

А. В. Азаров^{1}, С. В. Сердюков¹*

Исследование траекторий трещин гидроразрыва пласта вблизи полости в условиях неоднородного сжатия

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

Аннотация. В работе изучаются закономерности распространения трещины гидроразрыва пласта вблизи цилиндрической полости в упругой однородной среде, которая находится в условиях неоднородного всестороннего сжатия. Исследования проводятся на основе численных экспериментов. Для моделирования распространения трещины гидроразрыва при закачивании в неё жидкости используется расширенный метод конечных элементов, реализованный в программном пакете Abaqus. Рассматриваются различные напряженные состояния среды при сохранении соотношения между главными напряжениями сжатия 1:1.5:2, а также различные положения начальной трещины. Приводятся, сравниваются и анализируются формы трещин, полученные в результате проведения численных экспериментов. Показаны случаи, когда гидроразрыв будет захватываться полостью и распространяться вдоль неё, когда будет выходить на её поверхность, а когда удаляться от неё.

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

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

Study of trajectories of hydraulic fracturing cracks near a cavity under conditions of non-uniform compression

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

Abstract. The paper studies the propagation of a hydraulic fracturing crack near a cylindrical cavity in an elastic homogeneous medium, which is under conditions of non-uniform uniform compression. Research is carried out on the basis of numerical experiments. To simulate the propagation of a hydraulic fracturing crack when fluid is pumped into it, an extended finite element method is used, implemented in the Abaqus software package. The article considers various stressed states of the medium when the ratio between the principal compression stresses is 1:1.5:2. Additionally, different positions of the initial crack are considered. The crack shapes obtained as a result of numerical experiments are presented, compared and analyzed. Cases are shown when hydraulic fracturing will be captured by a cavity and will propagate along it, when it will reach its surface, and when it will move away from it.

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

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одной из популярных технологий, которая используется при добыче полезных ископаемых для решения таких задач как, интенсификация добычи нефти или газа [1], разупрочнения кровли горных пород [2,3], измерения напряженного состояния среды [4], дегазации угольных пластов [5]. Понимание основных закономерностей распространения трещин гидроразрыва может помочь повысить эффективность этой технологии. На сегодняшний день, существуют множество работ, в которых показано, что на ГРП оказывает влияние физические параметры среды и её строение, свойства закачиваемой жидкости и режим её закачки, напряженное состояние среды и т.д. Меньше работ посвящено изучению особенностей распространения гидроразрыва вблизи полостей. Тем не менее, такие условия могут возникать, например, при использовании ГРП в шахтных условиях.

Вопросы распространения гидроразрыва вблизи полостей в существующих работах изучались в основном численными методами. При этом в них часто рассматривались двумерные модели с полостями круговой [6-13] или прямоугольной [14] формой. Реже встречаются исследования, где используются трехмерные модели [15-18].

В данной работе изучаются закономерности развития трещин ГРП вблизи цилиндрической полости в условии неоднородного поле напряжений в среде. Данная работа является продолжением исследований [19] и направлена на изучение основных форм трещин, которые могут получиться вблизи полости при соотношении между главными напряжениями сжатия в среде 1:1.5:2.

Численные эксперименты

Рассмотрим цилиндрическую полость радиуса R и расположенную вблизи неё на расстоянии d начальную трещину (рис.1).

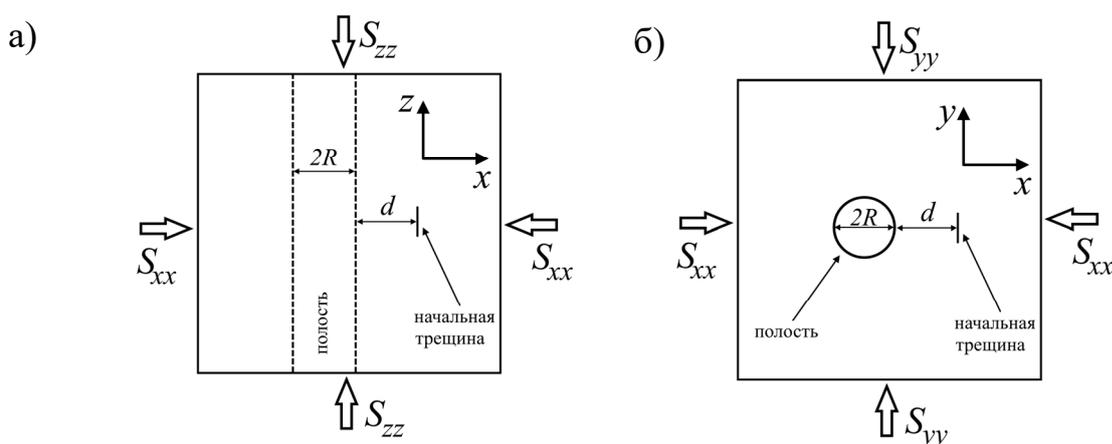


Рис. 1. Расчетная модель, содержащая цилиндрическую полость и начальную трещину гидроразрыва в плоскости xz и xy .

Среда является однородной, упругой и находится в условиях неоднородного всестороннего сжатия. Соотношения между напряжения сжатия S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} напряжений 1:1.5:2. При численных экспериментах будем сохранять это соотношение, но менять направление действия максимального и минимального напряжения. Моделирование распространения трещины будем проводить в квазистатическом приближении с использованием расширенного метода конечных элементов (XFEM) [20, 21]. Подробная методика описана в работах [8].

При численных экспериментах использовались следующие параметры упругой среды и жидкости разрыва: модуль упругости – 3.0 ГПа, коэффициент Пуассона – 0.3, прочность материала на растяжение – 1 МПа, критическая энергия разрушения 120 Н/м, динамическая вязкость жидкости 0.001 Па·с. Напряжение в среде и позицию начальной трещины будем изменять в численных экспериментах.

Вначале рассмотрим случай, когда минимальным является вертикальное напряжение S_{yy} . На рисунке 2 приведены пересечения полученных трещин с вертикальной плоскостью $z=5$ метров (она является в данном случае плоскостью симметрии).

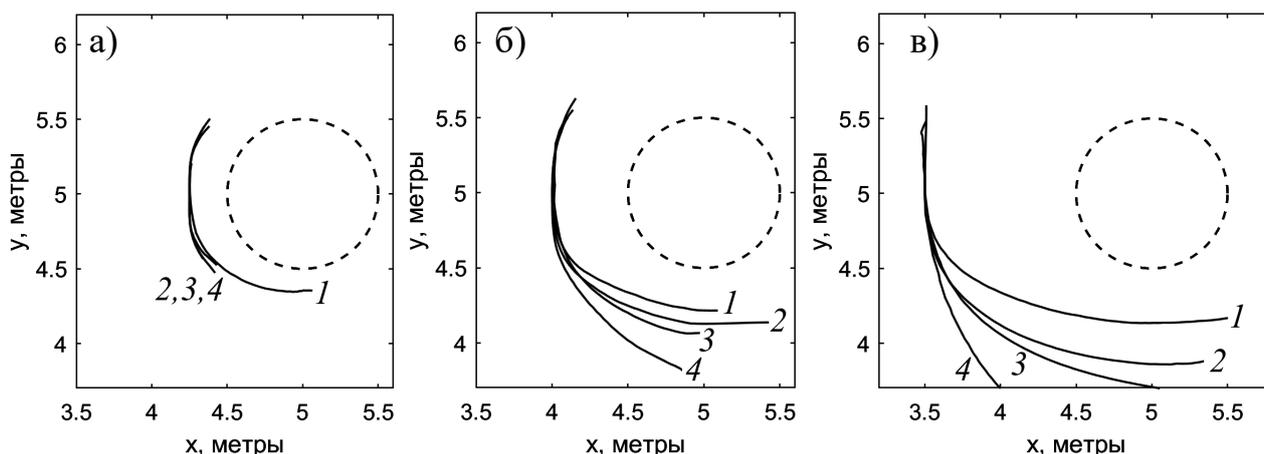


Рис. 2. Пересечения трещин с плоскостью $z=5$ метров при различном напряжённом состоянии и удалении начальной трещины от полости на расстоянии а) $0.5R$, б) R , в) $2R$. Номера кривых обозначены различными напряженными состояниями: 1 – $S_{xx}=6$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=4.5$; 2 – $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=6$; 3 – $S_{xx}=0.5$, $S_{yy}=0.25$, $S_{zz}=0.375$; 4 – $S_{xx}=0.375$, $S_{yy}=0.25$, $S_{zz}=0.5$ МПа

Здесь рассматривалось 4 варианта напряженного состояния:

- 1) высокий уровень напряжений, максимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 1, $S_{xx}=6$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=4.5$ МПа);
- 2) высокий уровень напряжений, максимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 2, $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=6$ МПа);
- 3) низкий уровень напряжений, максимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 3, $S_{xx}=0.5$, $S_{yy}=0.25$, $S_{zz}=0.375$ МПа);

4) низкий уровень напряжений, максимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 4, $S_{xx}=0.5$, $S_{yy}=0.25$, $S_{zz}=0.375$ МПа).

Как видно, при расположении начальной трещины на расстоянии половины радиуса (рис. 2а), гидроразрыв переориентировался в горизонтальную плоскость только при высоком уровне напряжений, когда максимальным являлось S_{xx} . Во всех остальных случаях трещина распространялась вдоль полости. При $d=R$, в процессе роста трещина переориентировалась, сближалась с полостью и после некоторого момента времени распространялась вдоль неё (рис. 2б). При $d=2R$ подобное поведение наблюдалось только для высокого уровня напряжений (рис. 2в, кривые 1 и 2). При низком уровне напряжений трещины при распространении не сближались с полостью и при распространении удалялись от неё (рис. 2в, кривые 3 и 4).

На рисунках 3 приведены различные формы трещин, которые получались в ходе численных экспериментов.

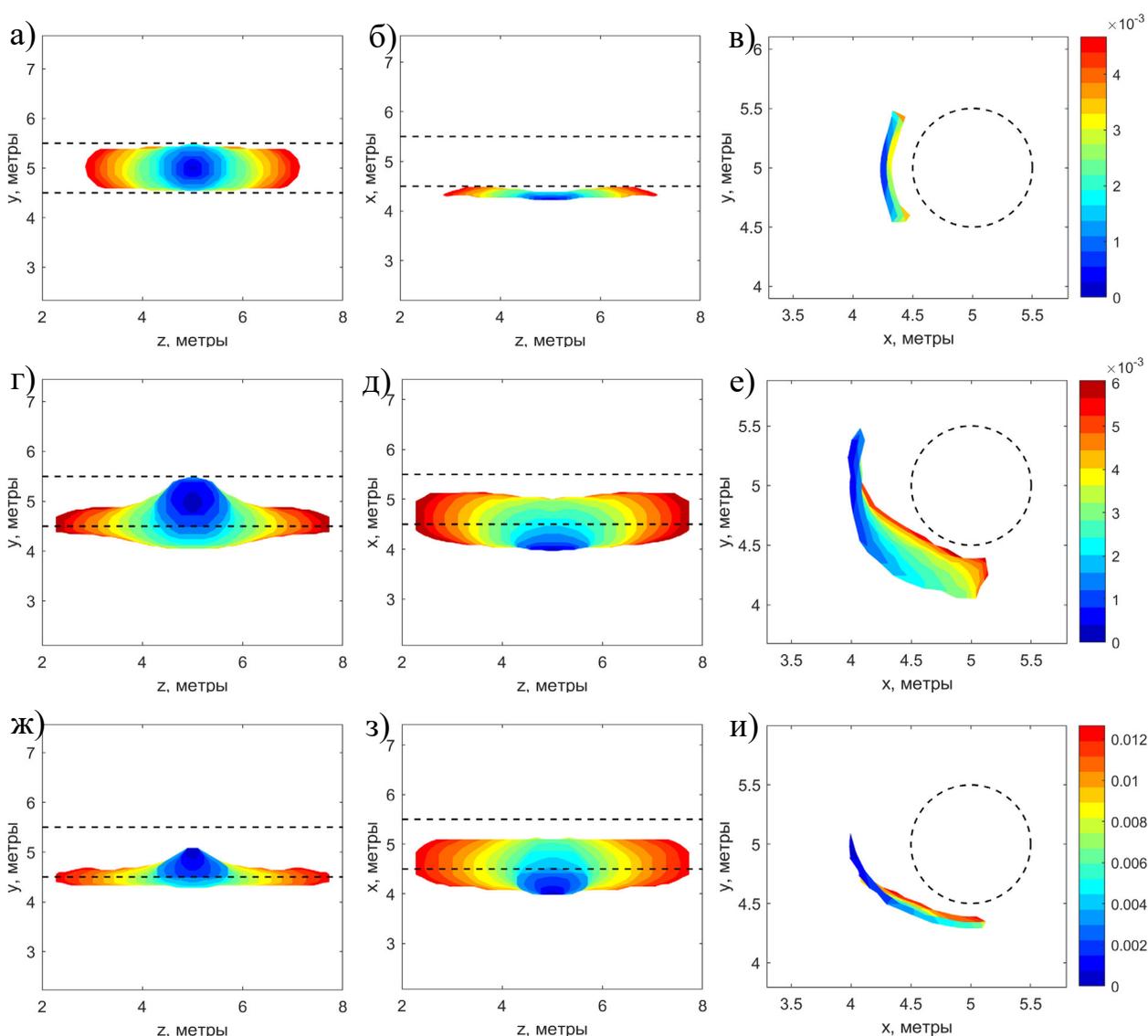


Рис. 3. Проекция трещин на различные плоскости при различном напряженном состоянии: а), г) на yz ; б), д) на xz ; в), е) на xy . На рисунках а), б), в) $d=R/2$, напряжение $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=6$ МПа; г), д), е) $d=R$, напряжение $S_{xx}=0.5$, $S_{yy}=0.25$, $S_{zz}=0.375$ МПа; ж), з), и) $d=2R$, $S_{xx}=6$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=4.5$ МПа

На рис. 3а, 3б, 3в показаны проекции гидроразрыва при $d=R/2$ и $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=3$, $S_{zz}=6$ МПа. В этом случае трещина развивается вдоль полости. Подобные формы наблюдались для кривых 2, 3, 4 из рисунка 2а. На рис. 3г, 3д, 3е показаны проекции при $d=R$ и напряжениях $S_{xx}=0.5$, $S_{yy}=0.25$, $S_{zz}=0.375$ МПа. В данном случае, гидроразрыв при переориентации начал развиваться вдоль полости. При этом из-за низкого уровня напряжений расстояние между трещиной и полостью уменьшалось (в итоге трещина практически вышла на поверхность полости). При высоких уровнях напряжений, гидроразрыв после того, как попадал в область влияния полости, распространялся вдоль неё, не сближаясь (рис. 3ж, 3з, 3и).

В заключении рассмотрим примеры, когда вертикальное напряжение является максимальным. На рисунке 4 приведены пересечения трещин с горизонтальной плоскостью $y=5$ метров при различном напряжённом состоянии и различном удалении начальной трещины от полости на расстоянии. Так же, как и в предыдущих примерах рассматривалось 4 варианта ориентации напряжений:

- 1) высокий уровень напряжений, минимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 1, $S_{xx}=3$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=4.5$ МПа);
- 2) высокий уровень напряжений, минимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 4, $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=3$ МПа);
- 3) низкий уровень напряжений, минимальное напряжение действует максимальное напряжение действует перпендикулярно оси полости (кривая 2, $S_{xx}=0.25$, $S_{yy}=0.5$, $S_{zz}=0.375$ МПа);
- 4) низкий уровень напряжений, минимальное напряжение действует вдоль полости (кривая 3, $S_{xx}=0.375$, $S_{yy}=0.5$, $S_{zz}=0.25$ МПа).

Как видно, при $d=R/2$ кривые различаются не значительно, трещины при развитии распространялись вдоль полости сближаясь с ней (рис. 4а). При $d=R$, когда минимальное напряжение действует вдоль оси полости, происходит сближение разрыва и полости (рис. 4б, кривые 3,4). Причем уровень напряжений не значительно повлиял на траектории.

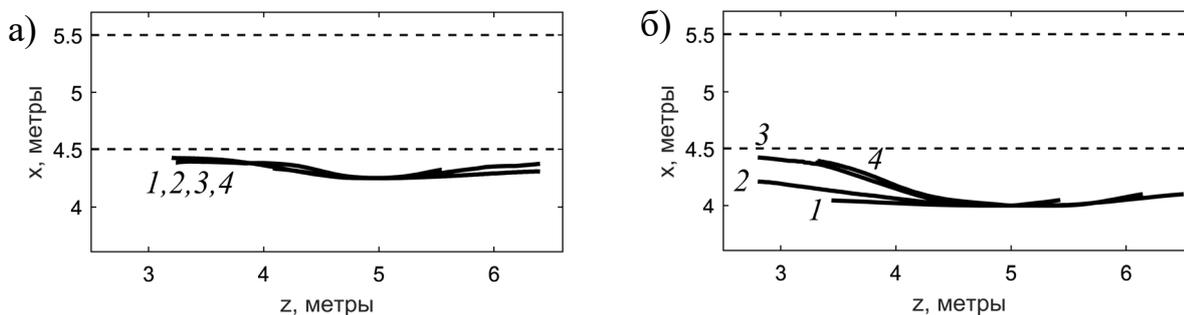


Рис. 4. Пересечения трещин с плоскостью $y=5$ метров при различном напряжённом состоянии и удалении начальной трещины от полости на расстоянии а) $R/2$, б) R . Номерами кривых обозначены различные напряженные состояния: 1 – $S_{xx}=3$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=4.5$; 2 – $S_{xx}=0.25$, $S_{yy}=0.5$, $S_{zz}=0.375$; 3 – $S_{xx}=0.375$, $S_{yy}=0.5$, $S_{zz}=0.25$; 4 – $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=3$ МПа.

Также сближение полости и трещины наблюдалось при низком уровне напряжений, когда минимальным являлось S_{xx} (рис. 4б, кривые 2). При высоком уровне напряжений и минимальном S_{xx} , влияние полости на трещину было незначительным, форма была схожа с дисковой. На рисунке 5а приведена проекция разрыва в этом случае. На рис. 5б дана проекция трещины при $d=R$ и $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=3$ МПа. Подобные формы наблюдались, когда начальные трещины располагались на расстоянии $d=R/2$ от полости и когда минимальное напряжение действовало вдоль оси полости. Во втором случае разрывы выходили на поверхность полости.

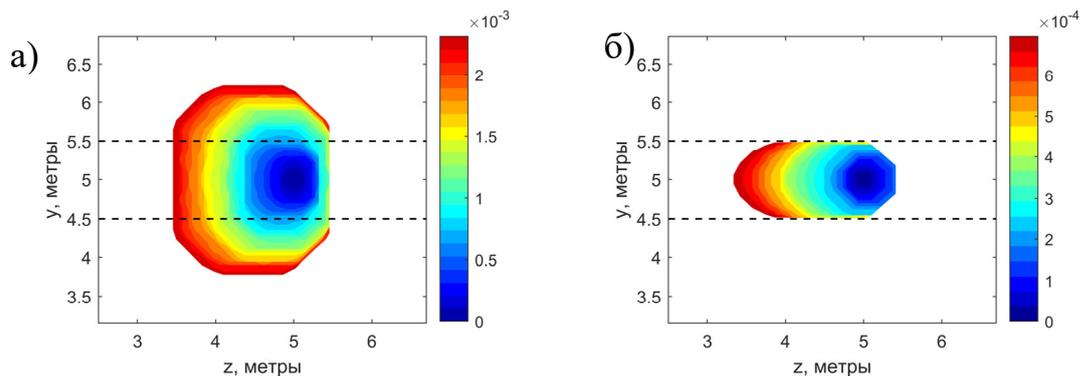


Рис. 5. Проекция трещин на плоскость uz при различном напряженном состоянии: а) $S_{xx}=3$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=4.5$; б) $S_{xx}=4.5$, $S_{yy}=6$, $S_{zz}=3$ МПа

Выводы

В работе были исследованы особенности распространения трещин гидроразрыва вблизи цилиндрической полости в условиях неоднородного поля напряжений. Рассматривались случаи, когда соотношения между главными напряжениями в среде было 1:1.5:2, а точка инициации гидроразрыва располагалась в горизонтальной плоскости, проходящей через ось полости. Показано, что:

1. Если вертикальное напряжение минимально и расстояние между точкой инициации и полостью больше одного её радиуса, то при развитии трещина начинает переориентироваться в горизонтальное направление и возможен «захват» разрыва полостью, в результате которого он начинает распространяться вдоль неё. Чем выше уровень напряжений, тем вероятнее гидроразрыв попадет в область влияния полости и будет распространяться вдоль неё.

2. Если вертикальное напряжение максимально, то трещина гидроразрыва будет развиваться вдоль полости или равномерно во всех направлениях (иметь дисковую форму). Второй случай достигается, когда минимальным является напряжение, действующее по нормали к оси полости. При низком уровне напряжений или когда минимальное напряжение направлено вдоль оси полости, возможен выход трещины на поверхность полости.

3. При малых расстояниях между полостью и точкой инициации гидроразрыва (половина радиуса полости и меньше), напряженное состояние меньше влияет на траектории трещин.

4. При низком уровне напряжений в среде и близком расположении точки инициации гидроразрыва к полости (расстояние между точкой инициации и полостью меньше её радиуса) возможны выходы трещины на её поверхность.

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. 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.
5. 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.
6. Liu Z., Lu Q., Sun Y., Tang X., Shao Z., Weng Z. Investigation of the influence of natural cavities on hydraulic fracturing using phase field method // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2019. – Т. 44. – С. 10481-10501.
7. Chen Z., Li X., Dusseault M. W., and Weng L. Effect of excavation stress condition on hydraulic fracture behaviour // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Т. 226. – С. 106871.
8. Azarov A., Patutin A., Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media // *Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11. – №. 22. – С. 11004.
9. Азаров А. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Исследования развития трещины гидроразрыва в поро-упругой среде, содержащей полое включение // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2020. — Т. 7. — №. 1. — С. 12–17.
10. 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. Kao J. et al. Numerical Simulation and Analysis of Cave Penetration by Hydraulic Fractures // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 570. – №. 2. – С. 022029.
12. Kao J. W. et al. Numerical analysis of the hydraulic fracture communication modes in fracture-cavity reservoirs // *Petroleum Science*. – 2022. – Т. 19. – №. 5. – С. 2227-2239.
13. Chen, Z., Qiu, J., Chen, Q., Li, X., Ma, B., & Huang, X. Influence of multi-perforations hydraulic fracturing on stress and fracture characteristics of hard rock mass under excavation condition // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – Т. 276. – С. 108925.
14. 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. – Т. 28. – №. 6. – С. 951-958.
15. 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.

16. Liu B., Jin Y., Chen M. Influence of vugs in fractured-vuggy carbonate reservoirs on hydraulic fracture propagation based on laboratory experiments //Journal of Structural Geology. – 2019. – Т. 124. – С. 143-150.
17. Kao J., Xu, D., Bian, X., Yin, S., & Jin, Y. Numerical Analysis of Interaction Between Hydraulic Fracture and a 3D Spherical Cave //ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – ARMA, 2022. – С. ARMA-2022-0554.
18. Qiao, J., Tang, X., Hu, M., Rutqvist, J., & Liu, Z. The hydraulic fracturing with multiple influencing factors in carbonate fracture-cavity reservoirs //Computers and Geotechnics. – 2022. – Т. 147. – С. 104773.
19. Азаров А.В., Сердюков С.В. Моделирование гидроразрыва вблизи выработки круглого сечения в условиях трехосного сжатия // ФТПРПИ. – 2023. – №. 5. – С. 55-69.
20. 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.
21. 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

© А. В. Азаров, С. В. Сердюков, 2024