

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.24.97.005

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2021

Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ

д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
ФИЦ УХХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: nvch2014@yandex.ru



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ

Задача о распространении трещины гидроразрыва в прочных породах кровли пласта около очистной выработки решена на основе ранее построенных моделях о геомеханическом состоянии углепородного массива, вмещающего очистную выработку, и движении трещины гидроразрыва, распространяющейся в прочных породах кровли угольного пласта вблизи пластовой выработки.

В этих моделях поле напряжений в углепородном массиве определяется из решения упругопластической задачи, в которой области пластических деформаций охватывают лишь угольный пласт, а критериями его перехода в пластическое состояние являются два критерия Кулона–Мора: общий и специальный. Траектория трещины гидроразрыва, распространяющаяся в этом поле напряжений, строится на основе зависимостей механики хрупкого разрушения Гриффитса–Ирвина.

В ходе решения задачи установлено, что траектория трещины гидроразрыва в основном направлена в сторону выработанного пространства, как ни была бы ориентирована зародышевая трещина. Для обеспечения прямолинейной траектории, совпадающей с направлением зародышевой трещины, ориентированной на массив впереди очистного забоя, требуется значительное давление жидкости в гидросистеме.

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, ОЧИСТНАЯ ВЫРАБОТКА, ТРЕЩИНА ГИДРОРАЗРЫВА, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ.

ВВЕДЕНИЕ

Способ направленного гидроразрыва широко применяется в основном для принудительного обрушения прочных пород кровли пласта при ведении очистных работ, поскольку чрезмерное их зависание над выработанным пространством грозит безопасному ведению горных работ [1–8].

Эффективность применения метода определяется подбором параметров оборудования и выбором заложения зародышевой трещины, которые обоснованы результатами теоретических исследований, полученных в рамках физико-математических моделей развития трещины гидроразрыва [9–13].

В данной статье представлены некоторые результаты расчёта траектории дисковой трещины гидроразрыва для ряда положений иницирующей трещины относительно очистной выработки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Расчётная схема задачи представлена на рис. 1. В массиве горных пород, моделируемом невесомой плоскостью, имеется очистная выработка 1 прямоугольного сечения высотой h , равной мощности пласта t и пролётом b . Она

пройдена на глубине H по угольному пласту. Кровля и почва пласта представлены прочными породами с характеристиками прочности, значительно превышающими характеристики прочности самого угольного пласта и тем более выше, чем характеристики прочности по контактам пласта с породами кровли и почвы (боковыми породами). Плоскость нагружена сверху, снизу и с боков равнокомпонентным гравитационным давлением γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород).

Характеристики прочности угольного пласта: σ_0 — предел прочности на одноосное сжатие, K — коэффициент сцепления, ρ — угол внутреннего трения, K' — коэффициент сцепления, ρ' — угол внутреннего трения на контакте пласта с остальным массивом. Впереди выработки краевая часть угольного пласта 3 шириной L находится в предельно напряжённом состоянии. Позади выработки образуется слой 4 обрушившихся сверху пород массива. Принято, что этот слой подбучивает (создаёт опору) породы кровли.

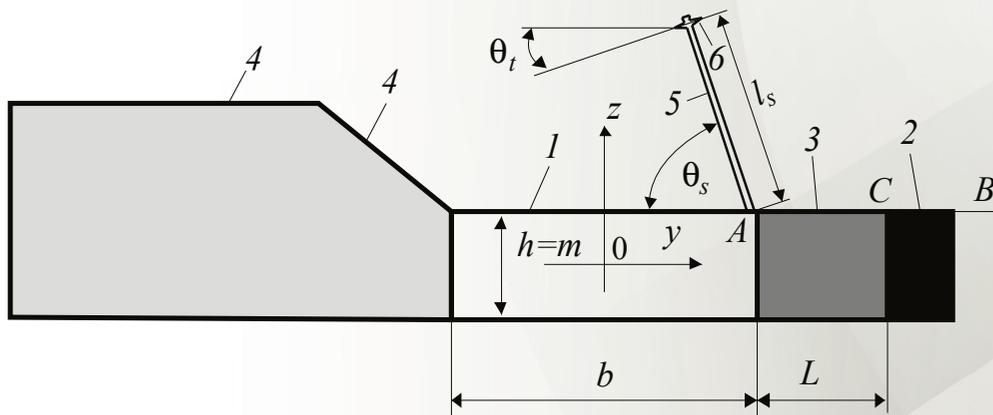


Рис. 1. Схема очистной выработки и скважины гидроразрыва.

1 — выработка, 2 — пласт, 3 — предельно напряжённая зона пласта, 4 — слой обрушенных пород позади выработки

Поскольку прочность боковых пород значительна, то их зависание над выработкой (выработанным пространством) до их обрушения может достигать значительных размеров. Из забоя выработки под углом к горизонту θ_s в сторону выработанного пространства бурится скважина 5 длиной l_s . Из неё щелеобразователем создаётся дисковая щель 6 (зародышевая трещина) радиусом a . Она наклонена к горизонту на угол θ_t и нагружается давлением p . Её координаты y_p, z_t в системе yoz , совмещённой с центральными осями выработки. Очевидно, что геометрические параметры щели связаны с параметрами скважины следующими соотношениями:

$$y_t = \frac{b}{2} - l_s \cos \theta_s, \quad z_t = \frac{h}{2} + l_s \sin \theta_s, \\ \theta_t = 90^\circ - \theta_s.$$

Принято, что размеры выработки вдоль абсциссы x (направлено перпендикулярно

плоскости чертежа) значительно превосходят размеры в плоскости $0yz$; трещина гидроразрыва в процессе роста не изменяет поля напряжений в массиве горных пород; фильтрация жидкости не учитывается [13].

Известно, что рост трещины в твёрдых деформируемых телах происходит при следующем условии Гриффитса–Ирвина [14–17]:

$$k_I^2 + k_{II}^2 = K_{IC}^2,$$

где k_I — коэффициент интенсивности напряжений, обусловленный действием нормальной нагрузки p_I на берегах трещины, k_{II} — коэффициент интенсивности напряжений от действия касательной нагрузки p_{II} также на берегах трещины; E — модуль упругости первого рода, а μ — коэффициент Пуассона пород массива; K_{IC} — коэффициент трещиностойкости материала (справочные данные для некоторых типов горных пород приведены в [18]).

Поскольку трещина гидроразрыва даже при достаточно больших размерах всё равно мала по сравнению с размерами вмещающего массива, то нагрузки p_1 , p_{II} равны нормальным и касательным напряжениям на берегах трещины, которые после построения поля напряжений определить не сложно.

Коэффициенты интенсивности напряжений для дисковой трещины радиуса c , нагруженной внутренним давлением на участке радиуса a ($a < c$), расположенной в гравитационном поле напряжений вблизи выработки, выражаются зависимостями, приведёнными в [17, 18].

Направленный гидроразрыв горных пород реализуется посредством насосных установок с жёсткими рабочими характеристиками: напор p_0 и расход жидкости в единицу времени Q . В таких установках при $Q = \text{const}$, p_0 — может принимать разные значения.

В процессе гидроразрыва давление жидкости при прохождении по трещине за счёт вязкости η и параметров самой трещины (раскрытие w перед очередным циклом прорастания и её длиной $2c$) изменяется согласно закону Пуазейля [11], а раскрытие трещины по формуле Снеддона [19]. Размеры трещины в процессе её скачкообразного роста найдутся из решения трансцендентного уравнения [12]. Из него следует, что рост трещины определяется не только рабочими характеристиками насосного оборудования, но и силами, действующими на берегах растущей трещины, которые зависят от поля напряжений в углепородном массиве в окрестности выработки.

Таким образом, основу математической модели развития трещины гидроразрыва составляют ряд моделей геомеханического состояния анизотропного массива горных пород с системой выработок [13, 20–24], в рамках которых возможно построение поля напряжений. Модели разработаны как в двумерной, так и в трёхмерной постановке и ориентированы на исследования геомеханического состояния анизотропного массива в окрестности протяжённых выработок, включая и построение зон нарушения сплошности.

Эти модели были использованы и для оценки напряжённого состояния массива, вмещающего угольные пласты и пройденные по ним пластовые выработки.

Поскольку характеристики прочности самого пласта, а тем более на его контактах с массивом значительно ниже характеристик прочности боковых пород, то в краевых частях пласта образуются предельно напряжённые зоны (зоны пластичности). Наличие таких зон, в которых угольный пласт испытывает неупругие деформации, делает задачу о напряжённом состоянии массива около пластовой выработки упругопластической [2, 13].

Механизм формирования предельно напряжённых зон с образованием линий скольжения изложен в работе [13]. В предельно напряжённой зоне пласта напряжения определяются путём совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и двух критериев перехода пласта в предельное состояние, называемых общим и специальным критериями Кулона–Мора [25]. Общий критерий формулируется для всех точек пласта за исключением точек, принадлежащих контакту пласта с боковыми породами, а специальный критерий для точек, принадлежащих только контакту пласта. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений относится к классу уравнений гиперболического типа и решается методом характеристик.

После построения поля напряжений в предельно напряжённой зоне можно определить её размер. Для этой цели к контакту пласта с массивом в этой зоне прикладываются только что найденные нормальные и касательные напряжения, и далее решается крайняя задача теории упругости для выработки, на контуре которой заданы смешанные статические граничные условия [13].

Неизвестный размер предельно напряжённой зоны, входящий в размеры области интегрирования, определяется методом последовательных приближений. Этот метод заключается в применении итерационной процедуры уравнивания вертикальных на-

пряжений σ_z в точке С, действующих вдоль линии АСВ (рис. 1), в предельно напряжённой зоне пласта и в его упругой области. После этого поле напряжений считается построенным.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

Исследования проведены при следующих исходных данных: $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$, $H = 450 \text{ м}$, $b = 20 \text{ м}$, $h = 3 \text{ м}$, $E = 20000 \text{ МПа}$, $\mu = 0,25$, предел прочности пласта на одноосное сжатие $\sigma_0 = 10 \text{ МПа}$, $K_{1C} = 1,66 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $b = 0,066 \text{ м}$, $\eta = 13,04 \cdot 10^{-10} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, $Q = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$, $p_0 = 32 \text{ МПа}$, $\theta_t = 30^\circ$ ($\theta_s = 60^\circ$) $\theta_t = 20^\circ$ ($\theta_s = 70^\circ$),

$\theta_t = 10^\circ$ ($\theta_s = 80^\circ$), $\theta_t = 0^\circ$ ($\theta_s = 90^\circ$), $l_s = 16 \text{ м}$.

На рис. 2 графики 1, 2 представляют собой эпюру напряжений σ_z , построенную вдоль кровли пласта (вдоль линии АСВ на рис. 1). В предельно напряжённой зоне эпюра обозначена цифрой 1, а в упругой области — 2. Из анализа эпюры следует, что максимальная величина опорного давления равна $3,07 \gamma H$, а длина предельно напряжённой зоны $L = 5,4 \text{ м}$. Горизонтальный участок предельно напряжённой зоны соответствует участку, где выполняется специальный критерий Кулона-Мора.

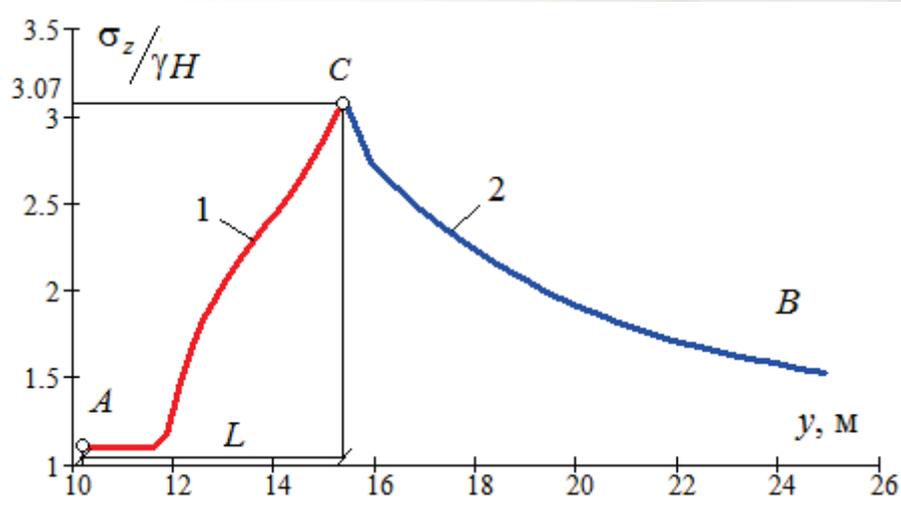


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений вдоль кровли пласта

На рис. 3–6 представлены графические результаты расчёта траекторий трещины при длине скважины l_s , равной 16 м, рабочем давлении в насосной установке $p_0 = 32 \text{ МПа}$, ряде значений угла θ_t и соответствующем числе циклов нагружения N , при которых скважина достигает либо поверхности выработки, либо слоя обрушенных пород. На этих рисунках цифрой 1 обозначена выработка, цифрой 3 — предельно напряжённая зона, 4 — слой обрушенной породы, 6 — зародышевая трещина, 5 — ветви траектории трещины. Кружками обозначены номера циклов, соответствующих росту трещины. В подрисуночных подписях указана конечная полудлина трещины гидроразрыва c_k и конечный угол наклона трещи-

ны θ_k , соответствующий последнему циклу N .

Как следует из рисунков, несмотря на значительную разницу в расположении трещины гидроразрыва и её величины угла наклона форма траектории трещины практически не меняется, а её нижняя конечная точка во всех случаях находится примерно в одном и том же месте на контуре выработки. Существенная разница сказывается лишь на количестве циклов развития трещины: чем больший наклон имеет она, тем быстрее достигает поверхности выработки.

На рис. 7 представлена траектория трещины при ориентации зародышевой трещины с отрицательным углом её наклона к горизонту (щель направлена вглубь массива).

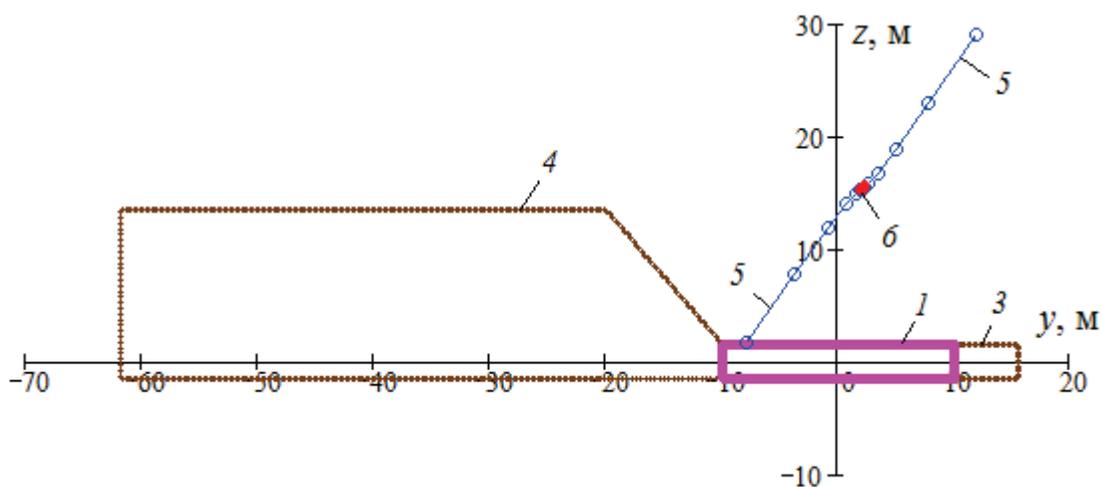


Рис. 3. Траектория трещины при $\theta_t = 30^\circ$. $N = 5$, $c_k = 16,9$ м, $\theta_k = 56^\circ$

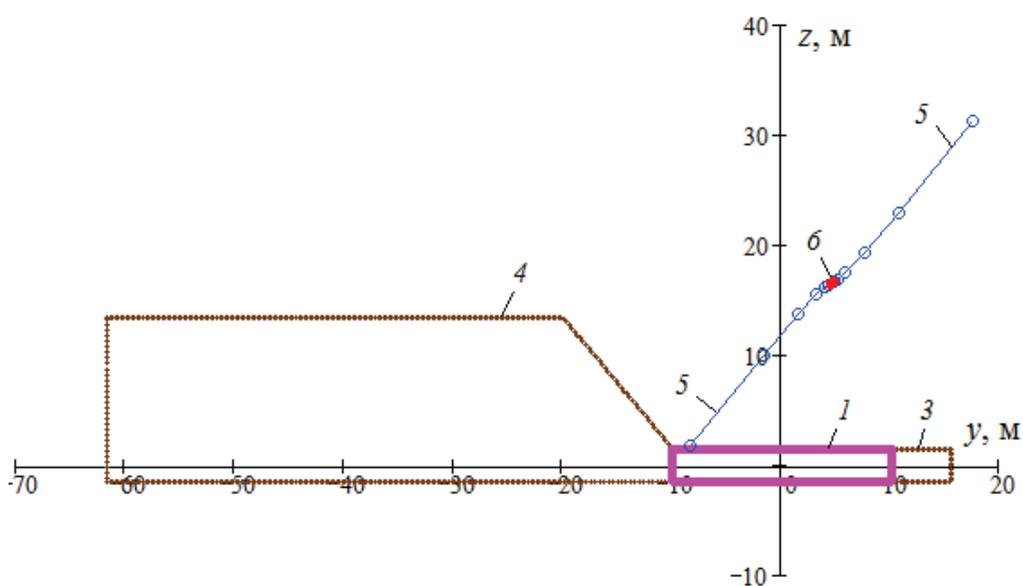


Рис. 4. Траектория трещины при $\theta_t = 20^\circ$. $N = 6$, $c_k = 19,7$ м, $\theta_k = 51,2^\circ$

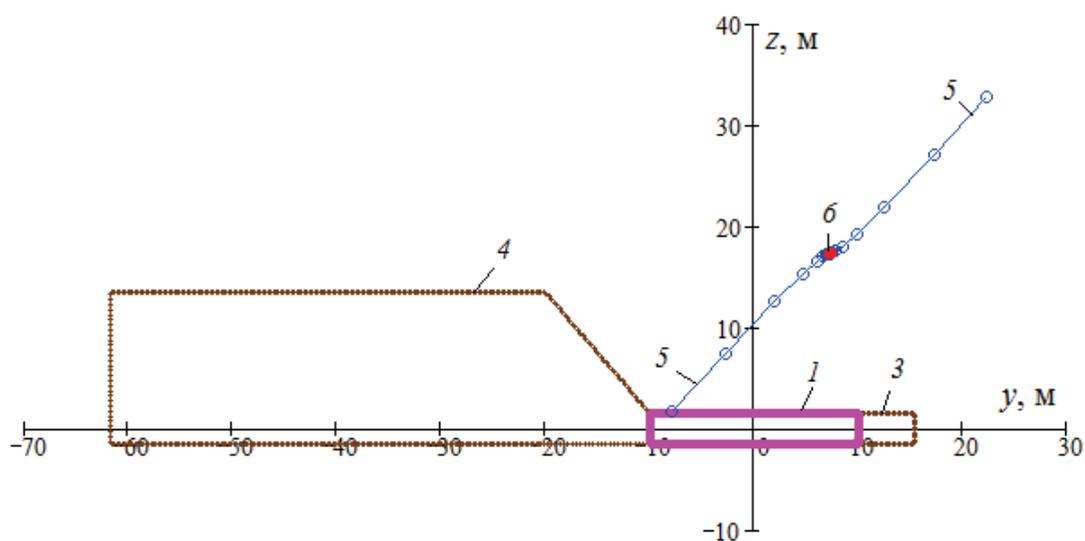


Рис. 5. Траектория трещины при $\theta_t = 10^\circ$. $N = 8$, $c_k = 21,8$ м, $\theta_k = 48,1^\circ$

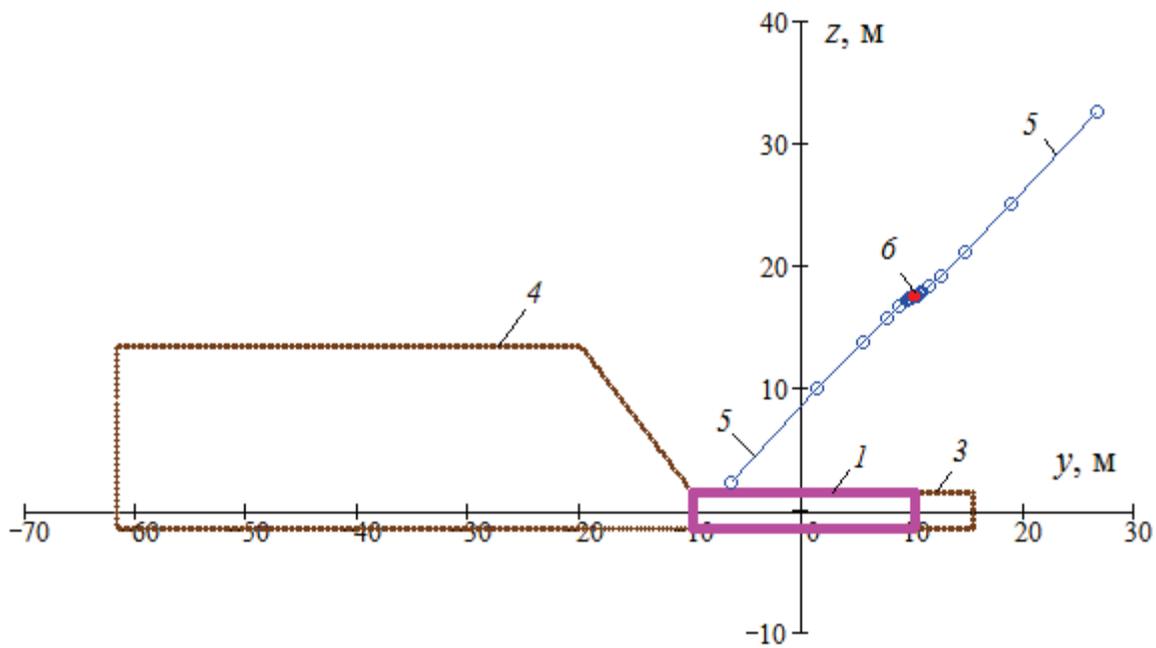


Рис. 6. Траектория трещины при $\theta_t = 0^\circ$. $N = 10$, $c_k = 22,5$ м, $\theta_k = 44,9^\circ$

Из рис. 7 следует, что в процессе своего развития трещина изменяет своё исходное направление, разворачиваясь более чем на 60° относительно своего первоначального направления. Как и в предыдущих случаях, она стремится к части поверхности выработ-

ки, расположенной у завала. Однако в этом случае для достижения своего окончательного положения ей требуется 29 циклов роста, т. е. почти в шесть раз больше, чем при наклоне зародышевой трещины, равной $+30^\circ$.

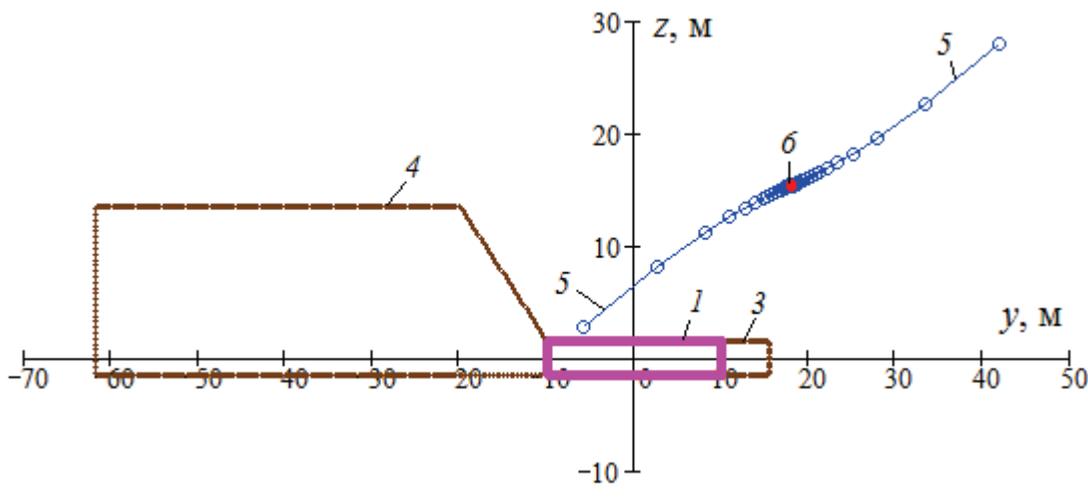


Рис. 7. Траектория трещины при $\theta_t = -30^\circ$. $N = 29$, $c_k = 27,08$ м, $\theta_k = 32,49^\circ$

Таким образом, при уменьшении угла наклона трещины, начиная от $\theta_t = +30^\circ$, конечная точка траектории практически остаётся неизменно, но при этом увеличивается число циклов роста а, следовательно, её длина.

Следует отметить, что в представленных

исходных данных отношение $p_0/\gamma H$ составляет 2,844 единицы. Как показывают результаты расчётов траектории трещины, с увеличением давления p_0 в насосной установке траектория трещины гидроразрыва уменьшает своё отклонение от направления зародышевой трещины.

Траектория трещины становится практически прямолинейной и незначительно отклоняющейся от исходного направления в том случае, если $p_0/\gamma H$ будет равно порядка 16 единиц. Такой величине соответствует $p_0 = 180$ МПа. По-видимому, насосных установок, способных создать такое давление, не существует.

Таким образом, для реализации гидроразрыва прочных боковых пород с требуемой траекторией трещины гидроразрыва следует произвести её расчёт в рамках разработанной модели скачкообразного роста трещины гидроразрыва, основные положения которой изложены в этой статье.

ВЫВОДЫ

1. Поле напряжений в окрестности очистной выработки оказывает существенное влияние на развитие трещины гидроразрыва в

прочных породах кровли пласта.

2. Угол наклона зародышевой трещины к горизонту практически не влияет на координаты конца трещины, но влияет на число циклов роста трещины до того, как она достигнет поверхности выработки.

3. Реализовать распространение трещины гидроразрыва по траектории, близкой к прямолинейной и незначительно отклоняющейся от произвольного направления зародышевой трещины в породах кровли в окрестности очистной выработки, практически невозможно. В этом случае потребовалась бы насосная установка, создающая нереально высокое давление жидкости порядка 180 МПа.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В. и др. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. 524 с.
2. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
3. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
4. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород М.: Недра, 1989. 488с.
5. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
6. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С. и др. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. 223 с.
7. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.
8. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово, 2010. 334 с.
9. Зубков В.В., Кошелев В.Ф., Линьков А.М. Численное моделирование инициирования и роста трещин гидроразрыва // ФТПРПИ. 2007. № 1. С. 45–63.
10. Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В. и др. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 312 с.
11. Теодорович Э.В., Трофимов А.А., Шумилин И.Д. Форма плоской трещины гидроразрыва в упругой непроницаемой среде при различных скоростях закачки // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 4. С. 109–118.
12. Черданцев Н.В. Расчёт параметров дисковой трещины гидроразрыва, расположенной в прочных породах кровли пласта около пластовой выработки // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 84–89.
13. Черданцев Н.В. Один из подходов к построению траектории трещины гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горной выработки // Прикладная математика и механика. 2020. № 2. С. 208–233.

14. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1984. 560 с.
15. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
16. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
17. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2-х томах. М.: Мир, 1990. Т. 1. 448 с.
18. Баклашов И.В. Основы геомеханики. М.: Моск. гос. геол. ун-т, 2004. Т. 1. 208 с.
19. Снеддон И.Н., Берри Д.С. Классическая теория упругости. М.: Физматгиз, 1961. 220 с.
20. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. 2003. № 5. С. 19–21.
21. Черданцев Н.В., Федорин В.А. Геомеханическое состояние массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности комплекса протяжённых горизонтальных выработок // Вестник КузГТУ. 2006. № 1. С. 17–19.
22. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Обоснование геомеханической модели разрушения многосвязного массива горных пород с прочностной анизотропией // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 57. С. 122–125.
23. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Геомеханическое состояние анизотропного по прочности массива горных пород в окрестности сопрягающихся выработок // ФТПРПИ. 2010. № 2. С. 62–68.
24. Черданцев Н.В. Устойчивость целиков в окрестности системы выработок, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестник КузГТУ. 2012. № 1. С. 15–19.
25. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.24.97.005

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2021

N.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

PROPAGATION OF FRACTURE OF HYDRAULIC FRACTURING IN VICINITY OF TREATMENT MINE

The problem of spreading the fracture of hydraulic fracturing in the strong rocks of the formation roof near the treatment mine is solved on the basis of previously constructed models on the geomechanical state of the carbon mass containing the treatment mine and the movement of the fracture of hydraulic fracturing propagating in the strong rocks of the coal formation roof near the formation mine.

In these models, the stress field in the carbon mass is determined from the solution of the elastoplastic problem, in which the regions of plastic deformations cover only the coal seam, and the criteria for its transition to the plastic state are two Coulomb-Mora criteria: general and special. The fracturing crack trajectory propagating in this stress field is based on Griffiths–Irwin brittle fracture mechanics dependencies.

In the course of solving the problem, it was established that the trajectory of the fracturing crack is mainly directed towards the developed space, no matter how the germ crack is oriented. To provide a rectilinear trajectory coinciding with the direction of the germ crack oriented to the massif in front of the cleaning face, a significant fluid pressure in the hydraulic system is required.

Keywords: ROCK MASSIF, TREATMENT MINE, FRACTURING CRACK, COAL BED.

REFERENCES

1. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V. and et. Safety issues and new technologies for underground mining of coal deposits. Novosibirsk: Novosibirsk Writer, 2011. 524 p. [In Russ.].
2. Fisenko G.L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
3. Borisov A.A. Mechanics of rock and arrays. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].
4. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparian E.V. Fundamentals of rock mechanics. M.: Nedra, 1989. 488 p. [In Russ.].
5. Petukhov I.M., Linkov A.M. Mechanics of rock bursts and emissions. M.: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
6. Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S. and et. Theory of Protective Layers. M.: Nedra, 1976. 223 p. [In Russ.].
7. Chernov O.I., Puzyrev V.N. Forecast of sudden coal and gas emissions. M.: Nedra, 1979. 296 p. [In Russ.].
8. Zykov V.S. Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines. Kemerovo, 2010. 334 p. [In Russ.].
9. Zubkov V.V., Koshelev V.F., Linkov A.M. Numerical modelling of hydraulic fracture initiation and development // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2019. No. 1. P. 40–56. [In Russ.].
10. Cherny S.G., Lapin V.N., Osipov D.V. and at. Methods for modeling of initiation and propagation of cracks. Novosibirsk, 2016. 312 p. [In Russ.].
11. Teodorovich E.V., Trofimov A.A., Shumilin I.D. Shape of a plane hydraulic fracture crack in an elastic impermeable medium at various injection rates // Fluid Dynamics [Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza]. 2011. Vol. 46. No. 4. P. 603–612. [In Russ.].
12. Cherdantsev N.V. Calculation of the parameters of the hydraulic fracturing disk crack located in the strong rocks of the roof of the formation near the mine working // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoemkiye tekhnologii razrabotki and uslovaniya mineralnykh resursov]. 2020. No. 6. P. 84–89. [In Russ.].
13. Cherdantsev N.V. One of the approaches to constructing the trajectory of a hydraulic fracture in a rock mass near a mine workings // Applied mathematics and mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2020. No. 2. P. 208–233. [In Russ.].
14. Sedov L.I. Continuum Mechanics. M.: Nauka, 1984. 560 p. [In Russ.].
15. Hellan K. Introduction to fracture mechanics. Norway: University of Trondheim, 1984. 376 p. [In Russ.].
16. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle destruction. M.: Nauka, 1974. 640 p. [In Russ.].
17. Murakami Y. The society of materials science. Tokio: Pergamon Books LTD, 1987. 470 p. [In Russ.].
18. Baklashov I.V. Fundamentals of geomechanics. M.: Mosk. State Geol. University, 2004. Vol. 1. 208 p. [In Russ.].
19. Sneddon I.N., Berry D.S. The classic theory of elasticity. Verlag: Springer, 1958. 238 p. [In Russ.].
20. Cherdantsev N.V. Zones of discontinuity violation in the interface area of two square cross-section workings // Bulletin KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2003. No. 5. P. 19–21. [In Russ.].
21. Cherdantsev N.V., Fedorin V.A. Geomechanical state of a rock mass with weakening surfaces in the vicinity of a complex of extended horizontal workings // Bulletin KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 1. P. 17–19. [In Russ.].

22. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Substantiation of the geomechanical model of destruction of a multi-connected rock mass with strength anisotropy // Mining information and analytical bulletin [Gorny informatsionno-analiticheskiy bulletin]. 2009. No. 57. P. 122–125. [In Russ.].

23. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Geomechanical state of a strength anisotropic rock mass in the vicinity of matig tunnels // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 143–148. [In Russ.].

24. Cherdantsev N.V. Stability of tselikov in the vicinity of a system of workings constructed in an anisotropic rock mass with respect to strength // Bulletin KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2012. No. 1. P. 15–19. [In Russ.].

25. Sokolovsky V.V. Loose Medium Statics. M.: Nauka, 1990. 272 p. [In Russ.].