



**ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА
ВБЛИЗИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

А. В. Азаров, С. В. Сердюков, А. В. Патутин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: antonazv@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Исследовано поведение трещины гидроразрыва вблизи горной выработки в плоскопараллельной постановке. Рассмотрен случай, когда горная порода находится в условиях гидростатического давления, а инициирующая трещина ориентирована в направлении горной выработки. Установлено, что на траекторию трещины большое влияние оказывает соотношение величины гидростатического давления и критического напряжения горной породы на растяжение. Показано, что при повышении гидростатического давления по отношению к критическому напряжению на разрыв трещина раньше начинает отклоняться от горной выработки и не выходит на ее поверхность. Показано, что при различных условиях трещинам гидроразрыва не удается полностью обойти выработку из-за возникновения сильных деформаций в области между выработкой и трещиной.

Гидравлический разрыв, горная выработка, моделирование роста трещины гидроразрыва

INVESTIGATION OF HYDRAULIC FRACTURE GROWTH NEAR A MINE OPENING

A. V. Azarov, S. V. Serdyukov, and A. V. Patutin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: antonazv@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The behavior of a hydraulic fracture near the mine opening in a plane-parallel formulation has been investigated. The case was considered, when the rock was under hydrostatic pressure, and the initiating crack was oriented in the direction of mine opening. It is found that the fracture path is greatly influenced by the ratio of hydrostatic pressure and critical tensile stress of rock. It is shown that when the hydrostatic pressure increases with respect to critical tensile stress, the fracture begins to deviate from the mine opening earlier and does not reach its surface. It is also shown that under various conditions, fractures cannot bypass the mine opening completely due to the occurrence of severe strains in the area between the opening and fracture

Hydraulic fracturing, mine opening, hydraulic fracture growth modeling.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является технологической операцией, которая используется при добыче полезных ископаемых. Формирование трещины с оптимальными геометрическими размерами и ориентацией — одна из важнейших проблем ГРП. На развитие трещины существенное влияние оказывают такие факторы, как напряженно-деформированное состояние горных пород и их свойства, характеристики реализуемого нагружения (конструкция и особенности скважинного устройства, скорость закачки рабочей жидкости и ее свойства и т. д.). Большую сложность представляет понимание поведения разрыва в шахтных условиях, так как горные выработки могут находиться в непосредственной близости к трещинам и влиять на них. Одним из способов изучения ГРП в таких условиях является численное моделирование.

Данная работа направлена на исследование поведения трещины гидроразрыва вблизи горной выработки на основе численных экспериментов. Задача решалась в плоскопараллельной постановке, горная порода находилась в условиях гидростатического давления, а инициирующая трещина была ориентирована в направлении горной выработки. В качестве численного метода решения уравнений модели использовался метод конечных элементов.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ

Рассмотрим задачу распространения трещины в однородной упругой среде, деформации которой будут определяться следующими уравнениями:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_0\delta_{ij}. \quad (1)$$

где σ_{ij} — тензор напряжений твердого тела; $\varepsilon_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$ — тензор деформаций твердого тела; u_i — деформации тела; λ, μ — параметры Ламе; ε_0 — объемная деформация. Поток жидкости в трещине будет описываться уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = 0, \quad (2)$$

где d — раскрытие трещины; $\vec{q} = (q_1, q_3, q_2)$; $q_i = dk(\partial p / \partial x_i)$; k — эффективная проницаемость трещины в i -м направлении. В рамках рассматриваемой задачи считаем, что течение жидкости внутри трещины является течением Пуазейля, а жидкость — ньютоновской. В этом случае эффективная проницаемость трещины находится как

$$k = -\frac{d^2}{12\eta}, \quad (3)$$

где η — динамическая вязкость жидкости.

Моделирование роста трещины проводилось на основе когезионной модели разрушения (CZM) [1]. При использовании CZM предполагается, что перед кончиком трещины существует зона разупрочнения материала, где возникают силы сцепления σ , которые связываются с деформациями u по некоторому закону (рис. 1а). При таком подходе не требуется определения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} . Вместо него задаются два независимых параметра σ_c и G_{Ic} . Параметр σ_c является критическим напряжением, а G_{Ic} — критической энергией, высвобождаемой при разрушении, которая вычисляется как $G_{Ic} = \int_0^{u_f} \sigma du$, где u_f — скачок смещений, соответствующий полному разрушению материала. Когда зона когезионного разрушения мала по сравнению с длиной трещины, коэффициент интенсивности напряжений и критическая энергия, высвобождаемая при разрушении, связаны формулой [2]

$$K_{Ic} = \sqrt{G_{Ic} \frac{E}{1-\nu^2}}. \quad (4)$$

где E — модуль упругости материала; ν — коэффициент Пуассона.

Разрушение материала начинается при достижении критического напряжения σ_c . Далее согласно задаваемому характеру разрушения вычисляются новые значения критического напряжения $\bar{\sigma}_c$ и модуля упругости \bar{E} . Характер разрушения материала определяется переменной разрушения D , которая зависит от деформаций за пределом зоны линейной упругости. На рис. 1б приведен пример функции $D(u)$, где $D = 0$ соответствует неразрушенному состоянию, а $D = 1$ соответствует полному разрушению.

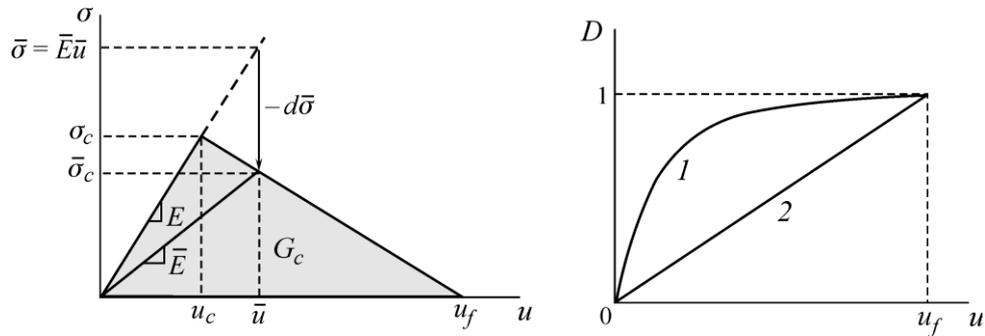


Рис. 1. Зависимость напряжений в материале σ от деформаций u (а) и функция разрушения $D(u)$ (б): 1 — экспоненциальный закон разрушения; 2 — линейный

Расчет нового состояния происходит с учетом функции $D(u)$ по формулам: $\bar{\sigma}_c = (1 - D)\sigma_c$, $\bar{E} = (1 - D)E$. Данный процесс выполняется до тех пор, пока не будет достигнуто состояние, при котором $\bar{\sigma}_c = 0$, $\bar{E} = 0$, что означает полное разрушение материала и образование трещины. Для инициации процесса разрушения применяется критерий максимальных главных напряжений.

Уравнения системы (1) будем решать численно с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM — eXtended Finite Element Method) [3–5]. Метод XFEM позволяет получать решения, содержащие скачок перемещений, с помощью разрывных функции, а решения вблизи вершины трещины — с помощью специальных асимптотических функций. Метод позволяет моделировать процесс инициации и распространения трещины в направлении, которое определяется из анализа напряженного состояния в окрестности ее вершины и может быть любым.

В данной работе применяется реализация XFEM, основанная на использовании фантомных узлов [5] и когезионного закона разрушения [6]. В этом случае общее решение для перемещений $u(x)$, содержащее разрыв, запишется как

$$u(x) = \sum_{i=1}^N [N_i(x)u_i + H(x)a_i], \quad (6)$$

где $N_i(x)$ — интерполяционные функции; N — число узлов в элементе; u_i — узловые перемещения; a_i — добавочные узловые перемещения; $H(x)$ — функция Хевисайда. Первый член в сумме описывает непрерывную часть решения, второй — часть решения, связанную с разрывом. Приведенный способ моделирования ГРП является эффективным в плане вычислительной сложности и дает результаты, которые согласуются с экспериментальными данными [7].

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Рассмотрим задачу взаимодействия трещины гидроразрыва и горной выработки в плоскопараллельной постановке. Пусть имеется двумерная область, содержащая горную выработку в форме круга (рис. 2). Определим иницирующую трещину, ориентированную в направлении выработки и расположенную на расстоянии одного диаметра от нее (рис. 2).

На внешней границе области зададим условия, обеспечивающие гидростатическое давление в окрестности выработки. Граница выработки (в данном случае окружность) является свободной. Для численных расчетов выберем следующие параметры: модуль упругости горной породы $E = 3.6$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, динамическая вязкость жидкости $\eta = 0.001$ Па·с, размеры расчетной области 110×65 м, радиус горной выработки 2.5 м; критическая энергия разрушения $G_c = 280$ Н/м. Дискретизация расчетной области представлена на рис. 2. Минимальный размер элемента при расчетах составлял 0.17 м.

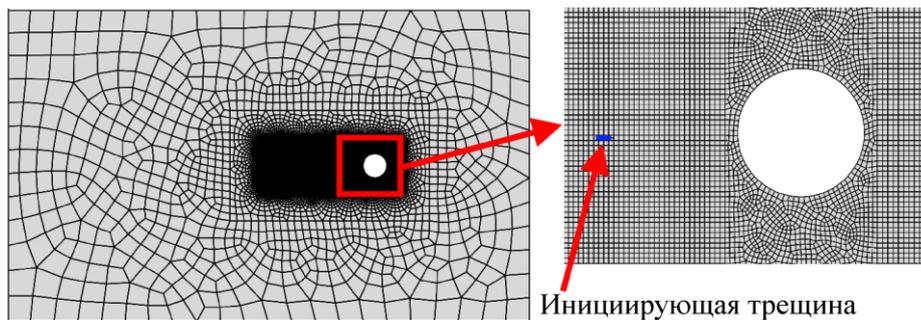


Рис. 2. Дискретизация двумерной области с горной выработкой в форме круга. Слева показана иницирующая трещина, ориентированная в направлении выработки

Установлено, что на траекторию трещины вблизи выработки значительное влияние оказывает соотношение гидростатического давления в среде P_h и критического нормального напряжения σ_c . На рис. 3 изображены траектории трещин при различных соотношениях P_h и σ_c . Для их получения использовалось гидростатическое давление $P_h = 15 \cdot 10^5$ Па. Серия численных экспериментов осуществлялась с различными значениями критического напряжения σ_c , т. е. изменялось отношение P_h / σ_c .

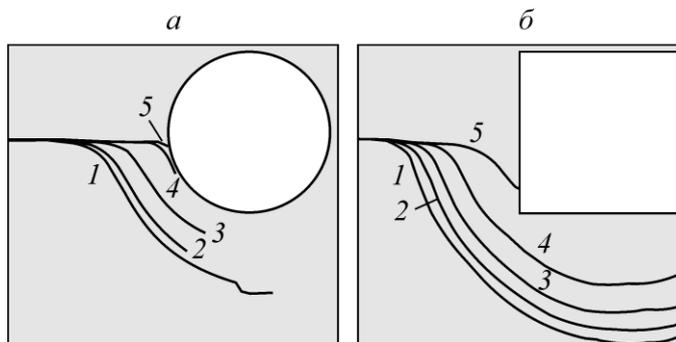


Рис. 3. Траектории трещин вблизи горной выработки: *а* — круглой формы; *б* — квадратной. Номера обозначены кривые, полученные при различном отношении P_h / σ_c : 1 — $\sigma_c = 0.125P_h$; 2 — $\sigma_c = 0.25P_h$; 3 — $\sigma_c = 0.5P_h$; 4 — $\sigma_c = 1.0P_h$; 5 — $\sigma_c = 2.0P_h$

Из рис. 3*а* видно, что чем ниже значение σ_c по отношению P_h , тем раньше трещина гидроразрыва начинает отклоняться от выработки. Увеличение критического напряжения приводит к тому, что трещина выходит в выработку. Аналогичные эксперименты выполнены для выработки квадратной формы со стороной 5 м (рис. 3*б*), где были получены схожие результаты. В случае квадратной выработки трещины начинали раньше отклоняться и проходили на большем расстоянии от нее.

Установлено, что трещинам гидроразрыва не удастся полностью обойти выработку. Численные эксперименты показали, что после некоторого объема закаченной жидкости трещина прекращает свой рост. Дальнейшая закачка приводит только к увеличению раскрытия трещины и повышению деформаций в области между выработкой и трещиной. На рис. 4 и 5 темными цветами обозначены зоны возникновения сильных деформаций для круглой и квадратной выработки при $P_h = 15 \cdot 10^5$ Па и $\sigma_c = 7.5 \cdot 10^5$ Па ($\sigma_c = 0.5P_h$). В обоих случаях закачен одинаковый объем жидкости. Отметим, что на рис. 3*а* изображены итоговые трещины, для которых дальнейшая закачка жидкости не приводила к их росту. Для выработки квадратной формы длина трещин оказалось больше, но также существовал момент остановки роста с последующим увеличением их раскрытия и деформаций горных пород.

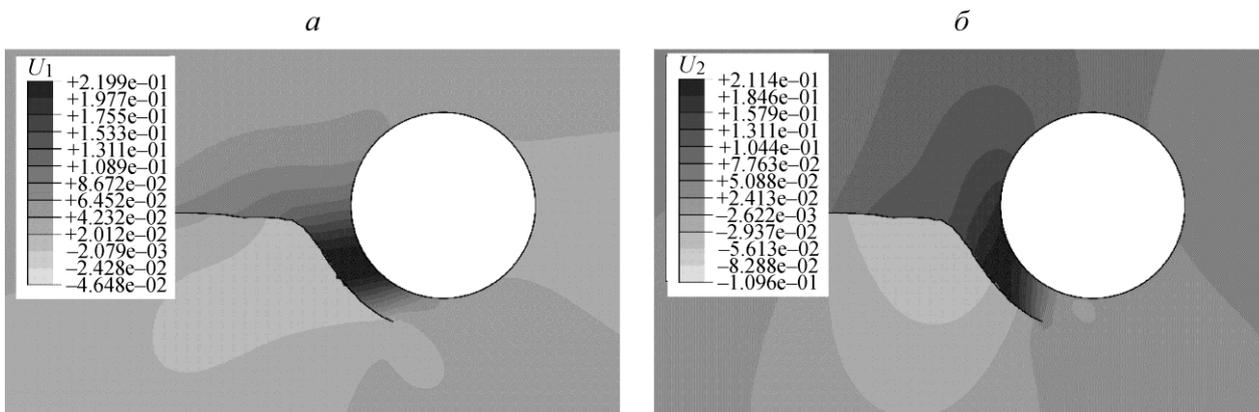


Рис. 4. Смещения горной породы вблизи выработки круглой формы, м: *a* — в горизонтальном направлении; *б* — в вертикальном

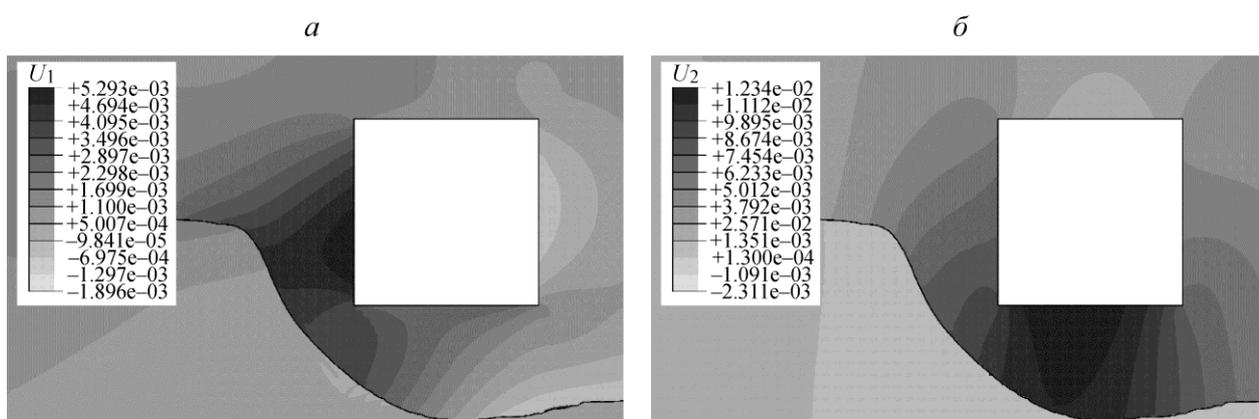


Рис. 5. Смещения горной породы вблизи выработки квадратной формы, м: *a* — в горизонтальном направлении; *б* — в вертикальном

ВЫВОДЫ

Исследовано поведение трещины гидроразрыва вблизи горной выработки. Рассмотрена плоскопараллельная постановка задачи и случай, когда инициирующая трещина ориентирована в направлении выработки. Установлено, что когда горные породы находятся под действием гидростатического давления, трещина гидроразрыва отклоняется от горной выработки. Степень отклонения в основном определяется соотношением величины гидростатического давления и критического напряжения горных пород на растяжение. Чем выше гидростатическое давление по отношению к критическому напряжению на разрыв, тем раньше трещина начинает отклоняться от горной выработки.

Численные эксперименты показали, что полностью обойти выработку трещина не может по причине ослабления горных пород в области между выработкой и трещиной. Наличие области ослабления горных пород приводит к тому, что после некоторого объема закаченной жидкости трещины прекращают свой рост. Дальнейшая закачка жидкости приводит только к увеличению раскрытия трещин и увеличению деформаций в области между трещиной и выработкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ortiz M. and Pandolfi A. Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis, International journal for numerical methods in engineering, 1999, vol. 44, no. 9, pp. 1267–1282.
2. Irwin G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, SPIE Milestone Series, 1997, vol. 137, pp. 167–170.

3. **Song J. H., Areias, P. M. A., and Belytschko T.** A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, vol. 67, no. 6, pp. 868–893.
4. **Sukumar N., Prévost, and J. H.** Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method Part I: Computer implementation, *International Journal of Solids and Structures*, 2003, vol. 40, no. 26, pp. 7513–7537.
5. **Belytschk T., Chen H., Xu J., and Zi G.** Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment, *International journal for numerical methods in engineering*, 2003, vol. 58, no. 12, pp. 1873–1905.
6. **Salimzadeh S. and Khalili N.** A three-phase XFEM model for hydraulic fracturing with cohesive crack propagation, *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 69, pp. 82–92.
7. **Azarov A. V., Kurlenya M. V., Serdyukov S. V., and Patutin A. V.** Fracture development near the free surface in an isotropic poroelastic medium, *Journal of Mining Science*, 2019, no. 1, pp. 3–11. [**Азаров А. В., Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В.** Особенности развития трещины гидроразрыва вблизи свободной поверхности в изотропной пороупругой среде // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 1. — С. 3–11.]