

Численные исследования особенностей распространения трещины гидроразрыва из скважины с боковым ответвлением

А. В. Азаров^{1}, С. В. Сердюков¹, А. В. Патутин¹*

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

Аннотация. В работе рассмотрена задача распространения трещины гидроразрыва пласта из скважины с боковым ответвлением. Предложена упрощенная математическая модель для анализа поставленной задачи. Проведены численные исследования распространения гидроразрыва при различных параметрах модели с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM). Показано, что трещина гидроразрыва может развиваться в плоскости содержащей основную и боковую скважину при малых значениях анизотропии напряжений. Приведены траектории распространения трещин в зависимости от напряженного состояния среды.

Ключевые слова: гидравлический разрыв, моделирование, рост трещины, расширенный метод конечных элементов, управление гидроразрывом

Numerical studies of the features of the propagation of a hydraulic fracture from a side-tracked well

A. V. Azarov^{1}, S. V. Serdyukov¹, A. V. Patutin¹*

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 fracture propagation from a well with a side track. A simplified mathematical model for the analysis of the problem is proposed. Numerical studies of hydraulic fracture propagation for various model parameters using the extended finite element method (XFEM) have been carried out. It is shown that a hydraulic fracture can develop in the plane containing the main and side wells at low values of stress anisotropy. The trajectories of crack propagation are given depending on the stress state of the medium.

Keywords: hydraulic fracturing, modeling, crack growth, extended finite element method, hydraulic fracturing control

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) может использоваться для решения различных задач, возникающих при добыче полезных ископаемых. Например, интенсификация добычи нефти и газа [1], определение напряженного состояния среды [2], дегазация угольных пластов [3], разупрочнение горных пород [4] и т.д. Одна из проблем ГРП состоит в формировании трещин с заданной геометрией и ориентацией в пространстве. Для решения этой задачи разрабатываются различные методы по управлению гидроразрывом. Один из них заключается в создании начальной трещины/перфорации на скважине с необходимой ориентацией [5-7].

Главным недостатком такого подхода является то, что в неоднородном поле напряжений, трещина ГРП, при своем развитии, будет переориентироваться перпендикулярно минимальному напряжению, несмотря на направление, заданное начальной трещиной. Другой метод управления траекторией разрыва заключается в использовании близко расположенных параллельных скважин, задающих плоскость, в которой необходимо сформировать трещину. Но как показано в работах [8-10], разрыв в таком случае удерживается в плоскости скважин только при достаточно малом расстоянии между ними. Для решения этой проблемы возможно использовать скважину с боковым ответвлением [11]. В этом случае в точке зарезки бокового ствола образовывается концентратор напряжения, который будет способствовать формированию начальной трещины гидроразрыва. В процессе закачки рабочей жидкости, при определенных условиях, разрыв может распространяться в плоскости между основной скважиной и боковым стволом, объединяя их в единую систему.

В данной работе рассматривается метод формирования трещины в требуемом направлении с помощью проведения ГРП в скважине с боковым ответвлением. Предлагается математическая модель для анализа развития разрыва в такой постановке.

Основные уравнения модели

Моделирование роста трещины гидроразрыва производится в квазистатическом приближении. Предполагается, что среда является однородной и упругой, ее напряженно-деформированное состояние определяется системой уравнений:

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

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $\varepsilon_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$ – компоненты тензора деформаций; u_i – смещение среды; λ, μ – параметры Ламе; ε_0 – объемная деформация среды. Раскрытие трещины и поток жидкости внутри неё связаны следующим уравнением:

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

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

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

где η – динамическая вязкость жидкости разрыва. Фильтрация жидкости из трещины в среду не учитываются.

Моделирование разрушения среды производилось на основе когезионной модели (CZM) [12]. При этом использовался билинейный закон разупрочнения. Решение уравнений модели происходит с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM) [13], который позволяет рассчитывать рост трещины без перестроения сетки. Более подробно схема моделирования ГРП описана в работе [14].

Постановка задачи

Анализ задачи производился с использованием следующей модели. Вместо скважины с боковым ответвлением рассматривалась X-образная начальная трещина. Такое приближение больше соответствует случаю, когда имеется две пересекающиеся скважины, на стенках которых созданы трещины. Выбранная геометрия позволяет упростить задачу построения расчетной сетки и сохранить симметрию при некоторых параметрах модели.

Начальная X-образная трещина помещалась в трехмерную область и находилась в плоскости $y=y_c$, где точка (x_c, y_c, z_c) – центр X-образной трещины (рис. 1а). Область распространения гидроразрыва показана на рис. 1б, т.е. в трехмерной среде она представляет собой треугольную призму, две боковые стороны которой ограничены краями начальной трещины. Также X-образная трещина характеризуется углом β (см. рис. 1б).

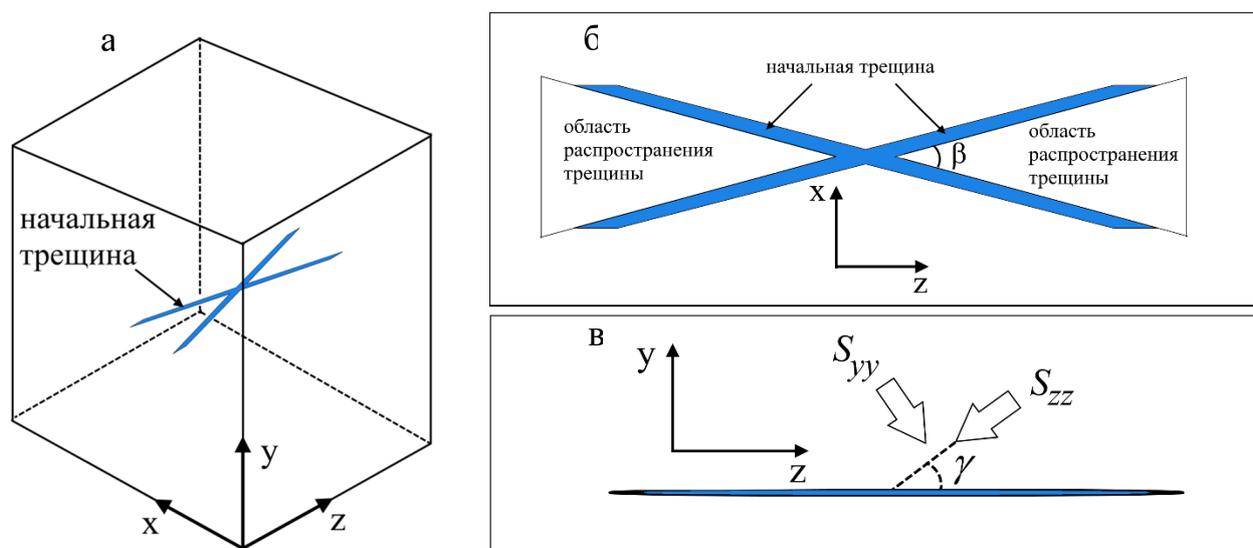


Рис. 1. а) начальная X-образная трещина внутри трехмерной расчетной области; б) начальная трещина в плоскости xz с выделенной областью распространения; в) начальная трещина в плоскости yz, которая ориентирована под углом γ к главным напряжениям

При ориентации начальной трещины перпендикулярно максимальному напряжению может возникать устойчивое распространение разрыва в заданном направлении, так как отсутствуют сдвиговые деформации вблизи кончика трещины. Чтобы избежать этого, будем ориентировать начальную трещину под не-

которым углом γ к главным напряжениям (рис. 1в). Поворот трещины будем производить вокруг оси, проходящей через центр трещины и перпендикулярно плоскости yz . Тогда при решении задачи будет сохранена симметрия на плоскости $x = x_c$, где x_c – координата центра трещины.

Исходя из вышесказанного, на плоскости $x = x_c$ задавалось условие симметрии (нулевых перемещений в направлении x , вращения вокруг y и z нулевые), остальные границы области закреплялись. В трещину подавался поток жидкости. Внутри области устанавливалось поле напряжений S_{xx} , S_{zz} , S_{yy} .

Параметры модели

Численные эксперименты проводились с использованием расчетной области размерами 10x10x12 м. Центр начальной X-образной трещины и центр расчетной области совпадали, т.е. $(x_c, y_c, z_c) = (5, 5, 6)$. Угол β равен 30 градусов. Угол наклона трещины γ был равен 15°.

На рис. 2 изображена сетка расчетной области и её часть вблизи зоны распространения трещины, где размеры гексаэдральных элементов составляли 0.025 м.

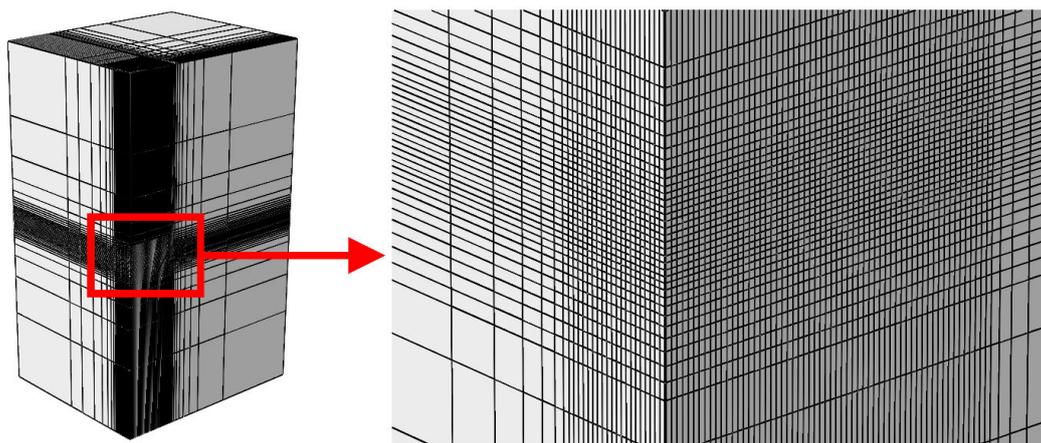


Рис. 2. Сетка расчетной области (показана симметричная четверть модели)

Остальные параметры модели выбирались следующие: модуль упругости 3.0 ГПа; коэффициент Пуассона – 0.3; критическая энергия разрушения – 120 Н/м; критическое напряжение на разрыв – 1 МПа, динамическая вязкость жидкости равнялась – 0.001 Па·с. Горизонтальные напряжения в среде S_{xx} и S_{zz} равнялись 1 МПа, т.е. по своей величине совпадали с прочностью материала на растяжение. Вертикальное напряжение S_{yy} изменялось в ходе расчетов.

Результаты численных экспериментов

Для визуализации результатов численных экспериментов использовались трехмерные изображения трещин (рис. 3а), срезы трещины плоскостью $z = z_0$, где z_0 пробегает значения из заданного диапазона с некоторым шагом (рис. 3б)

и срезы плоскостью $x = x_c$ (см. рис. 5б). На рис. 3 приведен пример развития трещины ГРП из X-образной трещины при значении $S_{yy} = 2$ МПа и $S_{xx} = S_{zz} = 1$ МПа. Видно, что при такой разнице в напряжениях, трещина гидроразрыва достаточно быстро начала развиваться в вертикальном направлении.

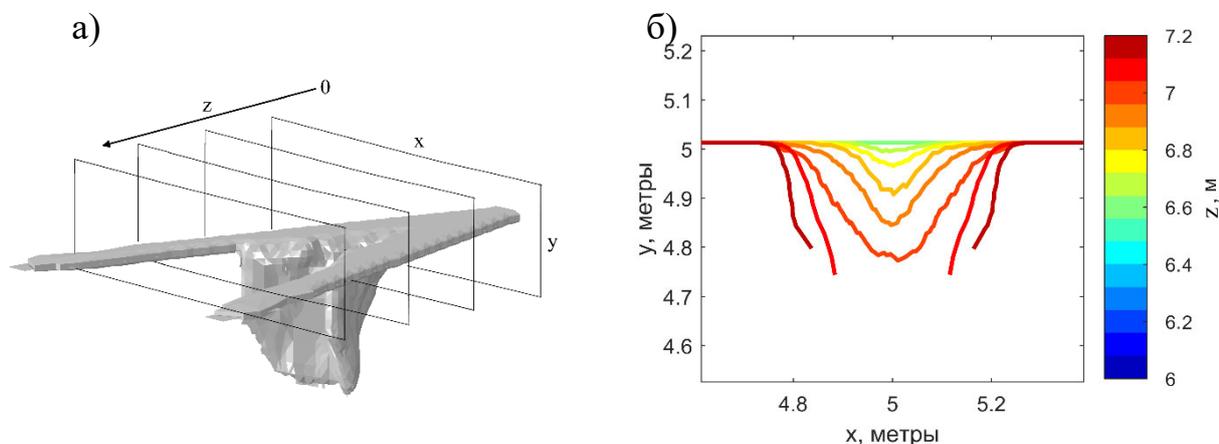


Рис. 3. Результаты численных экспериментов, полученных при горизонтальных напряжениях $S_{xx} = S_{zz} = 1$ МПа и вертикальном $S_{yy} = 2$ МПа:

- а) трехмерная трещина гидроразрыва и плоскости $z = z_0$ при различных значениях z_0 ; б) срезы плоскостями $z = z_0$. Цвет линии соответствует значению z_0 .

Далее рассмотрим примеры с более низкими значениями анизотропии напряжений. На рис. 4 представлены результаты численных экспериментов при горизонтальных напряжениях $S_{xx} = S_{zz} = 1$ МПа и вертикальных $S_{yy} = 1.1$ МПа (рис. 4а), $S_{yy} = 1.3$ МПа (рис. 4в), $S_{yy} = 1.5$ МПа (рис. 4д). При вертикальном напряжении в 1.3 и 1.5 МПа трещина гидроразрыва начинает «прогибаться» при развитии, отклоняясь от плоскости $y = 5$ м (плоскость, в которой лежит X-образная трещина).

На рис. 5а показаны пересечение полученных трещин с плоскостью $z = 7$ м, т.е. плоскостью, удаленной на расстояние одного метра от центра X-образной трещины. Расстояние между краями начальной трещины при этом было около 0.5 м. Точное расстояние указать невозможно из-за дискретизации. Кривая 1 соответствует напряжению S_{yy} равному 1.1 МПа, 2 – 1.3 МПа, 3 – 1.5 МПа. Наибольшее отклонение разрыва от плоскости $y = 5$ в первом случае равно 0.01 м., во втором 0.04 м., в третьем 0.17 м.

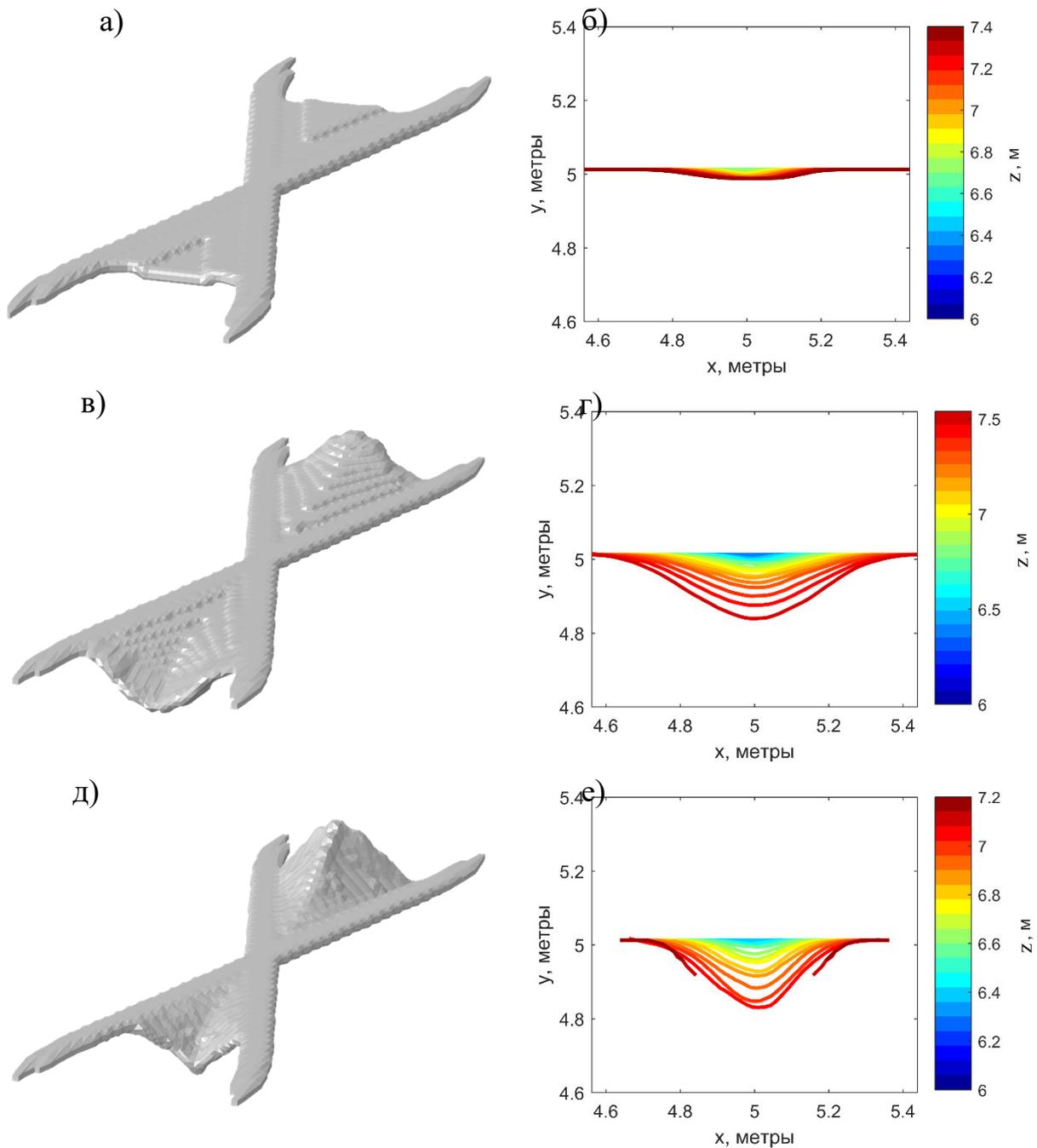


Рис. 4. Трехмерные трещины ГРП (левый столбец) и их пересечения с плоскостями $z = z_0$ (правый столбец) при горизонтальных напряжениях $S_{xx} = S_{zz} = 1$ МПа, углу наклона X-образной трещины к главным напряжениям $\gamma = 15$ градусов и различной величине вертикальных напряжений S_{yy} :

а) и б) $S_{yy} = 1.1$ МПа; в) и г) $S_{yy} = 1.3$ МПа; д) и е) $S_{yy} = 1.5$ МПа

На рис. 5б показаны пересечения трещин с плоскостью симметрии $x = x_c$. Видно, что гидроразрыв развивался в плоскости начальной трещины только при $S_{yy} = 1.1$ МПа. В двух других случаях трещина при развитии начинает переориентироваться в вертикальном направлении. Величина отклонения разрыва от плоскости $y = 5$ м зависит от величины напряжения S_{yy} .

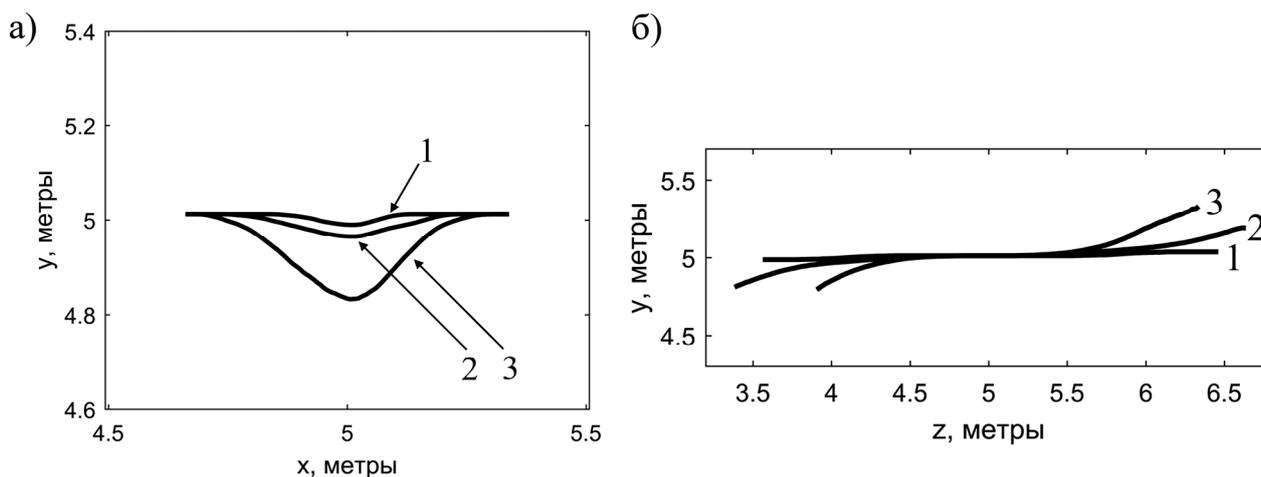


Рис. 5. Результаты расчетов траекторий трещин:

а) пересечение трещин с плоскостью $z=7$ м; б) пересечение трещин с плоскостью симметрии $x=5$ м. Расчеты выполнены при $S_{xx}=S_{zz}=1$, $\gamma=15$ и различном вертикальном напряжении: 1 – $S_{yy}=1.1$ МПа; 2 – $S_{yy}=1.1$ МПа; 3 – $S_{yy}=1.5$ МПа

Выводы

В работе предложена математическая модель для исследования развития гидроразрыва пласта из скважины с боковым ответвлением. В рамках данной модели скважина с боковым ответвлением была рассмотрена в виде X-образной начальной трещины. Показано, что разрыв может развиваться в плоскости начальной трещины при малой анизотропии напряжений: напряжения по одному направлению могут превосходить напряжения по другим направлениям не более чем в 1.3 раза. При увеличении контраста напряжений гидроразрыв при своем развитии сильнее отклоняется от заданной плоскости, в конечном итоге ориентируясь перпендикулярно минимальному напряжению.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00087)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boak J., Kleinberg R. Shale gas, tight oil, shale oil and hydraulic fracturing // Future Energy. – Elsevier, 2020. – P. 67–95.
2. Сердюков С. В., Курленя М. В., Патугин А. В. К вопросу об измерении напряжений в породном массиве методом гидроразрыва // ФТПРПИ. – 2016. – №. 6. – С. 6–14.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Sun Y., Fu Y., Wang T. Field application of directional hydraulic fracturing technology for controlling thick hard roof: a case study // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – Vol. 14. – №. 6. – P. 1–15.
7. Кочетков Л. М., Журба В. Н., Малышев Г. А., Желудков А. В. Применение «струйного» ГРП на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз» // *Бурение и нефть*. – 2009 – № 1. – С. 27–29.
8. Lu W., He C. Numerical simulation of the fracture propagation of linear collaborative directional hydraulic fracturing controlled by pre-slotted guide and fracturing boreholes // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 235. – P. 107–128.
9. Cheng, Y., Lu, Z., Du, X., Zhang, X., & Zeng, M. A crack propagation control study of directional hydraulic fracturing based on hydraulic slotting and a nonuniform pore pressure field // *Geofluids*. – 2020. – Vol. 2020. – Paper 8814352.
10. Zhao X., Huang B., Wang Z. Experimental investigation on the basic law of directional hydraulic fracturing controlled by dense linear multi-hole drilling // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2018. – Vol. 51. – №. 6. – С. 1739–1754.
11. Пат. 2730688 РФ. Способ направленного гидроразрыва угольного пласта (приоритет от 09.12.2019) / С. В. Сердюков, А. В. Патутин, А. В. Азаров, Л. А. Рыбалкин, Т. В. Шилова // *Опубл. в БИ*. – 2020. – № 24.
12. Belytschko T. et al. Dynamic crack propagation based on loss of hyperbolicity and a new discontinuous enrichment // *International journal for numerical methods in engineering*. – 2003. – Vol. 58. – №. 12. – P. 1873–1905
13. 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. – №. 9. – P. 1267–1282.
14. 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.

© А. В. Азаров, С. В. Сердюков, А. В. Патутин, 2022