

A. B. Azarov¹, C. B. Serdyukov¹*

Численное исследование влияния пороупругих параметров среды на развитие трещины гидроразрыва вблизи цилиндрической полости

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: antonazv@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрена задача развития гидроразрыва пласта вблизи цилиндрической полости в пороупругой среде. Создана математическая модель, на основе которой проведены численные исследования влияния пороупругих параметров на поведение гидроразрыва. В качестве численного метода, с помощью которого решались уравнения модели, использовался расширенный метод конечных элементов (XFEM). В работе показано, что такие параметры, как коэффициент Био, проницаемость среды или темп закачки, влияют на траектории трещин, давление их распространения и раскрытие. Продемонстрированы некоторые особенности в поведении кривых давления и раскрытия устья в рамках рассматриваемой модели. Показано, что в некоторых случаях использование упругой и пороупругой модели среды может приводить к качественно различным результатам. Также проведены исследования влияния проницаемости поверхности полости на траектории развития трещин.

Ключевые слова: гидравлический разрыв, пороупругая среда, рост трещины, полость в среде, расширенный метод конечных элементов

A. V. Azarov¹, S. V. Serdyukov¹*

Numerical study of the influence of poroelastic medium parameters on the hydraulic fracture propagation near a cylindrical cavity

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: antonazv@mail.ru

Abstract. The paper considers the problem of hydraulic fracturing propagation near a cylindrical cavity in a poroelastic medium. A mathematical model was created, on the basis of which numerical studies of the effect of poroelastic parameters on the behavior of hydraulic fracturing were carried out. The extended finite element method (XFEM) was used as a numerical method by which the model equations were solved. The paper shows that the Biot coefficient, the permeability of the medium or the injection rate affect the trajectories of fractures, propagation pressure and opening. Some features in the behavior of the pressure and mouth opening curves in the created model are demonstrated. It is shown that in some cases the use of elastic and poroelastic models of the medium can lead to qualitatively different results. Also studies of the effect of cavity permeability on the trajectory of crack propagation were carried out.

Keywords: hydraulic fracturing, poroelastic medium, crack growth, cavity in medium, extended finite element method

Введение

На сегодняшний день технология гидравлического разрыва пласта (ГРП) широко используется при добычи полезных ископаемых. В нефтегазовой отрасли её применяют для интенсификации добычи нефти или газа [1], в горнодобывающей промышленности для разупрочнения кровли горной породы [2,3], дегазации угольных пластов [4], решения задачи по определению напряженного состояния среды [5] и т.д.

Процесс ГРП заключается в закачивании жидкости в горную породу под большим давлением. В результате происходит разрушение породы с образованием трещин. Одна из задач, которая при этом возникает, заключается в оценке и прогнозировании параметров создаваемых трещин.

В многочисленных работах показано, что на разрывы оказывают сильное влияние напряженное состояние среды, её прочностные, упругие, пороупругие характеристики, параметры жидкости разрыва и т.д. Меньшее количество исследований посвящено изучению закономерностей развития трещин вблизи полостей, несмотря на возможность возникновения таких условий, например, при проведении ГРП вблизи горных выработок.

В работах [6-10] численными методами изучался вопрос развития гидроразрывов вблизи полостей, используя упругие модели сред. В исследованиях [6-10] рассматривалась двумерная постановка задачи, в [11] трехмерная. Показано, что полости оказывают влияние на траектории создаваемых трещин и в некоторых случаях, например при всестороннем сжатии среды, работают как аттракторы. В работах [12,13] рассматривались двумерные пороупругие модели сред. Показано, что при повышении связности задачи, понижении проницаемости или повышении темпа закачки жидкости траектории трещин меньше искривляются вблизи полостей.

Данная работа посвящена изучению закономерностей распространения ГРП вблизи цилиндрической полости в пороупругой среде. Исследования выполняются на основе численных экспериментов. В качестве численного метода, с помощью которого решаются уравнения модели, используется расширенный метод конечных элементов.

Уравнения модели

Моделирование роста трещины гидроразрыва производится в квазистатическом приближении. Уравнение равновесия при условии отсутствия объемных сил может быть записано как:

$$\nabla \cdot \sigma_{ij} = 0 \quad (1)$$

Напряжения и деформации связаны друг с другом системой уравнений:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_0\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij}, \quad (2)$$

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 твердого скелета; α — коэффициент Био; p — давление жидкости внутри пороупругого тела; δ_{ij} — символ Кронекера. Деформация породы и поток жидкости в ней связаны уравнением:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} + v_{k,k} = 0 \quad (3)$$

где M — модуль Био; v_k — скорость фильтрации жидкости, которая определяется законом Дарси:

$$v_i = -\frac{k}{\mu} p_{,i} \quad (4)$$

где k — проницаемость среды, μ — динамическая вязкость флюида.

Раскрытие трещины и поток жидкости внутри неё связаны следующим соотношением:

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = 0, \quad (5)$$

где d — раскрытие трещины; $\vec{q} = (q_1, q_3, q_2)$; $q_i = d \tilde{k} (\partial p / \partial x_i)$; \tilde{k} — проницаемость трещины в i -том направлении, которая определяется как $\tilde{k} = -\frac{d^2}{12\eta}$.

Для моделирования процесса разрушения используется когезионная модель разрушения (CZM) [14]. Уравнений модели решались численно с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM) [15,16].

Постановка задачи и параметры модели

Для численных экспериментов была рассмотрена трехмерная область в форме куба со стороной 10 метров, которая содержала цилиндрическую полость с диаметром 1 метр (см. рис. 1а). Направление оси полости в модели совпадало с направлением z . Вблизи полости устанавливалась начальная дисковая трещина, плоскость которой совпадала с плоскостью $x=5$ метров (рис. 1б). Центр дисковой трещины располагался в точке (5, 3.2, 5).

Внешние границы области были закреплены (условие нулевых перемещений), поверхность полости считалась свободной, в начальную дисковую трещину устанавливался поток жидкости. Внутри расчетной области задавалось всестороннее напряжение сжатия.

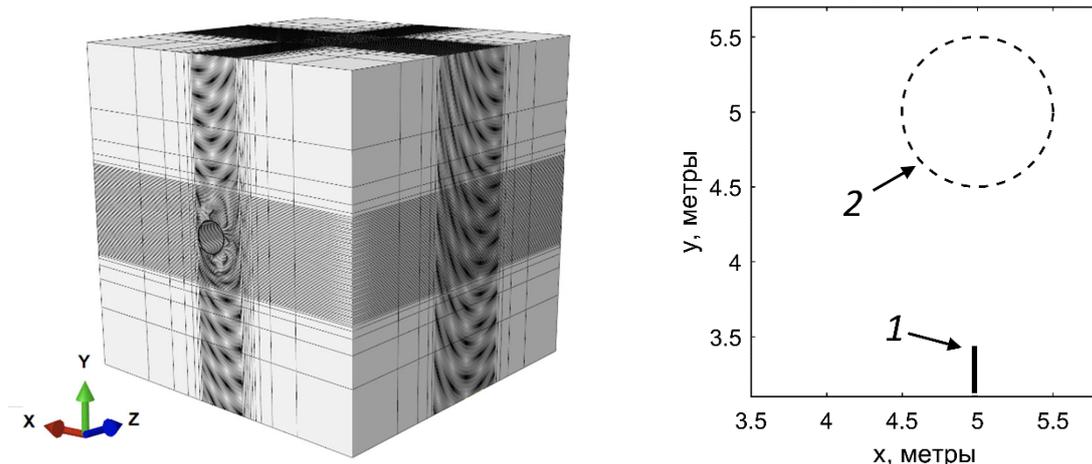


Рис. 1. а) трехмерная модель расчетной области вместе с сеткой; б) положение начальной дисковой трещины относительно полости в плоскости xy . Цифрой 1 обозначена трещина, 2 – контуры полости.

Значения параметров модели брались следующими: напряжение всестороннего сжатия – 3еб, модуль упругости – 3.0 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3, критическое напряжение на растяжение – 1 МПа, критическая энергия разрушения 120 Н/м, динамическая вязкость жидкости 0.001 Па·с, коэффициент Био – 0.75, проницаемость среды – 10 мкм² и скорость закачки – 0.004 м³.

Результаты численных экспериментов

На рисунке 2 изображены пересечения получаемых трещин с плоскостью $z=5$ метров. Из рис. 2а и 2б видно, что повышение связности задачи (значение коэффициента Био) или увеличение проницаемости среды приводит к меньшему отклонению трещины от полости. Изменение темпа закачки при выбранных параметрах не давала существенных изменений в результатах (рис.2в). На рисунке 2г показаны траектории трещин в упругой и пороупругой модели при базовых параметрах и напряжении всестороннего сжатия равным 1 МПа. Как видно, в первом случае разрыв отклонился от полости, во втором – разрыв вышел на её поверхность. Т.е. в некоторых случаях рассмотрение упругой и пороупругой модели может давать качественно разные результаты.

На рисунке 3 изображены проекции трещины на плоскость yz (рис. 3а) и xz (рис. 3б) при базовых параметрах модели. Цвет соответствует объему закаченной жидкости в трещину. В данных проекциях изменение попрупурических параметров не приводило к заметным результатам. Во всех случаях, трещина сначала развивалась в направлении полости, после чего происходил рост в направлении вдоль полости.

На рисунке 4 изображены кривые давления и раскрытия устья трещины при различной проницаемости среды. В данном случае понижение проницаемости приводило к повышению давления жидкости разрыва (рис. 4а) и увеличению раскрытия устья (рис. 4б). Помимо этого, на графике 2а наблюдается резкое па-

дение давления при определенном объеме закаченной жидкости. Данный момент времени совпадает с моментом переориентации трещины параллельно полости. Повышение коэффициента Био и темпа закачки также приводило к повышению давления разрыва и увеличению раскрытия. Графики получались аналогичными представленным и поэтому здесь не приводятся.

В последних экспериментах исследовалось, как влияет проницаемость полости на траекторию ГРП. Получено, что в такой постановке задачи, изменение в полностью проницаемой и непроницаемой полостью были незначительными.

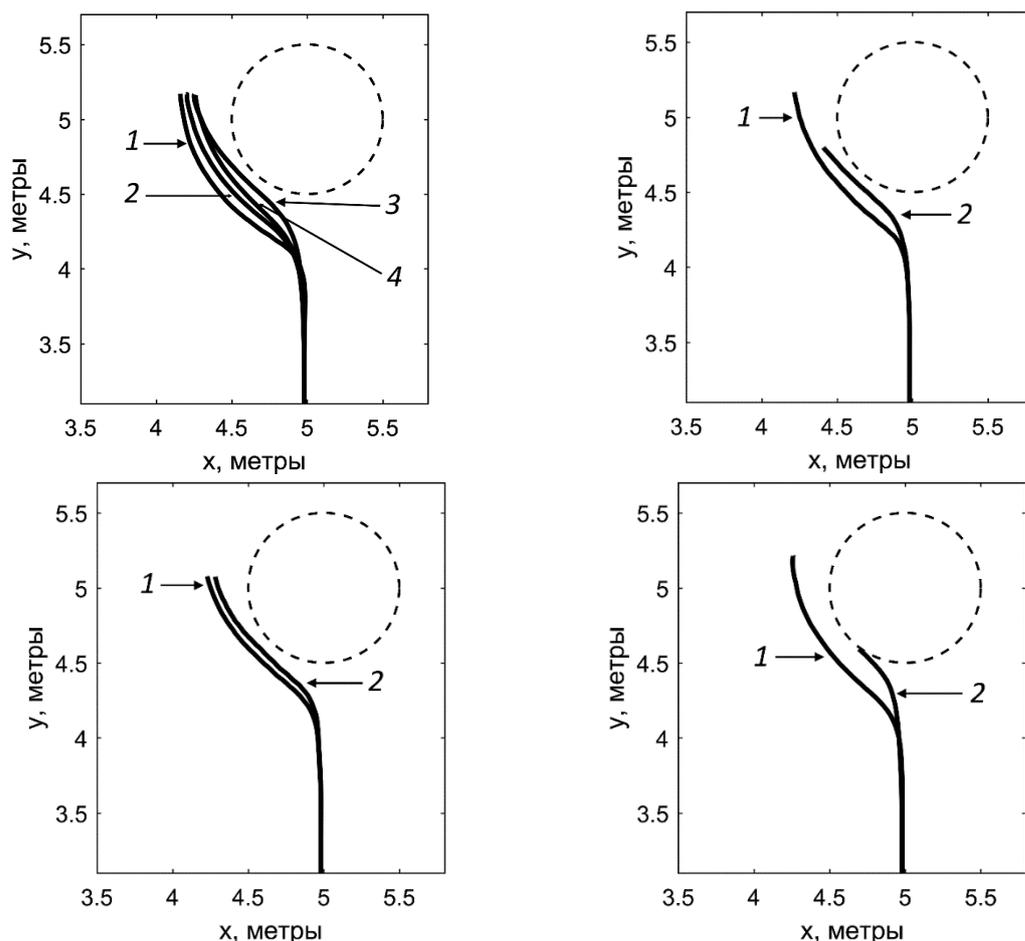


Рис. 2. Траектории трещин в плоскости $z=5$ метров при а) различной связности задачи: 1 – $\alpha=0.9$, 2 – $\alpha=0.75$, 3 – $\alpha=0.5$, 4 – $\alpha=0$; б) различной проницаемости среды: 1 - 10 мкм^2 , 2 – 0.1 мкм^2 ; в) при различном темпе закачки: 1 – 0.0002 м^3 ; 2 – 0.004 м^3 ; г) выход трещины в полость в пороупругой модели (кривая 2) и отклонение трещины от полости в упругой среде (кривая 1) при одинаковом поле всестороннего сжатия в 1 МПа.

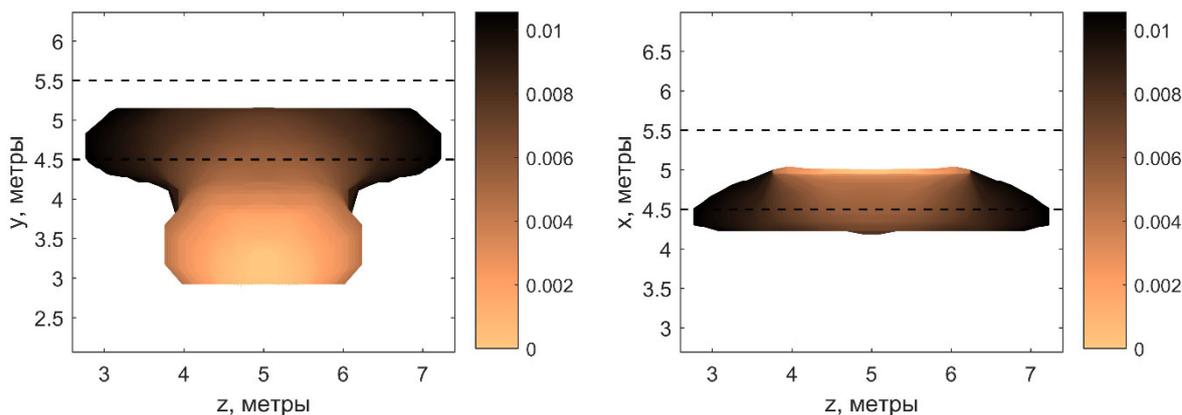


Рис. 3. Проекция трещины на плоскость yz (а) и xz (б) посчитанной для базовых значений параметров пороупругой модели. Цвет соответствует объему закаченной жидкости в трещину.

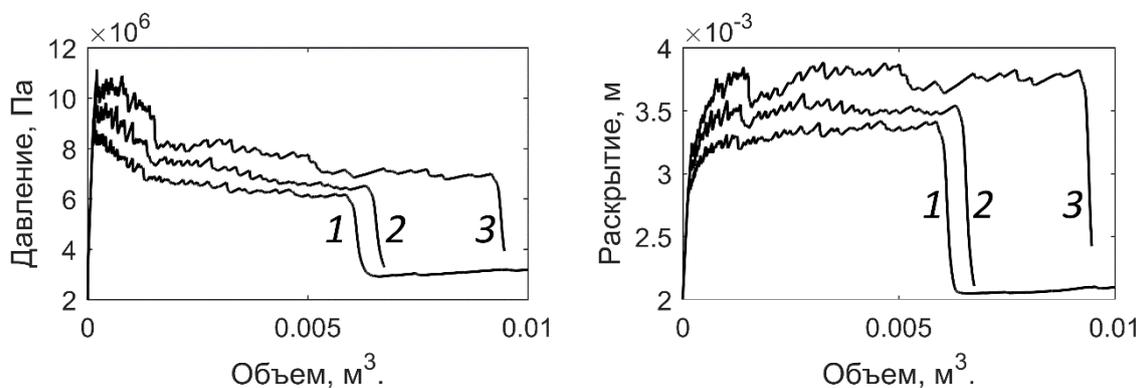


Рис. 4. Давление жидкости в устье трещины при различной проницаемости породы в случае, когда трещина направлена в полость: 1 – $k=10$ мкм²; 2 – $k=1$ мкм²; 3 – $k=0.1$ мкм².

Выводы

В работе была рассмотрена задача взаимодействия трещины гидроразрыва и полости в рамках пороупругой модели среды. Показано, что пороупругие параметры влияют на траекторию трещины. В частности, увеличение значения коэффициента Био, темпа закачки или уменьшение проницаемости породы приводило к меньшему отклонению трещины от полости и большему давлению разрыва. Продемонстрировано, что в некоторых ситуациях использование пороупругой и упругой модели среды может приводить к качественно разным результатам.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 121052500138-4 (FWNZ-2021-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boak J., Kleinberg R. Shale gas, tight oil, shale oil and hydraulic fracturing // *Future Energy*. – Elsevier, 2020. – P. 67–95.
2. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // *ФТПРПИ*. – 2014. – № 5. – С. 137–143.
3. Yang, J., Liu, B., Bian, W., Chen, K., Wang, H., Cao, C. Application Cumulative Tensile Explosions for Roof Cutting in Chinese Underground Coal Mines // *Archives of Mining Sciences*. – 2021. – Vol. 66. – №. 3. – P. 421–435.
4. Леконцев Ю. М., Сажин П. В., Темирязева О. А. Дегазация угольного пласта методом поинтервального гидроразрыва и оборудование для его реализации // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 89–92.
5. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // *ФТПРПИ*. – 2016. – №. 6. – С. 6–14.
6. Xia B., Zhang X., Yu B., and Jia J. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, vol. 28, no. 6, pp. 951 – 958.
7. Liu Z., Lu Q., Sun Y., Tang X., Shao Z., and Weng Z. Investigation of the Influence of Natural Cavities on Hydraulic Fracturing Using Phase Field Method, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, vol. 44, no 12, pp. 10481 – 10501.
8. Chen Z., Li X., Dusseault M. W., and Weng L. Effect of excavation stress condition on hydraulic fracture behaviour, *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, vol. 226, pp. 106871.
9. Azarov A. V., Serdyukov S. V., and Patutin A. V. Investigation of hydraulic fracture growth near a mine, *Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 26 – 31. [Азаров А. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Исследование роста трещины гидроразрыва вблизи горной выработки // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 26 – 31.]
10. Martynyuk P. A. and Sher E. N. Development of a crack close to a circular opening with an external field of compressive stresses, *Journal of Mining Science*, 1996, vol. 32, no. 6, pp. 453 – 463. [Мартынюк П. А., Шер Е. Н. О развитии трещины вблизи кругового отверстия с учетом внешнего поля сжимающих напряжений // *ФТПРПИ*. — 1996. — № 6. — С. 19 – 30.]
11. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Rrybalkin L.A., Patutin A.V. Shapes of hydraulic fractures in the neighborhood of cylindrical cavity, 2021, no. 6, pp. 72 –84 [Сердюков С.В., Азаров А.В., Рыбалкин Л.А., Патутин А.В. О форме трещин гидроразрыва породного массива в окрестности цилиндрической полости // *ФТПРПИ*. — 2021. — № 6. — С. 72 – 84]
12. Azarov A. V., Serdyukov S. V., and Patutin A. V. Investigation of hydraulic fracture in a poroelastic medium containing a cavity, *Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 12 – 17. [Азаров А. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Исследования развития трещины гидроразрыва в пороупругой среде, содержащей полое включение // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2020. — Т. 7. — №. 1. — С. 12 – 17.]
13. Azarov A., Patutin A., Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media // *Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11. – №. 22. – С. 11004.
14. Ortiz M., 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.
15. Belytschko T., Chen H., Xu J., 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.
16. Jafari A., Vahab M., Khalili N. Fully coupled XFEM formulation for hydraulic fracturing simulation based on a generalized fluid leak-off model // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2021. – Т. 373. – С. 113447.