

А. В. Азаров^{1}, С. В. Сердюков¹*

Численное исследование закономерностей изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи полости

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

Аннотация. В работе изучаются закономерности изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи цилиндрической полости. Исследования проводятся на основе численных экспериментов. Основные уравнения математической модели, которые описывают процесс распространения гидроразрыва, решаются с помощью метода расширенных конечных элементов, реализованного в программном пакете Abaqus. Рост трещины проводится в квазистатическом приближении. Показано, как давление разрыва зависит от расстояния между начальной трещиной и полостью, от различного уровня напряжении всестороннего сжатия, а также от ориентации начальной трещины в пространстве. Приводятся траектории трещин, которые соответствуют полученным кривым давления. Отдельно рассматривается случай, когда среда находится в условиях неоднородного всестороннего сжатия. Показаны особенности, которые проявляются на кривых давления при переориентации трещины гидроразрыва.

Ключевые слова: гидравлический разрыв, рост трещины, гидроразрыв вблизи полости, давление распространения гидроразрыва, расширенный метод конечных элементов, численный эксперимент

A. V. Azarov^{1}, S. V. Serdyukov*

Numerical study of changes in the propagation pressure of a hydraulic fracturing crack during its growth near a 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 changing the propagation pressure of a hydraulic fracturing crack as it propagates near a cylindrical cavity. Research is carried out on the basis of numerical experiments. The basic equations of the mathematical model that describe the process of hydraulic fracturing propagation are solved using the extended finite element method (XFEM) implemented in the Abaqus software package. It is shown how fluid pressure depends on the distance between the initial crack and the cavity, on different levels of compression stress, as well as on the orientation of the initial crack in space. The crack trajectories that correspond to the obtained pressure curves are presented. The case of a non-uniform stress state in a medium is considered. The features that appear on the pressure curves during the reorientation of a hydraulic fracturing crack are shown.

Keywords: hydraulic fracturing, crack growth, hydraulic fracturing near a cavity, hydraulic fracturing propagation pressure, extended finite element method, numerical experiment

Введение

Технология гидравлического разрыва пласта (ГРП) активно применяется при добыче полезных ископаемых. В нефтегазовой отрасли она используется для увеличения добычи нефти и газа [1], в горнодобывающей промышленности для разупрочнения кровли горной породы [2,3], дегазации угольных пластов [4], а также для определения напряженного состояния среды [5].

При гидроразрыве пласта жидкость под высоким давлением закачивается горную породу, что приводит к образованию трещин. Контроль этого процесса является важной задачей, так как её решение может позволить повысить эффективность данной технологии. Одним из параметров, который, как правило, измеряется при гидроразрыве является давление закачиваемой жидкости. Известно, что оно зависит от геометрии создаваемых трещин, напряженном состоянии, свойств среды и т.д. Поэтому анализ давления закачиваемой жидкости в процессе выполнения ГРП может дать некоторую информацию о перечисленных характеристиках.

Ранее в [6-11] изучались некоторые аспекты связанные с давлением распространения трещин при различных условиях. Но в большинстве работ рассматривались однородные среды без каких-либо особенностей. В данной статье исследуются закономерности изменения давления распространения трещины гидроразрыва при её развитии вблизи цилиндрической полости.

Численные эксперименты

Рассмотрим цилиндрическую полость радиуса R и начальную трещину, расположенную от неё на расстоянии d и имеющую наклон на угол α , который отсчитывается от оси полости (рис. 1). Будем считать, что среда является однородной, упругой. Процесс моделирования распространения трещины ГРП в такой среде будем проводить на основе численного метода расширенных конечных элементов (XFEM) [12,13]. Подробная методика такого подхода описана в работах [14,15].

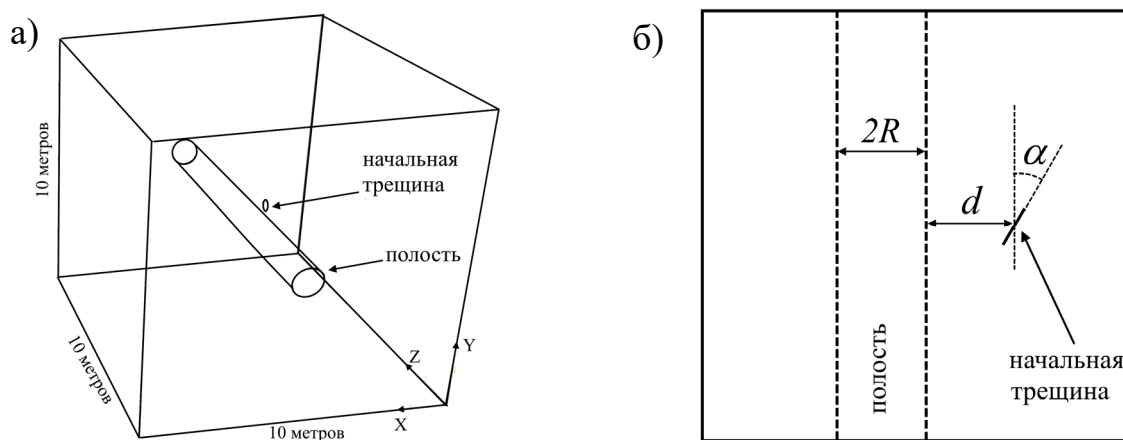


Рис. 1. Расчетная модель, содержащая цилиндрическую полость и начальную трещину. а) трехмерный вид; б) срез в горизонтальной плоскости $z=5$ метров.

Выберем следующие базовые параметры модели: 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, скорость закачки – 0.002 м³/с. Напряжение в среде, позицию и ориентацию начальной трещины будем изменять в численных экспериментах.

В первом примере рассмотрим случай, когда среда находится в условиях однородного всестороннего сжатия в среде и ориентации начальной трещины параллельно полости (угол α равен нулю). Уменьшение расстояния между полостью и начальной трещиной приводит к снижению давления распространения трещины (рис. 2а). Это происходит вследствие двух механизмов. Первый связан с увеличением податливости материала в области между разрывом и полостью. Второй связан с разгрузкой материала. Вблизи полости радиальные напряжения по своим значениям меньше, чем напряжения всестороннего сжатия на бесконечности. Из-за этого трещина распространяется перпендикулярно радиальному направлению и на её поверхность действуют меньшие по значениям нормальные напряжения, что в итоге приводит к снижению давления разрыва.

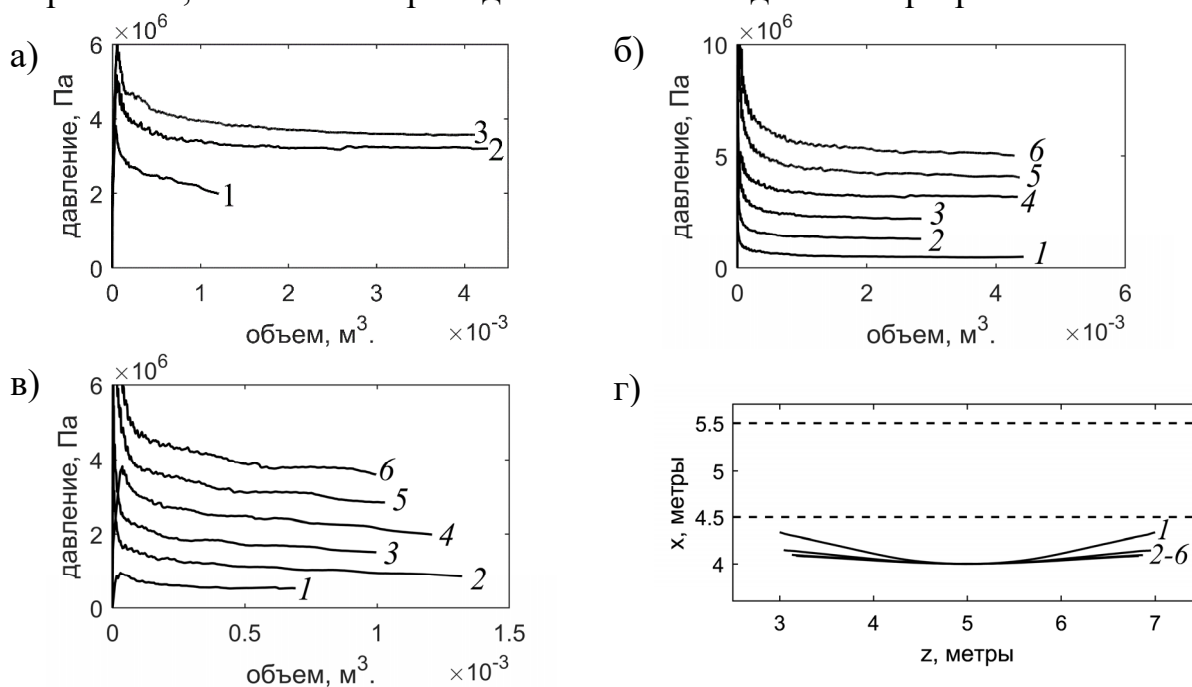


Рис. 2. Давление распространения и траектории трещин гидроразрыва при различной позиции начальной трещины и уровне напряжений всестороннего сжатия в среде: а) давление распространения трещины гидроразрыва в условиях сжатия среды в 3 МПа при различном расстоянии начальной трещины от полости: 1 – $d=R/2$; 2 – $d=R$; 3 – $d=2R$; б) и в) давление разрыва при $d=R$ и $d=R/2$ при различном уровне гидростатического напряжения сжатия: 1 – 0 МПа; 2 – 1 МПа; 3 – 2 МПа; 4 – 3 МПа; 5 – 4 МПа; 6 – 5 МПа; г) траектории трещин различного уровня при различном уровне гидростатического напряжения сжатия и $d=R$.

При фиксированном расстоянии между полостью и начальной трещиной, увеличение напряжений сжатия в среде приводит к увеличению давления разрыва (рис. 2б, 3в). Это ожидаемый результат, так как нормальное давление на поверхности трещины становится больше. Зависимость между напряжениями всестороннего сжатия и давлением разрыва линейная. Но при $d=R/2$ увеличение всестороннего сжатия на 1 МПа, приводило к повышению давления разрыва в среднем на 0.68 МПа, а при $d=R$ на 1 МПа (рис. 2б, 2в). Т.е. для $d=R$ наблюдается зависимость схожая со случаем распространением трещины в однородной среде без полости.

Повышение напряжения всестороннего сжатия с 1 до 5 МПа не приводило к существенному изменению траекторий трещин, несмотря на то что давления распространения повышались. На рис. 2г изображены пересечения разрывов с плоскостью $y=5$ метров. Проекция на плоскости yz и xz также были схожи. Отличался только результат для модели, где в среде отсутствовали напряжения. В этом случае трещина ГРП развивается в сторону полости (кривая 1 из рис. 2г).

Рассмотрим случай, когда начальная трещина ориентирована не параллельно полости, а под некоторым углом α к её оси (рис.1б). На рисунке 3а приведены кривые давления при однородном сжатии среды в 3 МПа, расстоянии $d=R$. В начальные моменты времени, большие значения угла альфа, приводят к более высоким значениям давления разрыва. Это связано с тем, при ненулевом альфа начальная трещина ориентирована не перпендикулярно минимальному напряжению (из-за разгрузки среды минимальным является радиальное). Далее трещина при распространении сближается с полостью и переориентируется параллельно ей. При этом, чем больше угол альфа, тем быстрее уменьшается расстояние между полостью и разрывом (рис. 3в), что в свою очередь приводит к более низким значениям давления распространения (рис. 3а). Дополнительно на кривой 3 из рис. 3в точкой А1 показано, где была трещина, в момент перед началом резкого падения давления разрыва, А2 – где была трещины при объеме закаченной жидкости в $3e-3 \text{ м}^3$, т.е. в момент, когда скорость падения давления начала снижаться (см. кривую 3 рис. 3а). Сопоставляю два рисунки 3а и 3в, становится понятно, что падение давления связано с переориентацией разрыва в направлении вдоль полости.

При снижении уровня сжимающих напряжений в среде, ориентации трещины играет меньшую роль и на давлении распространения ГРП влияет не значительно. При малых напряжениях угол альфа в основном влияет на траекторию распространения трещины и увеличение угла приводит к выходу трещины на поверхность полости (рис. 3г).

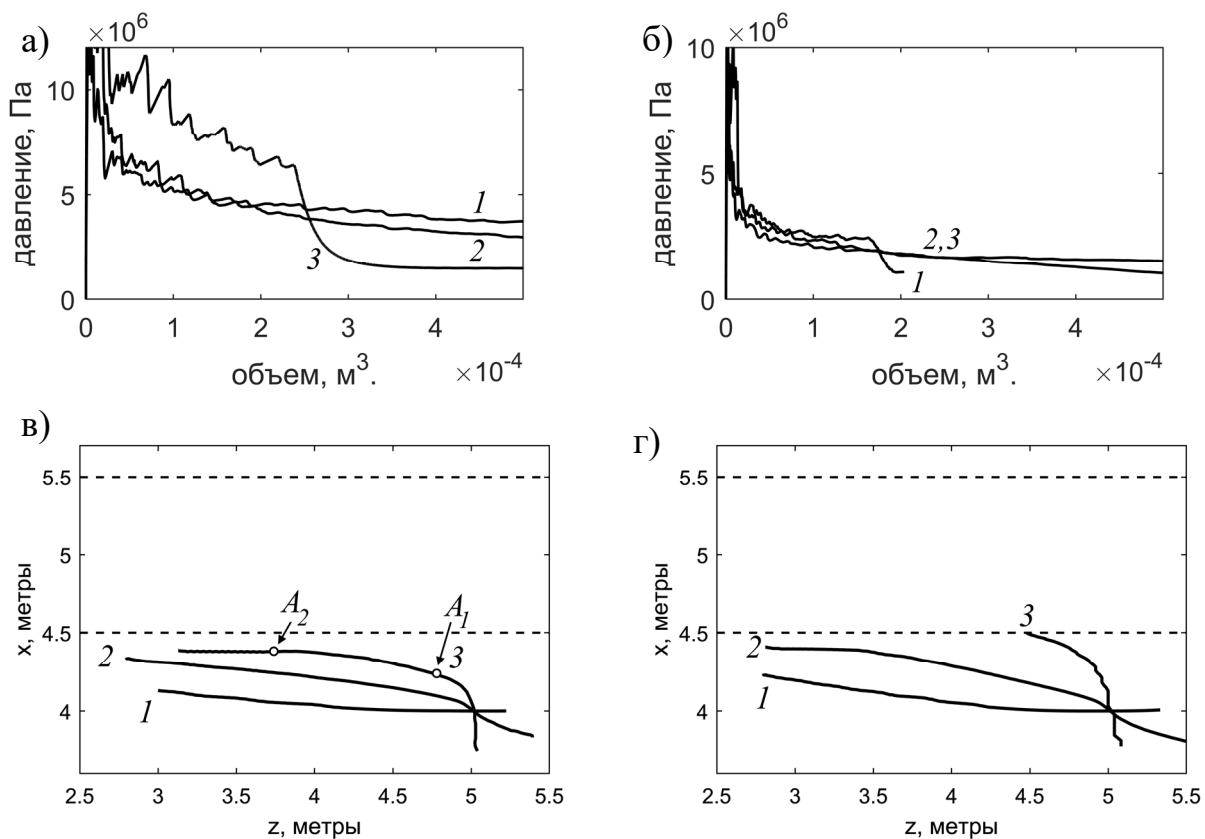


Рис. 3. Давление распространения и траектории трещин при различном угле наклона начальной трещины в условиях гидростатического сжатия среды. а) и б) – давления при гидростатическом сжатии среды в 3 и 1 МПа соответственно. в) и г) – пересечения трещин с горизонтальной плоскостью $y=5$ м. для гидростатического сжатия среды в 3 МПа и 1 МПа соответственно. Номерами кривых обозначены различные углы наклона начальной трещины: 1 – 0; 2 – 45; 3 – 80 градусов. Расстоянии между начальной трещиной и полостью $d=R$.

В заключении рассмотрим пример неоднородного поля напряжений в среде. Рассмотрим самый интересный случай, когда вертикальное напряжение отличается от горизонтальных. В численных экспериментах установим горизонтальные напряжения равными 3 МПа. На рис. 4а изображены кривые давления распространения при вертикальном напряжении равным 1, 2, 3 и 4.5 МПа. Как видно, понижение вертикального напряжения, приводит к снижению давления распространения. Трещина гидроразрыва переориентировались при вертикальных напряжениях равных 1 и 2 МПа (рис. 4б), но особенность в виде резкого падения давления наблюдается только при 1 МПа. На рисунке б точкой A_1 обозначено место, где была трещина, в момент после резкого падения давления разрыва (на кривой давления эта точка обозначена Q_1). Как видно, данное падение совпадает с моментом подхода трещины к полости. Также отметим, что если вертикальное напряжение превышает горизонтальные, то напряжение разрыва будет больше (кривые 3 и 4 на рис. а), чем при однородном сжатии среды несмотря на то, что трещина ориентирована не в горизонтальной плоскости.

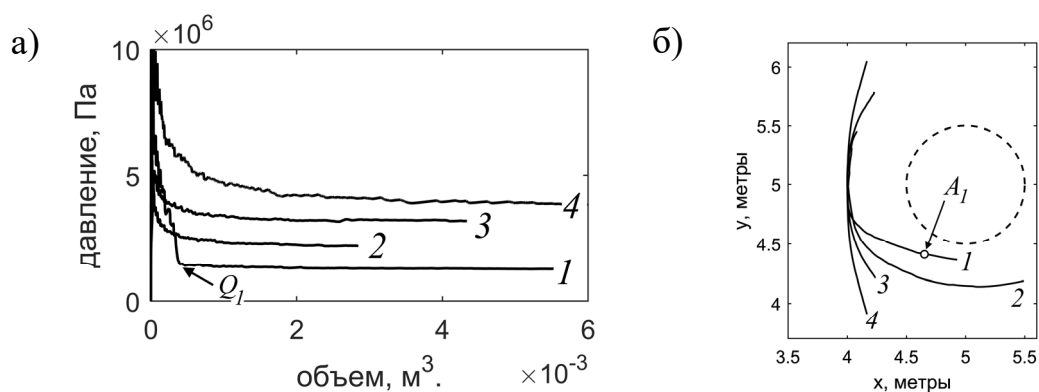


Рис. 4. Давление распространения и траектории трещин гидроразрыва при удалении трещины от полости на расстоянии одно радиуса, горизонтальных напряжениях равных 3 МПа и различном значении вертикальных напряжений.

а) давления распространения; б) пересечения трещин с вертикальной плоскостью $z=5$ метров. Номерами кривых обозначены используемые значения вертикальных напряжений: 1 – 1 МПа; 2 – 2 МПа; 3 – 3 МПа; 4 – 4.5.

Выводы

В работе были исследованы особенности изменения давления распространения гидроразрыва вблизи цилиндрической полости. Показано, что:

- уменьшение расстояния между начальной трещиной и полостью ведет к снижению давления разрыва;
- увеличение напряжения всестороннего сжатия приводит к увеличению давления разрыва;
- ориентация трещины влияет на давление распространения (если трещина ориентирована не параллельно стенке полости, то на начальной стадии развития гидроразрыва, давление может оказаться выше, чем в случае параллельной ориентации);
- особенности на кривых давления в виде резкого падения значений наблюдаются, когда трещина достаточно быстро меняет направление развития (например, при сильной анизотропии напряжений сжатия среды).

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., Темиряева 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. Xi X. et al. Modelling the near-wellbore rock fracture tortuosity: Role of casing-cement-rock well system, perforation and in-situ stress // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* – 2022. – Т. 157. – С. 105182.
7. Cheng W., Lu C., Zhou Z. Modeling of borehole hydraulic fracture initiation and propagation with pre-existing cracks using the displacement discontinuity method // *Geotechnical and Geological Engineering.* – 2020. – Т. 38. – С. 2903-2912.
8. Zhang X. et al. Initiation and growth of a hydraulic fracture from a circular wellbore // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* – 2011. – Т. 48. – №. 6. – С. 984-995.
9. McClure M. W. et al. The effect of changing fracture compliance on pressure transient behavior during diagnostic fracture injection tests // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?*. – SPE, 2014. – С. SPE-170956-MS.
10. Jeffrey R. G. et al. Measurement and analysis of full-scale hydraulic fracture initiation and reorientation // *Rock Mechanics and Rock Engineering.* – 2015. – Т. 48. – С. 2497-2512.
11. Cheng Y. et al. Experimental and numerical studies on hydraulic fracturing characteristics with different injection flow rates in granite geothermal reservoir // *Energy Science & Engineering.* – 2021. – Т. 9. – №. 1. – С. 142-168.
12. 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.
13. 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.
14. Azarov A., Patutin A., Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media // *Applied Sciences.* – 2021. – Т. 11. – №. 22. – С. 11004.
15. Serdyukov S. V. et al. Shapes of Hydraulic Fractures in the Neighborhood of Cylindrical Cavity // *Journal of Mining Science.* – 2021. – Т. 57. – №. 6. – С. 943-954.

© А. В. Азаров, С. В. Сердюков, 2024