

А. В. Азаров¹✉, С. В. Сердюков¹

Оценка напряженного состояния среды на основе анализа давления распространения трещин гидроразрыва вблизи полости

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

Аннотация. В работе рассматривается задача оценки напряженного состояния среды по давлению распространения трещин гидроразрывов, которые выполняются вблизи цилиндрической полости на различном расстоянии от неё. Исследования проводятся на основе проведения численных экспериментов и анализе их результатов. Рост трещины моделируется в квазистатическом приближении. В рамках работы рассматривается однородная упругая модель среды. Для решения основных уравнений модели используется численный метод расширенных конечных элементов. Рассматриваются варианты напряжённого состояния среды, при котором минимальное напряжение действует перпендикулярно оси цилиндрической полости. Приводится множество примеров обработки результатов численных экспериментов. Показано, что при однородном всестороннем сжатии среды соотношения между давлениями распространения гидроразрывов близки к соотношению между радиальными напряжениями вокруг полости, которые вычислены из задачи Кирша для кругового отверстия. Продемонстрировано, что на основе анализа кривых давлений возможно оценить направления действия минимального и максимального напряжения, а также оценивать соотношение между ними.

Ключевые слова: определение напряженного состояния, гидравлический разрыв, рост трещины, давление распространения гидроразрыва, гидроразрыв вблизи полости

A. V. Azarov¹✉, S. V. Serdyukov

Estimate of the stress state of the environment based on the analysis of the pressure of propagation of hydraulic fracture cracks near the cavity

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 estimating the stress state of the environment based on the pressure of propagation of hydraulic fractures, which are performed near a cylindrical cavity at different distances from it. The research is carried out on the basis of numerical experiments and analysis of their results. Crack growth is modeled in a quasi-static approximation. The work considers a homogeneous elastic model of the medium. The numerical method of extended finite elements is used to solve the basic equations of the model. The variants of the stress state of the medium are considered, in which the minimum stress acts perpendicular to the axis of the cylindrical cavity. Many examples of processing the results of numerical experiments are given. It is shown that under uniform all-round compression of the medium, the ratios between the propagation pressures are close to the ratio between the radial stresses around the cavity, which are calculated from the Kirsch problem for a circular hole. It has been demonstrated that, based on the analysis of propagation pressures, it is

possible to estimate the directions of action of the minimum stress, as well as the relationship between the maximum and minimum stress.

Keywords: stress state determination, hydraulic fracturing, crack growth, hydraulic fracturing propagation pressure, hydraulic fracturing near a cavity

Введение

Измерение напряженного состояния массива горных пород является одной из важных задач, возникающих при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом. В настоящее время она остается актуальной несмотря на большое количество существующих методов и работ в этой области.

Все разработанные на сегодняшний день подходы имеют какие-либо недостатки и позволяют решать задачу оценки напряжений в горном массиве только при определенных условиях. Например, широко используемые деформационные методы [1, 2] типа частичной или полной разгрузки [3,4,5], щелевой разгрузки [6], параллельных скважин [7] требуют информацию об упругих характеристиках породы [6]. Дополнительно к этому, эти методы чувствительны к свойствам среды в локальной области (например, состояние породы вблизи скважины, из которой выполняется наблюдение).

Частично избежать зависимости от свойств породы удастся при использовании технологии гидроразрыва пласта [4]. С помощью неё возможно определять минимальное напряжение в среде только на основе анализа спада давления после остановки закачки рабочей жидкости в трещину. Но здесь возникает множество проблем, одна из которых заключается в обработке кривой давления, где момент закрытия трещины зачастую достаточно просто определяется (момент закрытия соответствует значению минимального напряжения) [8-11]. Другая проблема состоит в том, что метод не работает если утечки в пласт малы или их совсем нет [12]. Правда она решается, например, технологией обратного потока жидкости [13,14]. К существенному недостатку также можно отнести то, что ГРП не дает понимания как направлено минимальное напряжение в пространстве. Если гидроразрыв использовать для определения максимального напряжения, то как и в случае с деформационными методами, появляется зависимость метода от локальных свойств среды, а также требуется информация о прочности породы [9].

В данной работе развивается метод оценки напряженного состояния среды на основе технологии ГРП. В работе [15] был предложен метод определения напряжений в среде по давлению распространения трещин ГРП, выполняемых вблизи полости на различном расстоянии от неё. Показано в каких случаях и с какой точностью он работает. В данной статье подробно рассматриваются некоторые аспекты предложенного метода. А именно будет показано как на основе анализа соотношений между кривыми давления можно получить информацию о распределении напряжений в среде.

Метод оценки напряженного состояния

Рассмотрим цилиндрическую полость радиуса R и начальную трещину, расположенную от неё на расстоянии d (рис. 1). Будем считать, что среда является

однородной, упругой. Моделирование распространения трещины ГРП в квазистатическом приближении будем проводить на основе численного метода расширенных конечных элементов [16]. Подробная методика такого подхода описана в работах [17,18].

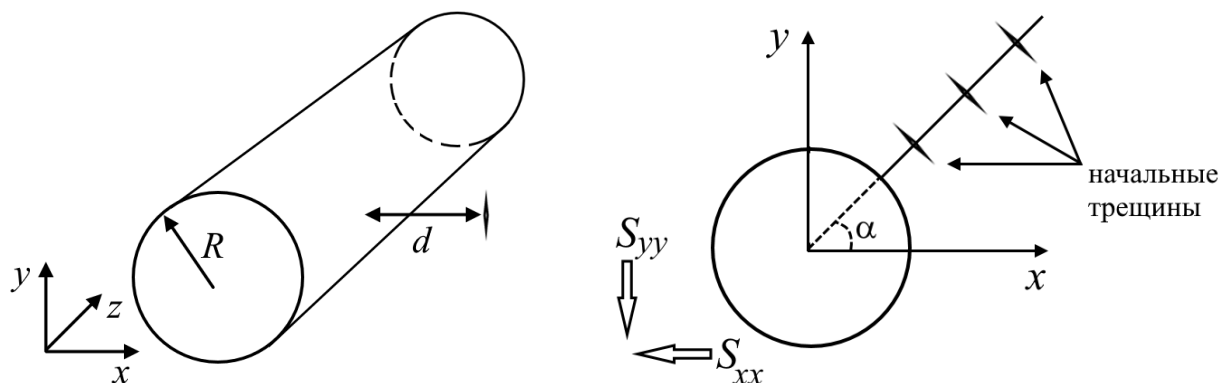


Рис. 1. Цилиндрическая полость радиуса R вместе с начальной трещиной гидроразрыва, расположенной на расстоянии d от неё: а) трехмерный вид, б) вид в плоскости xy с тремя начальными трещинами, расположенными на различном расстоянии от полости.

В работе [19] показано, что при определенных условиях трещины ГРП могут развиваться вдоль полости. В этих случаях на давление распространения существенное влияние будут оказывать радиальные напряжения, возникающие вследствие разгрузки среды. Поэтому анализируя давления распространения возможно получать информацию о напряженном состоянии среды. Далее покажем, как это можно делать.

Введем следующее отношение:

$$K(\alpha, V, d_1, d_2) = \frac{p(\alpha, V, d_1)}{p(\alpha, V, d_2)}. \quad (1)$$

где $p(\alpha, V, d_1)$ и $p(\alpha, V, d_2)$ давления распространения гидроразрывов, выполненных на расстоянии d_1 и d_2 от полости под углом α к горизонтальной оси при объеме закаченной жидкости V (см. рис. 1а). По аналогии введем второе отношение:

$$W(d_1, d_2) = \frac{\sigma_{rr}(d_1)}{\sigma_{rr}(d_2)}. \quad (2)$$

где $\sigma_{rr}(d_1)$ и $\sigma_{rr}(d_2)$ радиальные напряжения на расстоянии d_1 и d_2 от полости, полученные в результате решения задачи Кирша для кругового отверстия.

Вначале рассмотрим вариант, когда гидроразрыв выполняется на расстоянии $R/2$, R , $2R$ от полости, а в среде действует напряжение всестороннего сжатия $H=S_{xx}=S_{yy}=S_{zz}$. На рисунке 2 показаны отношения давлений $K(\alpha, V, 2R, R)$, $K(\alpha, V, R, R/2)$, $K(\alpha, V, 2R, R/2)$ для $H=1$ МПа и различной прочности материала на растяжение S_c равного 0.1, 1 и 10 МПа соответственно. Так как сжатие однородно, угол α в данном случае не важен и может быть любым. Пунктирной линией обозначено отношение радиальных напряжений $W(2R, R)$, $W(R, R/2)$ и $W(2R, R/2)$ из задачи Кирша. Как видно для S_c сравнимых или близких к напряжению сжатия в среде значения $K(\alpha, V, d_1, d_2)$ и $W(d_1, d_2)$ оказываются близкими к друг к другу. При высоких S_c разница между отношениями давлений $K(\alpha, V, R, R/2)$ и $K(\alpha, V, 2R, R/2)$ практически отсутствует (кривые близко расположены друг к другу). В этом случае, как показано в работе [15], по кривым давления напряжения определить невозможно.

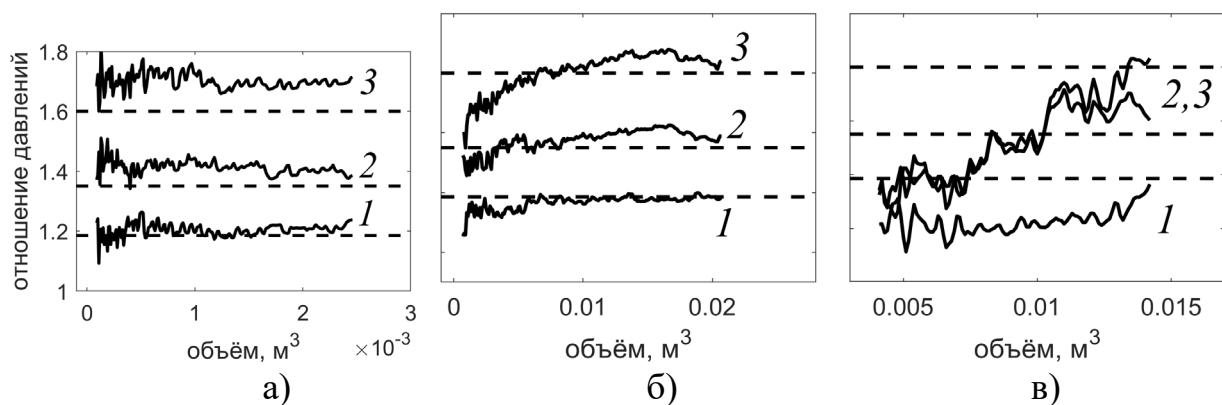


Рис. 2. Отношения давлений распространения гидроразрывов, выполненных на расстоянии $R/2$, R и $2R$ от полости при напряжении всестороннего сжатия в 1 МПа, модуле упругости в 10 ГПа и различной прочности материала на растяжение: а) 0.1 МПа, б) 1 МПа, в) 10 МПа. Сплошная линия 1 – отношение $K(\alpha, V, 2R, R)$, 2 – $K(\alpha, V, R, R/2)$, 3 – $K(\alpha, V, 2R, R/2)$. Пунктирная линия соответствует отношениям радиальных напряжений из задачи Кирша на расстояниях $R/2$, R и $2R$ от полости.

При некоторых соотношениях между параметрами модели значения $K(\alpha, V, d_1, d_2)$ и $W(d_1, d_2)$ могут сильно различаться. На рис. 3 изображены примеры, когда $K(\alpha, V, d_1, d_2)$ значительно ниже (рис. 3а), практически совпадает (рис. 3б) и превышает (рис. 3в) величину $W(d_1, d_2)$. При этом во всех случаях использовалось однородное всестороннее сжатие среды. Поэтому ориентироваться на отношения давлений с целью получения информации о напряженном состоянии нельзя.

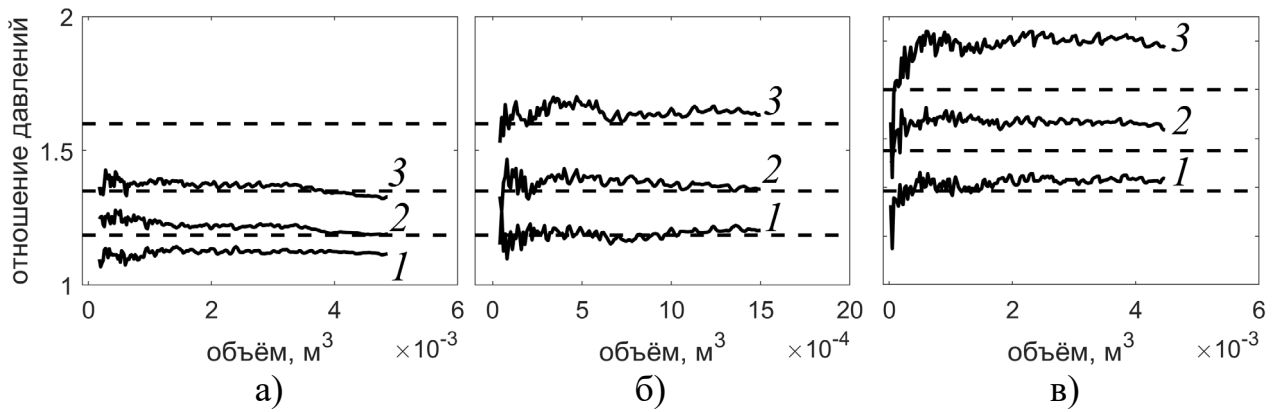


Рис. 3. Отношения давлений распространения гидроразрывов, выполненных на расстоянии $R/2$, R и $2R$ от полости при модуле упругости 10 ГПа и различном сжатие среды и прочности материала на растяжение: а) сжатие 0.25 МПа, прочность 0.25 МПа; б) сжатие 0.5 МПа, прочность 0.1 МПа; в) сжатие 10 МПа, прочность 0.1 МПа. Сплошная линия 1 – $K(\alpha, V, 2R, R)$, 2 – $K(\alpha, V, R, R/2)$, 3 – $K(\alpha, V, 2R, R/2)$. Пунктирная линия соответствует отношениям радиальных напряжений из задачи Кирша на расстояниях $R/2$, R и $2R$ от полости.

В процессе анализа кривых было замечено, что несмотря на изменение значений $K(\alpha, V, 2R, R)$, $K(\alpha, V, R, R/2)$ и $K(\alpha, V, 2R, R/2)$ в зависимости от параметров модели, соотношения между ними сохраняется. Вследствие этого в рассмотрение было введено следующее отношение:

$$M(\alpha, V, d_1, d_2, d_3) = \frac{K(\alpha, V, d_3, d_1) - K(\alpha, V, d_2, d_1)}{K(\alpha, V, d_2, d_1) - K(\alpha, V, d_3, d_2)} \quad (3)$$

где d_1, d_2, d_3 – расстояния между полостью и начальной трещиной ГРП в порядке увеличения. На практике оказалось удобным брать среднее значение M по всему объему закаченной жидкости, которое обозначим $\bar{M}(\alpha, d_1, d_2, d_3)$. Если рассчитать $\bar{M}$ для примера выше, то получим значения 1.57, 1.41, 1.22 соответственно. Аналогичный параметр M для радиальным напряжений из задачи Кирша вокруг кругового отверстия при однородном поле сжатия среды равен 1.52 (в формулу (3) на место $K(\alpha, V, d_1, d_2)$ необходимо подставить $W(d_1, d_2)$). Обработка результатов численных экспериментов показала, что при различном однородном сжатии среды, модуле упругости и прочности породы сравнимой или меньше величины сжатия, значение $\bar{M}$ находится в диапазоне от 1.22 до 1.6. Увеличение S_c приводит к понижению $\bar{M}$. Таким образом, можно сказать, что если значение $\bar{M}$ для различных α лежит от 1.2 до 1.6, то напряженное состояние среды близко к однородному сжатию.

Далее рассмотрим неоднородное поле напряжений, компоненты которого определяются значениями S_{xx} , S_{yy} и S_{zz} (напряжения, действующие вдоль каждой из осей координат (см. рис. 1)). Пусть S_{xx} будет минимальным напряжением, а S_{yy} и S_{zz} равны. Прочность породы возьмём ниже или сравнимой со значениями S_{xx} ,

S_{yy} и S_{zz} . Как показано в работе [19], в таком случае трещина ГРП не будет выходить на поверхность полости (за исключением низких значений компонент поля напряжения). Тогда параметр $\bar{M}$ можно использовать для поиска для поиска направления действия минимального напряжения. Например, возьмём $S_{xx}=1.5$ МПа, $S_{yy}=3$ МПа, $S_{zz}=3$ МПа, $S_c=1$ МПа, $E=100$ ГПа. Значение параметра $\bar{M}(\alpha, R/2, R, 2R)$ при α равным 0, 45 и 90 градусов будут равны 0.34, 1.27 и 2.41 соответственно. Если увеличить S_{xx} до 2.25 МПа, то $\bar{M}(\alpha, R/2, R, 2R)$ будет равен 0.93, 1.31 и 1.9. Таким образом параметр, определяемый формулой (3), принимает наименьшее значение в направлении минимального напряжения, а максимальное в направлении максимального.

Более того, по $\bar{M}$ возможно оценить степень неоднородности напряжений. Пусть прочность материала на растяжение $S_c=1$ МПа, $S_{yy}=S_{zz}=3$ МПа, а S_{xx} равно 3, 2.25 и 1.5 МПа. Тогда для гидроразрывов, выполненных в направлении действия минимального напряжения на расстояниях $R/2$, R и $2R$ от полости значение параметра $\bar{M}(0, R/2, R, 2R)$ (в данном случае при нулевом угле α), будет равно 1.49, 0.93, 0.39 соответственно. Т.е. при уменьшении минимального напряжения происходит уменьшение $\bar{M}$. Это происходит из-за того, что разница между отношениями давлений начинает уменьшаться, наиболее сильно между $K(0, V, R, R/2)$ и $K(0, V, 2R, R/2)$. На рис. 4 изображены отношения между напряжениями $K(0, V, d_1, d_2)$ для различных S_{xx} при фиксированных S_{yy} и S_{zz} , где это наглядно видно. Дополнительно рассмотрим еще один набор параметров: $S_c=0.1$ МПа, $E=10$ ГПа, $S_{yy}=S_{zz}=1$ МПа. Тогда для S_{xx} равного 0.33, 0.5, 0.75, и 1 МПа значения $\bar{M}$ будут равны 0.12, 0.226, 1.05, 1.42 соответственно. Таким образом можно сделать вывод, что уменьшение параметра $\bar{M}$ приводит к росту степени неоднородности поля напряжений при низких значениях прочности материала по сравнению со значениями напряжений.

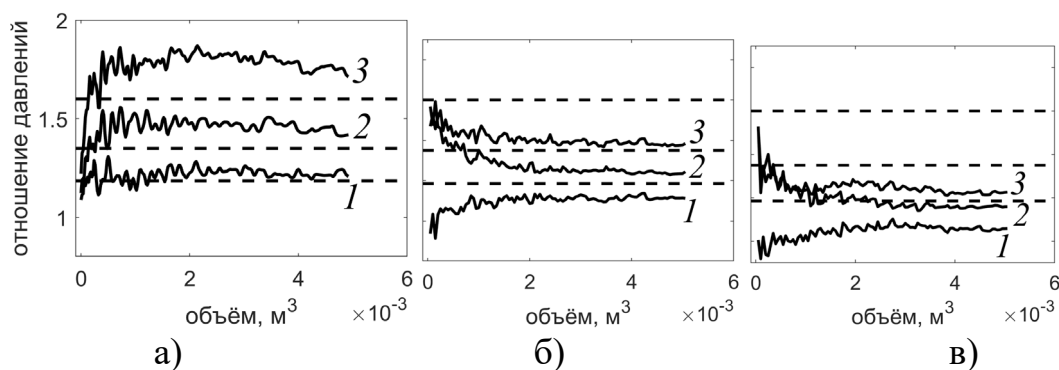


Рис. 4. Отношения давлений распространения гидроразрывов, выполненных на расстоянии $R/2$, R и $2R$ от полости при модуле упругости 100 ГПа, прочности материала на растяжение 1 МПа, $S_{yy}=S_{zz}=3$ МПа и различном S_{xx} : а) 3 МПа, б) 2.25 МПа; в) 1.5 МПа. Сплошная линия 1 – $K(\alpha, V, 2R, R)$, 2 – $K(\alpha, V, R, R/2)$, 3 – $K(\alpha, V, 2R, R/2)$. Пунктирная линия соответствует отношениям радиальных напряжений из задачи Кирша на расстояниях $R/2$, R и $2R$ от полости.

Выводы

В работе были исследованы возможности оценки напряженного состояния среды по давлению распространения трещин гидроразрывов, выполняемых вблизи цилиндрической полости на различном расстоянии от неё. Показано, что анализируя давления распространения можно:

- найти направление минимального и максимального напряжения, которые действуют в плоскости перпендикулярной оси цилиндрической полости;
- оценить соотношение между максимальным и минимальным напряжением, которые действуют в плоскости перпендикулярной оси цилиндрической полости.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер государственной регистрации 121052500138-4, код (шифр) научной темы FWNZ-2021-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубков А. В., Феклистов, Ю. Г., Липин, Я. И., Худяков, С. В., Криницын, Р. В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4 (11) . – С. 41-49.
2. Сентябов С. В., Карамнов Д. В. Методы определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями // Проблемы недропользования. – 2023. – № 1 (36). – С. 54-63.
3. Amadei B., Stephansson O. Rock stress and its measurement // Springer Science & Business Media. – 2012
4. Zheng, M., Li, S., Xu, H., Liang, Z., & Lu, X. Investigation of the rock failure effect on overcoring stress relief test in deep hard rock // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2023. – Т. 82. – №. 9. – С. 353.
5. Yuqiao Q., Hua T., Zhenjun W. Application of the Modified Borehole Wall Stress Relief Method in Deep Vertical Boreholes // International Journal of Geomechanics. – 2024. – Т. 24. – №. 8. – С. 04024151.
6. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001.
7. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Автоматизированный измерительный комплекс приборов для определения напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – №. 3. – С. 115-119.
8. Lakirouhani A., Detournay E., Bungler A. P. A reassessment of in situ stress determination by hydraulic fracturing //Geophysical Journal International. – 2016. – Т. 205. – №. 3. – С. 1859-1873.
9. Lakirouhani A., Jolfaei S. Hydraulic fracturing breakdown pressure and prediction of maximum horizontal in situ stress //Advances in Civil Engineering. – 2023. – Т. 2023. – №. 1. – С. 8180702.
10. Piao, S., Huang, S., Wang, Q., & Ma, B. Experimental and numerical study of measuring in-situ stress in horizontal borehole by hydraulic fracturing method //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Т. 141. – С. 105363.
11. Li, P., Cai, M., Miao, S., Li, Y., Sun, L., Wang, J., & Gorjian, M. Comparison and evaluation of overcoring and hydraulic fracturing stress measurements // Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 8771.

12. Jung, H., Sharma, M. M., Cramer, D. D., Oakes, S., McClure, M. W. Re-examining interpretations of non-ideal behavior during diagnostic fracture injection tests //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – Т. 145. – С. 114-136.
13. Plahn S. V. Nolte, K. G., Thompson, L. G., & Miska, S. A quantitative investigation of the fracture pump-in/flowback test //SPE Production & facilities. – 1997. – Т. 12. – №. 01. – С. 20-27.
14. Raaen, A. M., Skomedal, E., Kjørholt, H., Markestad, P., & Økland, D. Stress determination from hydraulic fracturing tests: the system stiffness approach // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2001. – Т. 38. – №. 4. – С. 529-541.
15. Азаров А.В., Сердюков С.В. Определение напряжений в массиве горных пород по давлению распространения трещин гидроразрыва в окрестности цилиндрической выработки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – №. 1. – С. 17-33.
16. 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. – Т. 58. – №. 12. – С. 1873-1905.
17. Azarov A., Patutin A., Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 22. – С. 11004.
18. 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.
19. Azarov A. V., Serdyukov S. V. Modeling Hydraulic Fracturing near Circular Underground Opening in Triaxial Compression //Journal of Mining Science. – 2023. – Т. 59. – №. 5. – С. 749-762.

© А. В. Азаров, С. В. Сердюков, 2025