

A. B. Azarov¹✉, A. A. Niukkanen¹

Моделирование гидроразрыва вблизи полостей в среде, содержащей естественные трещины

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

Аннотация. В работе рассматривается задача распространения гидроразрыва вблизи полостей в среде, которая содержит естественные трещины. Описывается подход, основанный на методе конечных элементов (МКЭ) с помощью которого можно моделировать гидроразрыв при таких условиях. Приводятся возможности разработанной программы, которая реализует данный подход, и которая позволяет строить двумерные модели с круговым отверстием и с различными и различными конфигурациями естественных трещин: одиночная трещина, трещиноватый слой, а также среда с заданной ориентацией системы трещин. Приводятся и анализируются результаты численных экспериментов. Показано, как наличие коротких трещин в среде влияет на траектории гидроразрывов вблизи полостей в условиях всестороннего сжатия. Продемонстрированы особенности распространения гидроразрывов в модели, содержащей трещиноватый слой, примыкающий к круговому отверстию. Выявлены некоторые закономерности распространения разрывов в таких условиях.

Ключевые слова: породный массив, горная выработка, напряженное состояние, гидравлический разрыв, естественная трещина, пересечение трещины и гидроразрыва, гидроразрыв вблизи полости, численное моделирование, метод конечных элементов

A. V. Azarov¹✉, A. A. Niukkanen¹

Modeling of hydraulic fracturing near cavities in a medium containing natural fractures

¹Chinakal 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 cavities in a medium containing natural cracks. A finite element method (FEM) approach for simulating hydraulic fractures under these conditions is described. The capabilities of the developed program implementing this approach are discussed, enabling the construction of two-dimensional models with a circular opening and various configurations of natural fractures: a single fracture, a fractured layer, and a medium with a specified orientation of the fracture system. The results of numerical experiments are presented and analyzed. It is shown how the presence of short fractures in the medium affects the trajectories of hydraulic fractures near cavities under uniform compression. Features of hydraulic fracture propagation are demonstrated in a model containing a fractured layer adjacent to a circular opening. Some patterns of fracture propagation under these conditions are identified.

Keywords: rock mass, mine working, stress state, hydraulic fracturing, natural fracture, intersection of fracture and hydraulic fracturing, hydraulic fracturing near a cavity, numerical modeling, finite element method

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является широко используемой технологией в горном деле. Она применяется для решения таких задач, как дегазация угольных пластов [1], измерение напряжений в среде [2], разупрочнение кровли горных выработок [3,4] и т.д. Суть данной технологии заключается в закачивании в горную породу жидкости под высоким давлением с целью создания в ней трещин.

Известно, что на создаваемые трещины оказывает влияние множество факторов. Например, свойства и строение среды, напряженно-деформированное состояние среды, свойства жидкости разрыва и режимы её закачки, параметры инициатора разрыва/начальной трещины. Тем не менее из-за своей сложности процесс гидроразрыва до конца не изучен, особенно в случаях, когда геологическая среда содержит естественные трещины или полости. Именно такие условия могут возникать при использовании ГРП при разработке полезных ископаемых подземным способом. Поэтому возникает задача изучения закономерностей распространения гидроразрыва в среде с естественными трещинами вблизи полостей. Её решение позволит повысить эффективность рассматриваемой технологии. В данной работе предлагается решать эту задачу численно с помощью подхода реализованного на базе метода конечных элементов, который будет описан ниже.

Выбранный подход не является новым и ранее уже предлагался различными авторами при исследованиях распространения гидроразрывов в трещиноватых средах [5-7]. Он является усовершенствованием подхода, когда направление роста гидроразрыва и естественная трещина задаются с помощью специальных заранее проложенных с модели слоев [8-11]. К недостаткам выбранного подхода можно отнести сильную зависимость траекторий от сетки, её структуры. Тем не менее его может оказаться достаточно в некоторых случаях. Отметим, что наряду с этим подходом при решении подобных задач в настоящее время используются другие методы, такие как расширенный метод конечных элементов (XFEM) [12-15], метод дискретных элементов дискретных элементов (DEM) [16,17] или метод фазового поля (FFM) [18-20]. Но все они обладают своими недостатками и не могут применяться как универсальный инструмент.

Метод моделирования гидроразрыва в среде с трещинами

С целью изучения распространения гидроразрыва в среде с трещинами был реализован специальный подход на базе метода конечных элементов. Заключается он в использовании двух типов элементов при построении конечно-элементной модели. Первый тип предназначен для моделирования напряженно-деформированного состояния материала. Это классические элементы, которые применяются в методе конечных элементов. Второй тип предназначен для моделирования процессов разрушения, разрывов в среде и потока жидкости в них. Т.е. с помощью этих элементов в численной модели можно реализовывать естественные трещины и рост трещины гидроразрыва. Для простоты изложения далее будем их называть соединительными элементами.

Реализация данного подхода проходит в два основных шага. Первый заключается в построение сетки расчетной области. Второй – во внедрении в сетку соединительных элементов между всеми основными элементами. Схематично процесс преобразования сетки изображен на рисунке 1. Желтым цветом обозначены начальные элементы (элементы первого типа, классические), зеленым – соединительные. Последние определяются четырьмя основными узлами, задающими им форму (обозначены синим цветом) и двумя дополнительными узлами (обозначены черным цветом), через которые производится моделирование потока жидкости. Соединительные элементы имеют нулевую ширину h , чтобы не влиять на координаты начальных узлов сетки, длину равную длине ребра основного элемента, к которому он примыкает. Из этого следует, что они ориентированы и их разрушение происходит только вдоль направления, в котором измеряется длина. Помимо этого, соединительные элементы, вставленные между соседними основными элементами, обладают одним общим узлом (см рис.1), через который производится моделирование потока жидкости. Этот узел обеспечивает связность потока, передачу его параметров из одного соединительного элемента к другому.

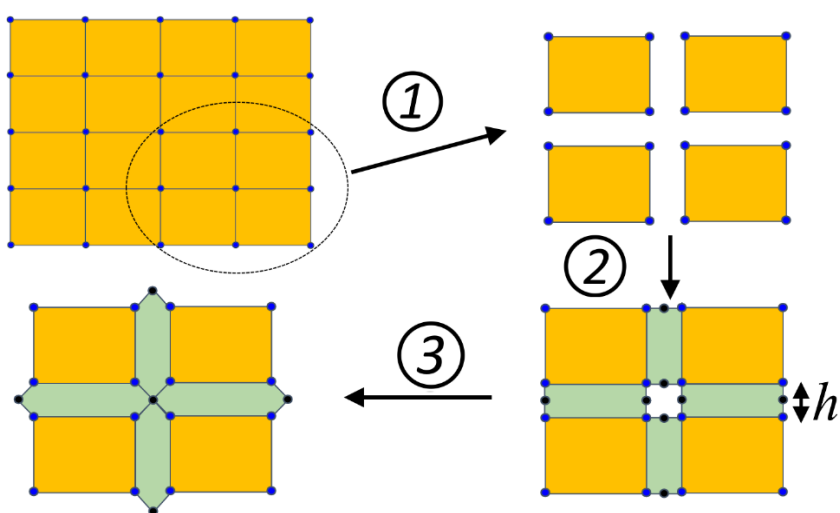


Рис. 1. Схема преобразование начальной конечно-элементной сетки:
 1 – выбор набора основных элементов; 2 – введение между ними дополнительных элементов; 3 – введение общего узла для смежных введенных элементов. Желтым цветом обозначены основные элементы для моделирования напряженно-деформированного состояния, зеленым – дополнительные элементы для моделирования разрушения, разрывов в среде и потока жидкости в них. Узлы, обозначенные черным цветом необходимы только для моделирования потока жидкости.

В конечно-элементной модели, построенной по такой схеме гидроразрыв, может распространяться только по соединительным элементам. Естественные трещины задаются путем выбора группы соединительных элементов и задание на них низкой или нулевой прочности.

Для реализации описанной выше схемы была реализована специальная программа. С помощью неё можно преобразовывать двумерные сетки, построенные из четырехугольных и треугольных элементов. Помимо это функционал программы позволяет в моделях задавать различные варианты трещин/сети трещин. На рисунке 2 представлены основные конфигурации моделей с круговым отверстием, которые можно построить с помощью программы: рис. 2а - одна трещина (в модели она может быть ориентирована произвольно); рис. 2б – слой ширины H с трещинами, которые ориентированы вдоль него; рис. 2в – среда с трещинами, ориентированными под некоторым углом α к горизонтальной плоскости. В последних двух случаях трещины могут задаваться либо вручную, либо автоматически случайным образом. В последнем варианте задается вероятность выбора соединительных элементов из всех элементов направление которых совпадает с направлением трещиноватости. Здесь важно, чтобы на построенной сетки грани основного числа элементов были сориентированы по направлению трещиноватости.

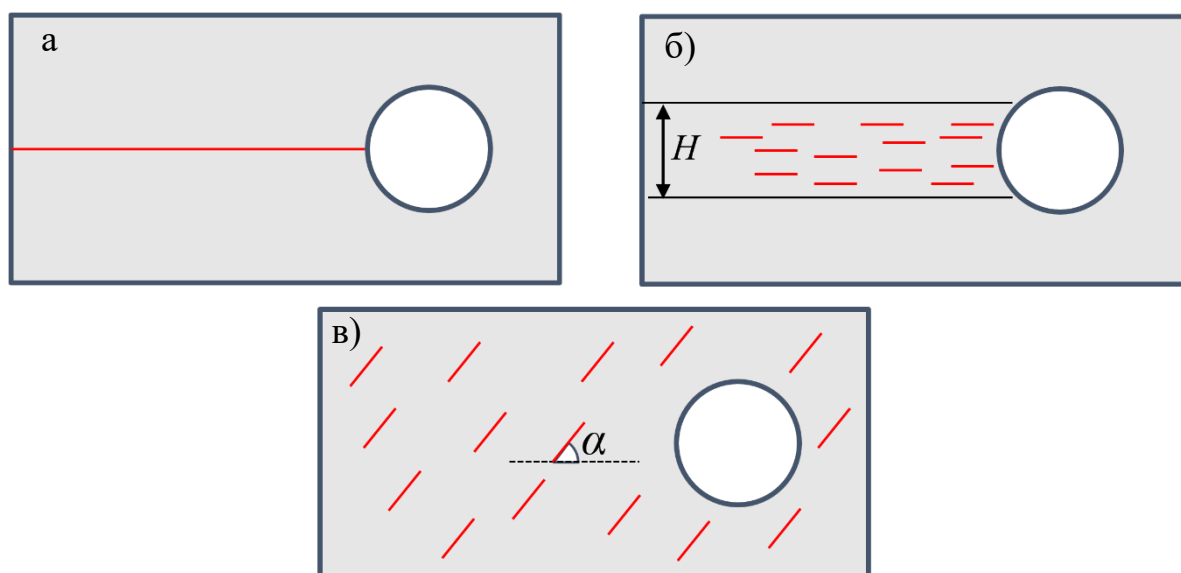


Рис. 2. Различные модели содержащие естественные трещины и полость которые можно реализовать в созданной программе:

- а) модель с одной трещиной; б) трещиноватый слой, примыкающий к полости;
- в) трещиноватая среда с выбранным направлением трещиноватости.

Постановка задачи

Так как в исследованиях используется метод конечных элементов, то расчетная область имеет конечные размеры. На её границах устанавливаются условия изображенных на рисунке 3: к левой и верхней границе приложены давления P_1 и P_2 соответственно, на правой и нижней границе условия нулевых перемещений по горизонтали и вертикали соответственно. На круговом отверстии радиуса R действует условие свободной поверхности.

В рамках данного подхода позиция начальной трещины гидроразрыва может быть любой. Для удобного её задания в модели вводится два три параметра: d – смещение в сторону от полости, b – смещение вниз, β – угол поворота начальной трещины относительно вертикального направления. В начальную трещину вводится поток жидкости. Среда считается упругой. Расчет распространения трещины гидроразрыва производится в квазистатическом приближении.

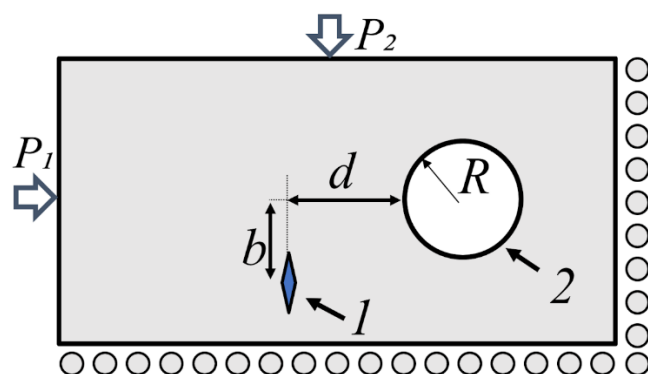


Рис. 3. Постановка задачи, где показана начальная трещина гидроразрыва (цифра 1), полость (цифра 2) и граничные условия.

Численные эксперименты

При численных расчетах использовались следующие основные параметры: размеры расчетной области 150х150 метров (выбран большим для снижения влияния границ на результаты), радиус полости 2.5 метра, модуль упругости материала 10 ГПа, коэффициент Пуассона 0.2, прочность материала на растяжение 1 МПа, вязкость жидкости разрыва 0.001 Па*с. Остальные параметры изменялись.

Далее приведем результаты некоторых численных экспериментов. Вначале рассмотрим среду с горизонтальной трещиноватостью (модель из рис. 2в, где угол α равен нулю). Позиции коротких трещин выбирались случайным образом. Их прочность задавалась равной 0.001 МПа, т.е. на три порядка меньше, чем у основного материала. Размер элементов вблизи полости составлял 0.2 метра. На рисунке 5а показана траектория гидроразрыва на сетке, построенной из четырехугольных элементов при $P_1=P_2=5$ МПа, $d=2R$. На рисунке 5б на сетке из треугольных элементов при $P_1=P_2=5$ МПа, $d=R$. В данных примерах гидроразрыв при развитии смещался в сторону полости. Смещение происходило по естественным трещинам, введенных в модель. При высоком уровне сжатия (давления P_1 и P_2 выше, чем прочность материала введенных элементов на растяжение) это поведение сохранялось. При низком напряжении в среде (P_1 и P_2 сравнимо или меньше прочности материала) гидроразрыв ориентировался вдоль направления трещиноватости и распространялся от кругового отверстия. Выход в отверстие наблюдался при P_1 и P_2 на порядок меньше, чем прочность материала.

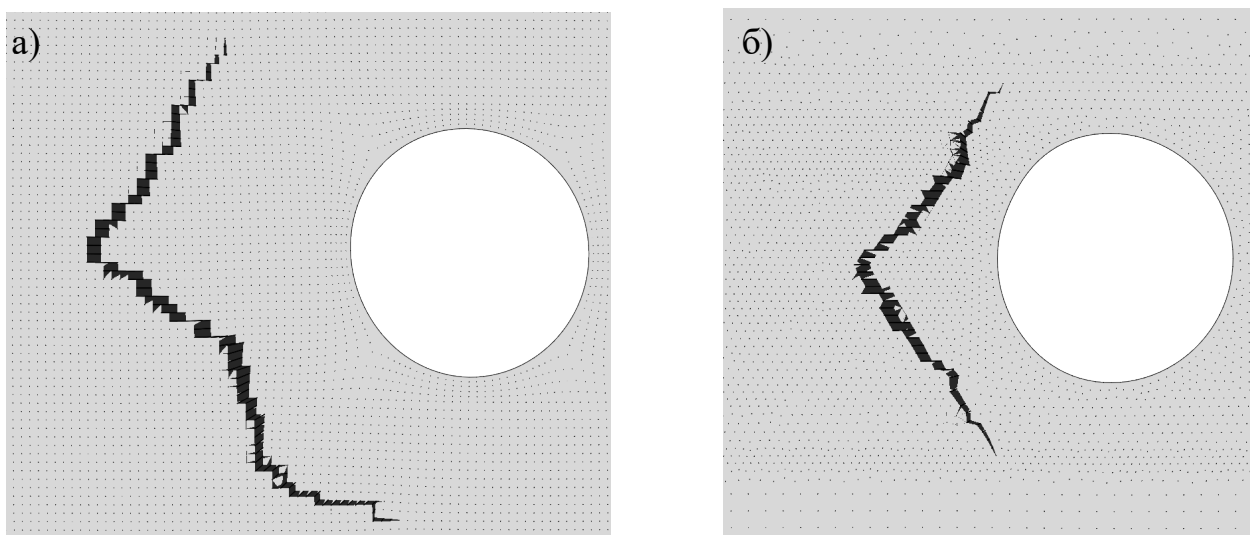


Рис. 4. Траектории гидроразрыва в трещиноватой среде при различных условиях:

- а) сетка из четырехугольных элементов, $P_1=P_2=5$ МПа, $d=2R$;
- б) сетка из треугольных элементов, $P_1=P_2=5$ МПа, $d=R$. Короткие трещины ориентированы горизонтально.

Далее рассмотрим пример пересечения трещиноватого слоя, примыкающего к полости. Пусть слой имеет ширину H равную 1 метр (см. рис. 2б), короткие трещины ориентированы вдоль него. На рисунке 5 показаны траектории гидроразрывов, когда начальная трещина располагалась вне этого слоя и была ориентирована вертикально (параметры позиции $d=R$, $b=R$). В первом случае на рис.5а гидроразрыв пересек этот слой, при этом при прохождении через него произошло смещение вдоль введенных трещин. Этот результат был получен на сетке, построенной из четырехугольных элементов и $P_1=P_2=2$ МПа. Во втором случае (рис. 5б) также произошло пересечение, но наблюдаются более значительные смещения вдоль слоя. Здесь использовалась треугольная сетка и значения сжатия среды ниже, чем в первом примере ($P_1=P_2=2$ МПа).

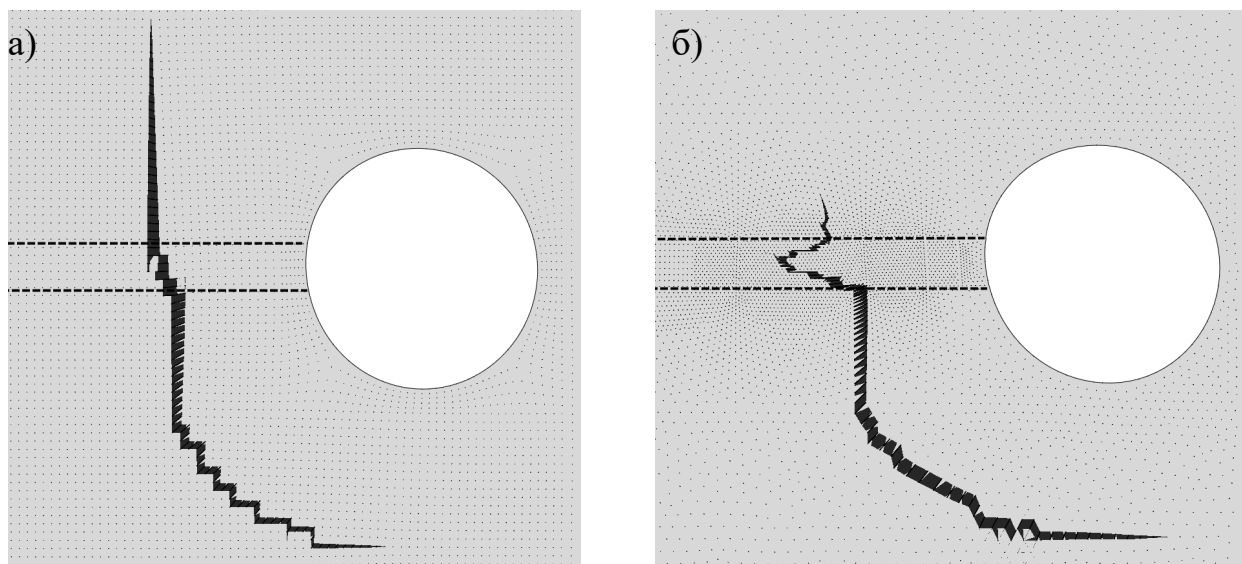


Рис. 5. Траектории гидроразрыва в модели с трещиноватым слоем примыкающим к полости при различных условиях:

а) сетка из четырехугольных элементов, $P_1=P_2=5$ МПа; б) сетка из треугольных элементов, $P_1=P_2=2$ МПа, $d=R$. Начальная трещина гидроразрыва располагалась вне слоя ($d=R$, $b=R$) и ориентирована вертикально. Пунктиром обозначены границы слоя.

Численные эксперименты показывают, что снижение сжатия среды приводит к условиям, при которых гидроразрыв не пересекает трещиноватый слой. Повышение сжатия среды или увеличение сжатия в направлении нормальном к слою наоборот, улучшают условия его пересечения. При этом смещения траектории гидроразрыва вдоль него уменьшаются (при высоком сжатии среды смещения не наблюдаются).

Выводы

В работе был представлен метод моделирования распространения гидроразрыва в среде, содержащей трещины и полости. Описаны возможности разработанной программы, которая его реализует. Приведены результаты численных экспериментов. Показано, что наличие трещин в модели может существенно влиять на траектории получаемых разрывов. В частности, продемонстрировано, что в трещиноватой среде гидроразрыв при распространении смещается в сторону полости по введенным в модель коротким трещинам. Приведены примеры моделирования гидроразрыва в модели с трещиноватым слоем, примыкающего к полости. Показано, что при его пересечении наблюдается смещение траекторий. Величина смещений зависит от сжатия среды: чем выше сжатие и выше напряжение действующие по нормали к слою, тем меньше смещение. При низких значениях сжатия среды пересечений не наблюдается.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00145, <https://rscf.ru/project/25-17-00145>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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
2. 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.
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. Li, Y., Deng, J. G., Liu, W., & Feng, Y. Modeling hydraulic fracture propagation using cohesive zone model equipped with frictional contact capability // *Computers and geotechnics*. – 2017. – T. 91. – C. 58-70.
6. Wang H. Y. Hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs: Complex fracture or fracture networks // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2019. – T. 68. – C. 102911.
7. Xia B. et al. Numerical simulation of multiple hydraulic fracture propagation in heterogeneous coal reservoirs based on combined finite-discrete element method // *Frontiers in Earth Science*. – 2024. – T. 12. – C. 1411129.
8. Sanchez E. C. M., Cordero J. A. R., Roehl D. Numerical simulation of three-dimensional fracture interaction // *Computers and Geotechnics*. – 2020. – T. 122. – C. 103528.
9. Xi X. et al. Mixed-mode fracture modelling of the near-wellbore interaction between hydraulic fracture and natural fracture // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2022. – T. 55. – №. 9. – C. 5433-5452.
10. Wang, D., Dong, Y., Sun, D., & Yu, B. A three-dimensional numerical study of hydraulic fracturing with degradable diverting materials via CZM-based FEM // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – T. 237. – C. 107251.
11. Азаров А.В., Сказка В.В., Сердюков С.В. Численное моделирование взаимодействия трещины гидроразрыва и проницаемой трещины вблизи полости // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. -2025. -№6. – С. 84-94
12. Tan P., Jin Y., Pang H. Hydraulic fracture vertical propagation behavior in transversely isotropic layered shale formation with transition zone using XFEM-based CZM method // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2021. – T. 248. – C. 107707.
13. Zhou Y., Yang D. A fast simulation method for hydraulic-fracture-network generation in fractured rock based on fully coupled XFEM // *Computers and Geotechnics*. – 2022. – T. 150. – C. 104892.
14. Zhang J. N. et al. A hybrid numerical approach for hydraulic fracturing in a naturally fractured formation combining the XFEM and phase-field model // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – T. 271. – C. 108621.
15. Wang Y., Javadi A. A., Fidelibus C. A hydro-mechanically-coupled XFEM model for the injection-induced evolution of multiple fractures // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2023. – T. 47. – №. 9. – C. 1539-1558.
16. Seok Yoon J. et al. Discrete element modelling of hydraulic fracture propagation and dynamic interaction with natural fractures in hard rock // *ISRM EUROCK*. – ISRM, 2017. – C. ISRM-EUROCK-2017-130.
17. Yang, W. M., Geng, Y., Zhou, Z. Q., Li, L. P., Gao, C. L., Wang, M. X., & Zhang, D. S. DEM numerical simulation study on fracture propagation of synchronous fracturing in a double

fracture rock mass //Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. – 2020. – T. 6. – №. 2. – C. 39.

18. Li X. et al. Phase-field modelling of interactions between hydraulic fractures and natural fractures //Rock mechanics and rock engineering. – 2022. – T. 55. – №. 10. – C. 6227-6247.

19. Peng G. Fracture propagation laws of staged hydraulic fracture in fractured geothermal reservoir based on phase field model //International Journal of Coal Science & Technology. – 2023. – T. 10. – №. 1. – C. 52.

20. Wu D., Tang X., Shao Z. A novel phase-field model for investigating the interaction between hydraulic fractures and natural fractures //Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2026. – T. 188. – C. 106774.

© *A. B. Азаров, A. A. Ниукканен, 2026*