомянуть, что рассматривается случай непроницаемой породы;

- Раздел 1.4.2: можно было бы подчеркнуть, что в безразмерных переменных задача определяется одним параметром -- безразмерным горным давлением;

- В статье Garagash, D.I., 2006. Propagation of a plane-strain hydraulic fracture with a fluid lag: Early-time solution. International journal of solids and structures, 43(18-19), pp.5811-5835. исследуется аналогичная задача, только с ненулевой трещиностойкостью $K_{Ic} > 0$. Можно было бы провести сравнение полученных результатов с результатами данной статьи (например, сравнить с O-vertex, который должен реализовываться при $t \ll 1$) – данное замечание скорее является рекомендацией по возможному развитию данной работы.

- В разделе 1.6 упоминается, что давление линейно в трещине при $x_i^f \ll 1$. Также этот результат используется в разделе 2. Из рисунка 1.4 данное утверждение не очень четко видно. Можно ли добавить версию иллюстрации для интервала x_i от 0 до 0.1.

- Раздел 1.6: на рис. 1.8-1.11 результаты приведены для момента времени $1e-4$ (аналогично рис. 1.3, 1.4)? Одинаковые ли значения безразмерного обжимающего давления (решение задачи) в упрощенной и полной постановках (на рис. 1.8-1.11 профили раскрытия и давления в лаге не изображены)?

- В разделе 2 можно ли добавить некоторые сравнения с существующими литературными источниками? Это было бы полезно, т.к. предложен новый численный алгоритм.

- В разделе 4.2.1 можно было бы добавить валидацию алгоритма для случая доминирования вязкости (M-vertex, решение выписано в работе Savitski, A.A. and

Detournay, E., 2002. Propagation of a penny-shaped fluid-driven fracture in an impermeable rock: asymptotic solutions. International journal of solids and structures, 39(26), pp.6311-6337).

- Результаты раздела 4 интересные, хорошо описаны особенности роста трещины для различных неоднородностей. Можно было бы добавить описание реальных примеров, в которых могут реализовываться неоднородности для K_{Ic} . Например, в каких конкретно случаях присутствует неоднородность при $\theta = 0$ и 180 .

- В разделе 4 присутствуют графики, например, 4.24, 4.35, из которых не очень понятно, какие именно случаи изображены. На легендах таких графиков присутствуют 5 цветных линий для $\Delta\phi$, а в подписи к графику 5 значений для θ .

- На Рис. 4.1 указано “соединенная система”, в то время как скорее всего имелась в виду сопряженная система уравнений.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы и могут рассматриваться как пожелания автору для дальнейших исследований в данном направлении. Диссертация аккуратно оформлена, все иллюстрации позволяют получить наглядное представление о численных результатах.

Ли Кайжунг была проделана большая работа по исследованию распространения гидравлической трещины в среде с неоднородной трещиностойкостью. В целом, диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне.

Заключение

На основании вышесказанного считаю, что диссертация «Распространение трещины гидравлического разрыва в неоднородных средах» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Высокая квалификация соискателя не вызывает сомнений. Считаю, что соискатель Ли Кайжуй заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, Осипцов Андрей Александрович
руководитель лаборатории
многофазных систем, доцент
Центра добычи углеводородов
АНО ВО «Сколковский институт



науки и

тел.: 7(4

e-mail:

Дата: 17.05.2021 г.

Адрес места работы:

143026, г. Москва, ул. Нобеля, д. 3,

АНО ВО "Сколковский институт науки и технологий"

Тел.: 7(495)2801481; e-mail: info@skoltech.ru

Подпись сотрудника Осипцова А.А.

АНО ВО "Сколковский институт науки и технологий" удостоверяю:

руководитель/кадровый работник

—
Подпись Осипцова Андрея Александровича заверяю:

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ

