

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.70.11.003

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



РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ПРОЧНЫХ ПОРОДАХ КРОВЛИ ПЛАСТА ОКОЛО ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ С БОЛЬШИМ ПРОЛЁТОМ

Исследования о распространении трещины гидроразрыва в прочных породах кровли пласта в окрестности очистной выработки произведены в рамках ранее построенных моделей о геомеханическом состоянии угленородного массива, вмещающего выработку и скачкообразно растущую трещину гидроразрыва.

В основе этих моделей лежат фундаментальные методы теории упругости в форме потенциалов и методы граничных интегральных уравнений для построения поля напряжений; общий и специальный критерии Кулона – Мора для оценки перехода в предельное состояние горных пород и сыпучих сред; методы механики хрупкого разрушения Гриффитса – Ирвина для построения траектории трещины гидроразрыва.

Реализация моделей осуществлена посредством ряда разработанных алгоритмов и специально составленных программ.

В ходе широкомасштабного вычислительного эксперимента, проведённого для ряда горно-геологических и горнотехнических параметров, получен обширный объём результатов.

Посредством анализа этих результатов установлен ряд закономерностей и особенностей в поведении трещины гидроразрыва в зависимости от ориентации скважины, из которой создаётся иницирующая трещина, относительно очистной выработки с большой площадью обнажения выработанного пространства.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Способ принудительного обрушения прочной кровли угольного пласта при очистных работах, по-видимому, наиболее эффективен по сравнению с другими способами [1]. В этой связи для его более широкого применения важно научное обоснование. По этому поводу следует отметить ряд работ, в которых авторы

исследуют поведение трещины гидроразрыва в массиве горных пород в окрестности одиночной скважины (без учёта горной выработки), используя фундаментальные методы механики деформируемого твёрдого тела и гидродинамики [2–4].

В настоящей статье представлен комплекс новых результатов исследований поведения трещины гидроразрыва в окрестности ведения очистных работ, начало которым было положено в работе [5].

Расчётная схема массива к данной задаче показана на рис. 1. В массиве горных пород на глубине H по угольному пласту 1 мощностью t проводится очистная выработка 2, подкреплённая механизированной крепью 3, высотой h и пролётом b . В кровле и почве пласта лежат прочные породы 4. Массив нагружен равнокомпонентным гравитационным давлени-

ем γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород).

Впереди выработки краевая часть угольного пласта шириной L_p находится в предельно напряжённом состоянии. Позади выработки образуется слой 5 обвалившихся сверху пород массива, который является опорой для всей налегающей сверху толщи пород 6.

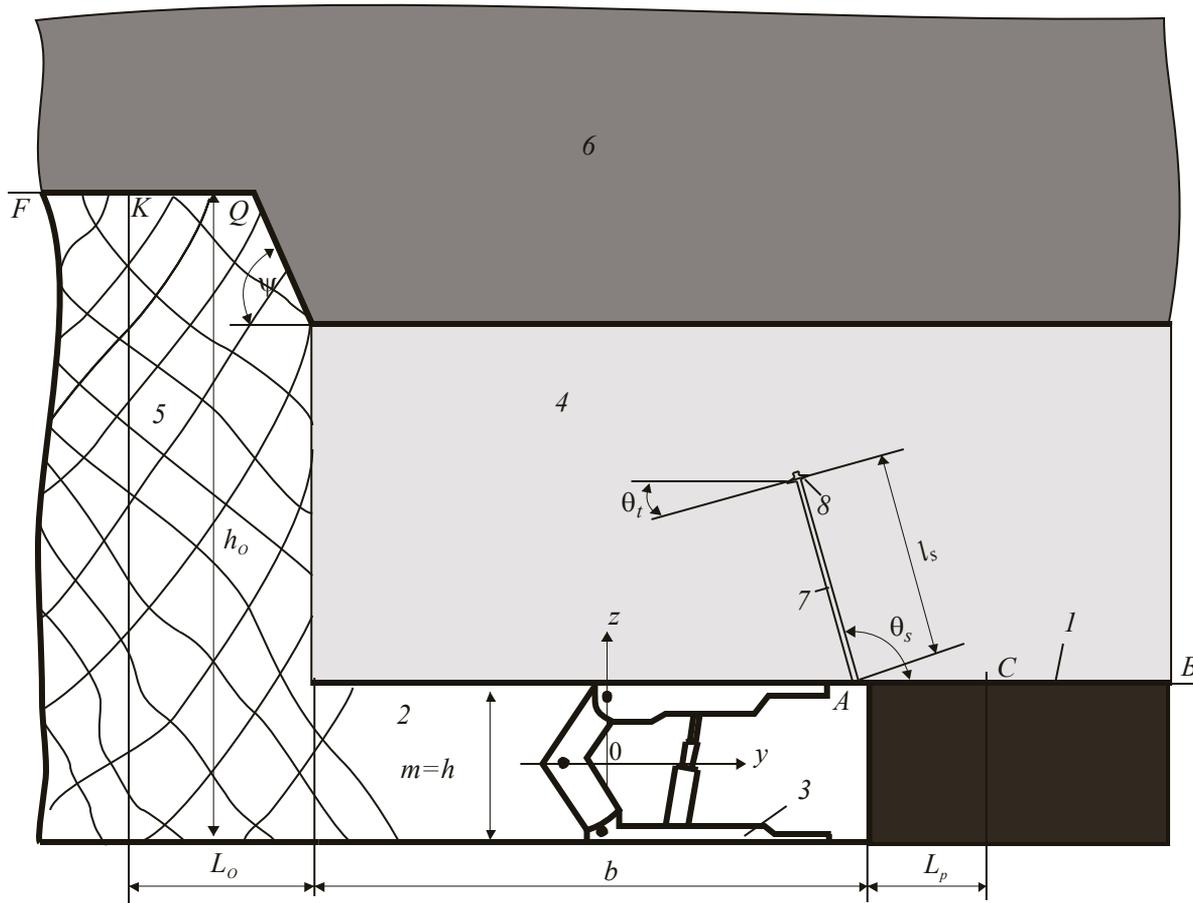


Рис. 1. Схема очистной выработки и скважины гидроразрыва

Из забоя выработки под углом к горизонту θ_s в прочные породы кровли бурится скважина 7 длиной l_s . Из неё щелеобразователем создаётся дисковая зародышевая трещина (щель) 8 радиусом a_z . Она наклонена к горизонту на угол θ_t и нагружается давлением p . Её координаты y_t, z_t в системе yOz , совмещённой с центральными осями выработки. Очевидно, что геометрические параметры щели связаны с параметрами скважины следующими соотношениями:

$$y_t = \frac{b}{2} + l_s \cos \theta_s, \quad z_t = \frac{h}{2} + l_s \sin \theta_s,$$

$$\theta_t = \theta_s - 90^\circ.$$

Принято, что размеры выработки вдоль абсциссы x (направлено перпендикулярно плоскости чертежа) значительно превосходят размеры в плоскости Oyz ; трещина гидроразрыва в процессе роста не изменяет поля напряжений в массиве горных пород; фильтрация жидкости не учитывается.

Задача решается в рамках ранее построенных и используемых моделей геомеханического состояния анизотропного массива, вмещающего как не пластовые выработки [6–8],

так и пластовые типа штрековых и очистных выработок [9, 10], а также трещину гидроразрыва, распространяющуюся около пластовой выработки [11, 12].

В основе модели о распространении гидротрещины лежат основные положения механики хрупкого разрушения, разработанной Гриффитсом и развитой Ирвиным [13–17]. Согласно этим положениям разрушение материала происходит в результате распространения одной или нескольких трещин. Трещина развивается в том случае, если суммарный коэффициент интенсивности напряжений на кончике трещины от всех возможных типов нагружения на её берегах превысит некоторую критическую величину K_{1C} , называемую коэффициентом трещиностойкости материала. Её справочное значение для ряда горных пород приведено в [17].

Величины нагрузок на берегах трещины определяются полем напряжений вмещающего массива, в котором распространяется трещина. Поскольку её рост происходит в прочных породах, то очевидно, что эти породы находятся в упругом состоянии. В этой связи для построения поля напряжений необходимо решить вторую внешнюю краевую задачу теории упругости, которая формулируется как задача о напряжённом состоянии бесконечной среды, вмещающей вырез и нагруженной на её границе гравитационной нагрузкой, равной нагрузке на глубине заложения выработки. Эта задача с помощью потенциала простого слоя и статических граничных условий приводится к сингулярному интегральному уравнению Фредгольма второго рода и решается методом граничных элементов [18, 19].

Задача построения поля напряжений в окрестности пластовой (штрековой) выработки более сложная, чем около выработки, пройденной в изотропной упругой среде, поскольку краевая часть пласта находится в предельно напряжённом (пластическом) состоянии. В этом случае для построения поля напряжений в окружающем массиве необходимо прежде получить картину распределения напряжений в предельно напряжённой зоне пласта, а затем решать упругопластическую задачу.

Механизм формирования предельно напряжённых зон подробно изложен в работе [20, 21]. В этих зонах напряжения определяются путём совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и двух критериев предельного состояния Кулона – Мора (общего и специального) [22]. Общий критерий относится непосредственно к пласту, а специальный критерий формулируется в точках, принадлежащих только контакту пласта с массивом. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений относится к классу уравнений гиперболического типа и решается методом характеристик для трёх краевых задач предельного состояния пласта [22].

После нахождения напряжений в предельно напряжённой зоне пласта решается упругопластическая задача, из которой определяются параметры опорного давления (максимум вертикальных нормальных напряжений и ширина предельно напряжённой зоны). Для этой цели предельно напряжённая зона заменяется напряжениями, действующими на контакте пласта и массива, и далее решается краевая задача теории упругости для выработки, на контуре которой заданы смешанные статические граничные условия, часть из которых задаётся на поверхности выработки, а часть на контакте пласта с окружающим массивом [9, 11].

Неизвестный размер предельно напряжённой зоны, входящий в размеры области интегрирования, определяется методом последовательных приближений. Этот метод заключается в применении итерационной процедуры уравнивания вертикальных напряжений σ_z в точке C , действующих вдоль линии ACB (рис. 1), в предельно напряжённой зоне пласта и в его упругой области. После этого поле напряжений считается построенным [9–11].

Отличительной особенностью задачи о распространении трещины гидроразрыва в окрестности очистной выработки является наличие слоя обрушенных пород. Это обстоятельство, существенно влияющее на распределение поля напряжений в углепородном массиве, необходимо учитывать при построении модели его геомеханического состояния.

В данной задаче обрушенные породы считаются сыпучей средой, причём, часть слоя левее точки K размером L_0 (рис. 1) находится в предельно напряжённой зоне, а другая часть, левее точки K , деформируется упруго. Ψ — угол сдвига горных пород в зоне ведения очистных работ принят равным 50° [20]. Углы внутреннего трения слоя обрушенных пород и на их контакте с окружающим массивом приняты одинаковыми и равными 25° , а коэффициент разрыхления составляет 1,2 единицы [20]. Высота этого слоя h_0 определяется из соображения полного подбучивания налегающих на него пород [20]. Параметры опорного давления в предельно напряжённой зоне слоя, как и в предельно напряжённой зоне пласта, определяются в ходе итерационной процедуры уравнивания вертикальных напряжений в точке K вдоль контакта слоя с окружающим массивом QKF [5, 10].

В ходе проведения широкомасштабного вычислительного эксперимента построены траектории трещины гидроразрыва в нескольких вариантах: зародышевая трещина создавалась щелеобразователем из скважины, пробуренной непосредственно в забое очистной выработки, скважина с зародышевой трещиной располагалась в ряде сечений подготовительной выработки (конвейерного либо вентиляционного штреков) по направлению движения очистного забоя. Ось скважины ориентирована в вертикальной плоскости, в которой лежит ось (трасса) выработки и, следовательно, она перпендикулярна горизонтальной оси поперечного сечения выработки.

Рациональными параметрами зародышевой трещины считаются параметры, при которых траектория гидротрещины, во-первых, близка к прямой линии, во-вторых, трещина в своём развитии достигает проектных параметров при минимальном количестве циклов нагружения, а, следовательно, и расходе жидкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

Основными характеристиками прочности угольного пласта считаются следующие параметры: 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.

Исследования проведены при следующих исходных данных: $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$, $H = 450 \text{ м}$, $\lambda = 1$, $b = 50 \text{ м}$, $h = 3 \text{ м}$, $E = 20000 \text{ МПа}$, $\mu = 0,25$, предел прочности пласта на одноосное сжатие $\sigma_0 = 10 \text{ МПа}$, $K = K' = 0$, $\rho = 20^\circ$, $\rho' = 10^\circ$, $K_{IC} = 1.66 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $a_z = 0,066 \text{ м}$; динамическая вязкость жидкости $\eta = 13,04 \cdot 10^{-10} \text{ МПа} \cdot \text{с}$, $\theta_t = -30^\circ$ ($\theta_s = 60^\circ$), $\theta_t = 0^\circ$ ($\theta_s = 90^\circ$), $\theta_t = 30^\circ$ ($\theta_s = 120^\circ$), $l_s = 16 \text{ м}$.

Рабочее давление p_0 в насосной установке марки Т — 210/35 принято 32 МПа , а расход жидкости 210 литр/мин ($Q = 0,0035 \text{ м}^3/\text{с}$). Эта установка относится к классу установок с жёсткими рабочими характеристиками, в которых при постоянном расходе давление может меняться.

На рис. 2 графики 1, 2 представляют собой эпюру напряжений σ_z , построенную вдоль кровли пласта (вдоль линии ACB на рис. 1). В предельно напряжённой зоне эпюра обозначена цифрой 1, а в упругой области цифрой 2. Из анализа эпюры следует, что максимальная величина опорного давления равна $3,454 \gamma H$, а размер предельно напряжённой зоны $L_p = 6,15 \text{ м}$. Горизонтальный участок на графике 1 соответствует участку, где выполняется специальный критерий Кулона – Мора.

На рис. 3 графики 1, 2 представляют собой эпюру напряжений σ_z , построенную вдоль кровли слоя обрушенных пород (вдоль линии QKF на рис. 1). Здесь также эпюра в предельно напряжённой зоне обозначена цифрой 1, а в упругой области цифрой 2. Из эпюры следует, что максимальная величина опорного давления равна $2,452 \gamma H$, а длина предельно напряжённой зоны $L_0 = 42,4 \text{ м}$. В предельно напряжённой зоне слоя эпюра напряжений изменяется по экспоненциальному закону.

Как следует из рисунков, опорное давление позади очистной выработки принимает достаточно большое значение, а предельно напряжённая зона более, чем в шесть раз превышает предельную зону в краевой части пласта.

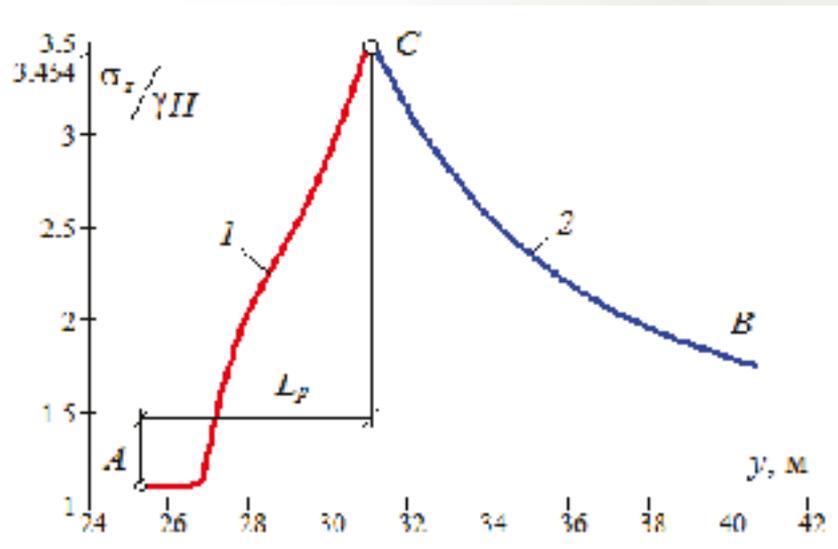


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений вдоль кровли пласта

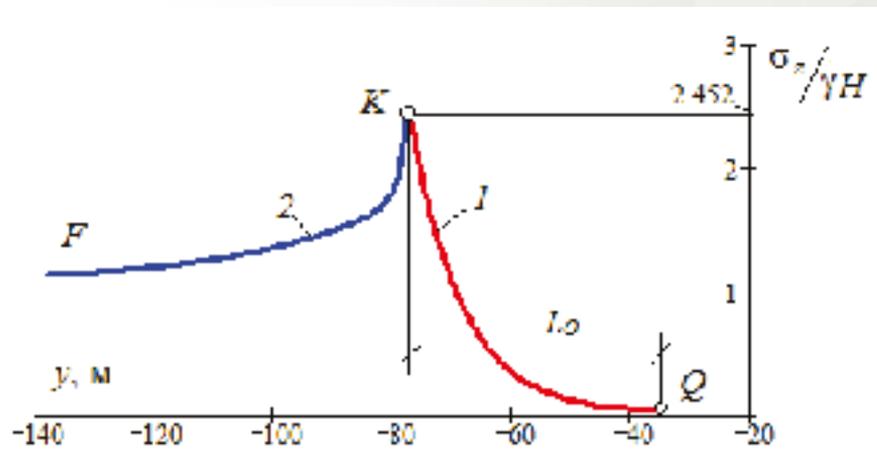


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений вдоль кровли слоя обрушенных пород

На рис. 4–6 построены траектории гидротрещины, распространяющейся в кровле пласта, зародышевая трещина которой расположена вблизи забоя выработки. В подрисуночных подписях указаны результаты расчётов параметров трещины. θ_k — угол наклона кон-

цевого сечения трещины к горизонту, а a — конечная полудлина трещины, N — количество циклов нагружения трещины при достижении конечной длины. Как и в [5, 11] кружки на рисунках обозначают циклы нагружения, ρ — ветви траектории гидротрещины.

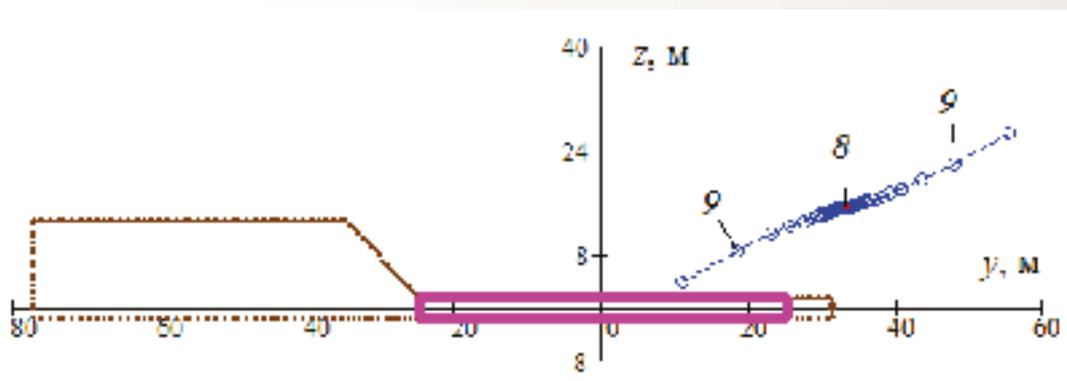


Рис. 4. Траектория трещины при $\theta_l = -30^\circ$, $\theta_k = 32,41^\circ$, $a = 25,12$ м, $N = 37$

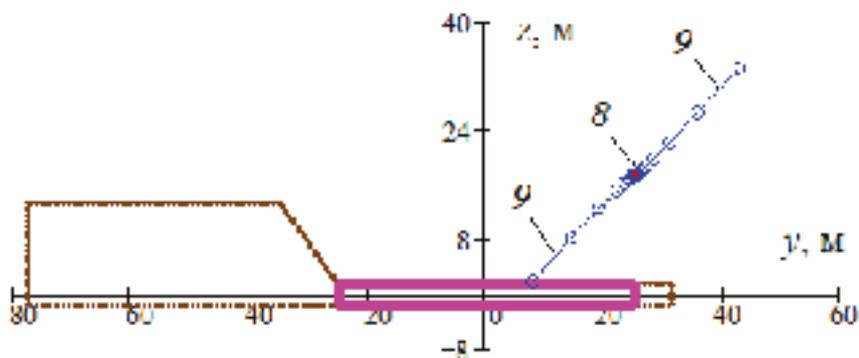


Рис. 5. Траектория трещины при $\theta_i = 0^\circ$, $\theta_k = 43,22^\circ$, $a = 23,31$ м, $N = 11$

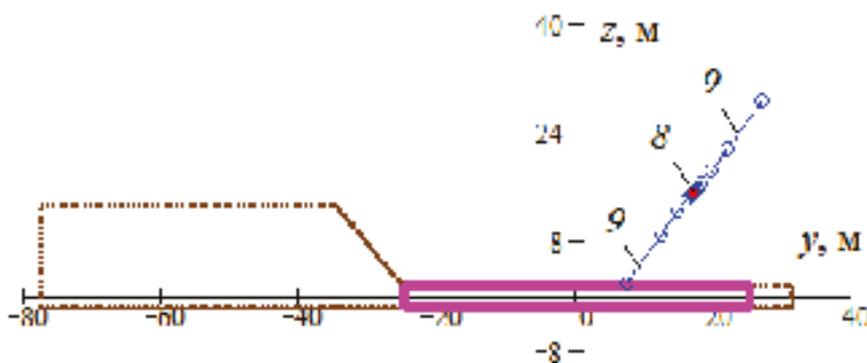


Рис. 6. Траектория трещины при $\theta_i = 30^\circ$, $\theta_k = 55,58^\circ$, $a = 16,62$ м, $N = 6$

Из анализа рисунков следует. Во-первых, абсциссы конечных сечений гидротрещины, расположенные на поверхности выработки, близки друг к другу, т. е. трещина во всех трёх вариантах приходит к поверхности выработки примерно в одно и то же место. Как показывают результаты расчётов, при других наклонах зародышевой трещины конечные сечения гидротрещины окажутся примерно в тех же местах на поверхности выработки. Во-вторых, при $\theta_i = -30^\circ$, когда зародышевая трещина расположена впереди очистного забоя, направление гидротрещины не совпадает с направлением зародышевой трещины. Её направление на поверхности выработки составляет угол $\theta_k = 32,41^\circ$, т. е. в процессе развития трещина поворачивается по отношению к первоначальному направлению на угол $62,41^\circ$ ($\theta_k - \theta_i$), причём большая часть разворота трещины приходится на первые несколько циклов. После этого форма траектория очень близка к пологой кривой, которая уже незначительно изменяет своё направление. Во втором варианте с гори-

зонтальной зародышевой трещиной разворот конца трещины составляет $43,22^\circ$. В варианте с наклонным расположением зародышевой трещины в пределах выработанного пространства разворот трещины равен $25,58^\circ$. В-третьих, в первом варианте трещина достигает поверхности выработки за $N = 37$ циклов нагружения трещины или скачков её роста. Полудлина трещины при этом составляет 25,12 м, а средняя длина (удельная длина), приходящаяся на один цикл, составляет 0,679 м/цикл. Во втором варианте трещина достигает поверхности выработки за одиннадцать циклов, и её удельная длина составляет 2,119 м/цикл. В третьем варианте число циклов развития трещины равно шести и, следовательно, её удельная длина равна 2,77 м/цикл.

На рис. 7–18 построены траектории гидротрещины, распространяющейся в кровле пласта вдоль трассы очистной выработки.

На рис. 7–9 построены траектории трещины гидроразрыва, когда расстояние по горизонтали от зародышевой трещины до кромки

пласта (очистного забоя) составляет $d = 20$ м. Следует отметить, во-первых, несмотря на различный угол наклона зародышевой трещины к горизонту во всех трёх вариантах, траектория гидротрещины практически горизонтальна. Однако, как показывают результаты расчётов, при увеличении числа циклов трещина существенно меняет направления, стремясь левой ветвью достичь поверхности выработки. Во-вторых, даже при значительном числе циклов роста трещины её длина

во всех вариантах почти одинакова, но незначительна по сравнению с вариантами на рис. 4–6. По-видимому, такое своеобразное развитие трещины в непосредственной близости к очистному забою связано со значительными напряжениями, обусловленными близким расположением максимума опорного давления, которые существенно влияют на характер и размеры трещины гидроразрыва, создавая сложности в реализации гидроразрыва.

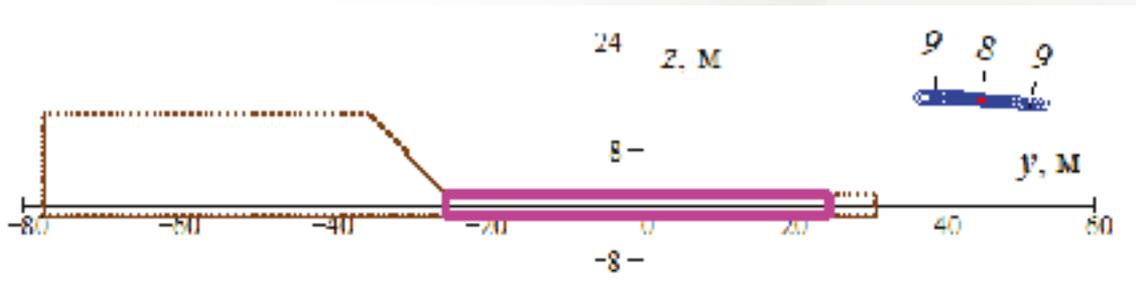


Рис. 7. Траектория трещины при $\theta_t = -30^\circ$, $\theta_k = 0,61^\circ$, $a = 8,11$ м, $N = 47$

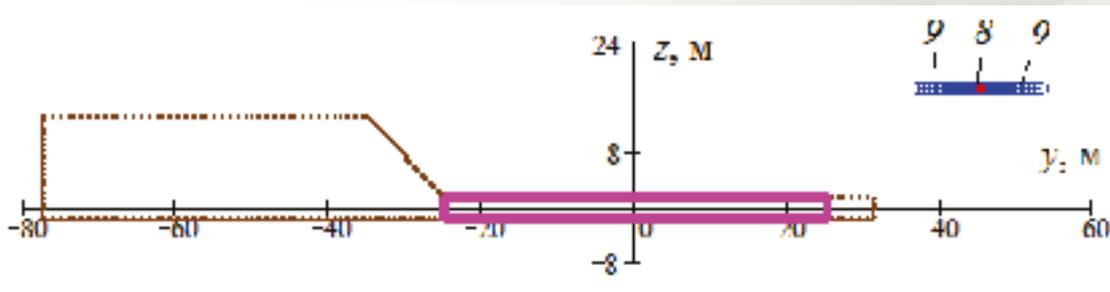


Рис. 8. Траектория трещины при $\theta_t = 0^\circ$, $\theta_k = 3,16^\circ$, $a = 8,13$ м, $N = 47$

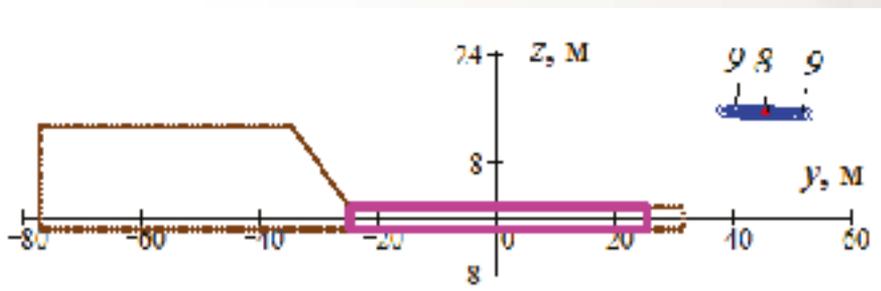


Рис. 9. Траектория трещины при $\theta_t = 30^\circ$, $\theta_k = -0,47^\circ$, $a = 7,09$ м, $N = 47$

На рис. 10–12 представлены траектории гидротрещины, когда зародышевая трещина удалена по горизонтали от забоя очистной выработки на расстояние $d = 50$ м. Как следует из рисунков, из всех трёх вариантов рас-

положения зародышевой трещины наиболее предпочтительным является вариант, когда трещина наклонена к горизонту на угол минус тридцать градусов. В этом случае гидротрещина развивается практически прямолиней-

но и её направления совпадает с направлением зародышевой трещины, а конечная длина самая большая из всех трёх вариантов. Наименее удачный вариант — наклон зародышевой трещины против часовой стрелки на угол плюс тридцать градусов. В этом варианте трещина гидроразрыва значительно отклоняется от направления зародышевой трещины, а её конечная длина минимальна.

На рис. 13–15 представлены картины с траекториями трещины гидроразрыва, распространяющейся от зародышевой трещины, расположенной на расстоянии 100 м по гори-

зонтالي от кромки пласта. Во всех вариантах число циклов нагружения гидротрещины в процессе её роста одинаково и составляет 28 циклов. Как следует из результатов расчёта траектории, приведённых в подрисуночных подписях, гидротрещина во всех вариантах поворачивается по часовой стрелке на угол порядка 10° относительно положения зародышевой трещины, в том числе и расположенной горизонтально. Наиболее же удачный из этих трёх вариантов является вариант с наклоном зародышевой трещины на угол минус 30 градусов. В этом варианте трещина имеет наибольшую длину.

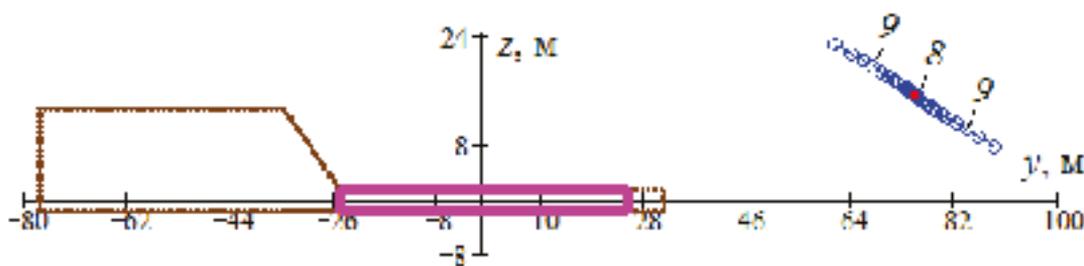


Рис. 10. Траектория трещины при $\theta_i = -30^\circ$, $\theta_k = -26,38^\circ$, $a = 15,77$ м, $N = 28$

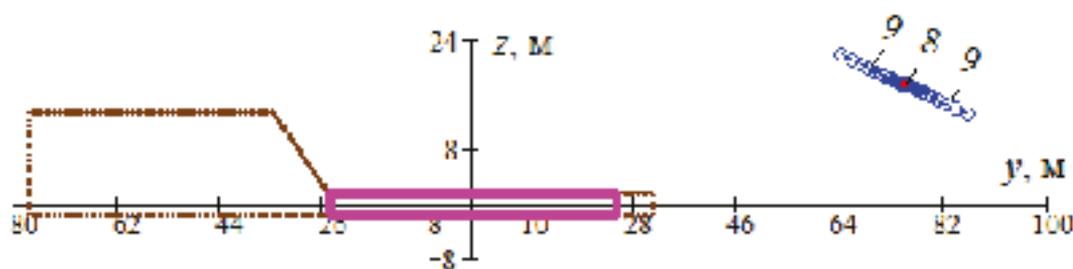


Рис. 11. Траектория трещины при $\theta_i = 0^\circ$, $\theta_k = -21,77^\circ$, $a = 11,95$ м, $N = 28$

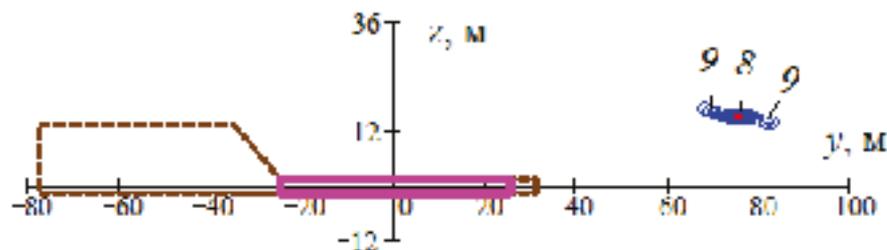


Рис. 12. Траектория трещины при $\theta_i = 30^\circ$, $\theta_k = -18,19^\circ$, $a = 9,61$ м, $N = 28$

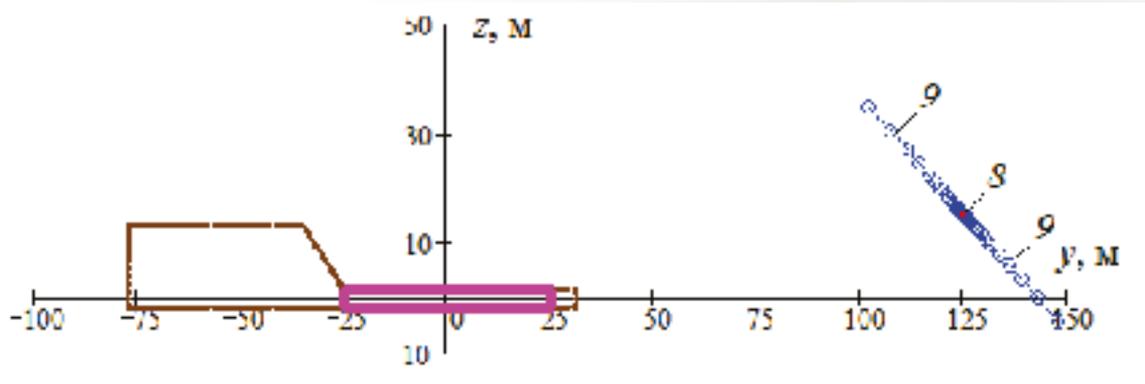


Рис. 13. Траектория трещины при $\theta_t = -30^\circ$, $\theta_k = -40,57^\circ$, $a = 30,19$ м, $N = 28$

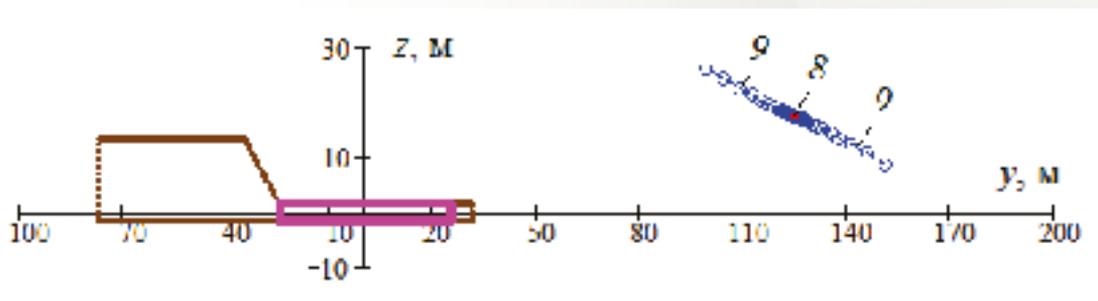


Рис. 14. Траектория трещины при $\theta_t = 0^\circ$, $\theta_k = -20,22^\circ$, $a = 27,76$ м, $N = 28$

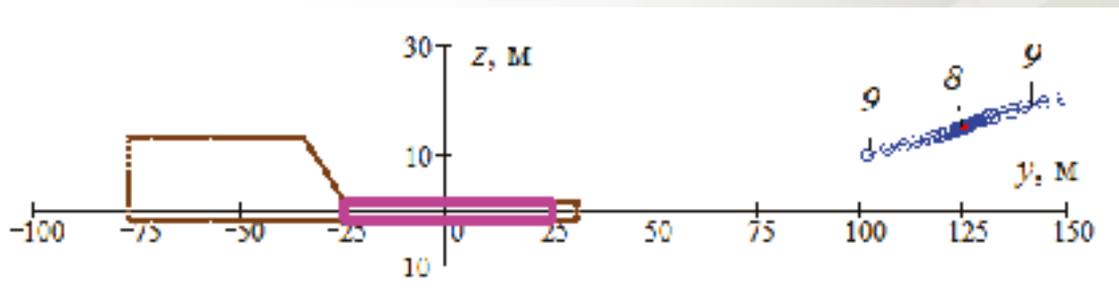


Рис. 15. Траектория трещины при $\theta_t = 30^\circ$, $\theta_k = 10,28^\circ$, $a = 24,31$ м, $N = 28$

На рис. 16–18 траектории трещины построены на достаточно большом расстоянии зародышевой трещины от забоя очистной выработки, составляющем 200 м. Из анализа результатов следует, что гидротрещина в процессе роста во всех трёх вариантах угла наклона зародышевой трещины поворачивается по ходу часовой стрелки. Видно, что гидротрещина, инициируемая горизонтально ориентированной зародышевой трещиной, распространяется не горизонтально, а поворачивается на небольшой угол, составляющий $-13,59^\circ$. Её конечная длина превышает размеры трещин в двух других вариантах. Сравнение траекторий

трещин гидроразрыва, развивающихся около зародышевых трещин с наклоном 30° и -30° , показывает, что длины этих трещин хотя и близки друг к другу, но характер их различен. Так, например, если трещина при $\theta_t = -30^\circ$ в конечном сечении ещё больше поворачивается, то трещина при $\theta_t = 30^\circ$, наоборот, уменьшает угол поворота зародышевой трещины. С этой точки зрения трещина с $\theta_t = -30^\circ$ более рациональна, поскольку при равных условиях она раньше достигает поверхности выработки и, следовательно, быстрее отсечёт слой кровли пласта, чем трещина при $\theta_t = 30^\circ$.

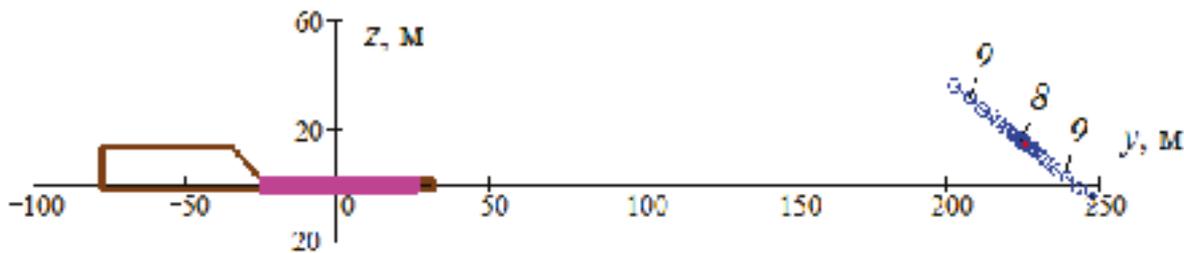


Рис. 16. Траектория трещины при $\theta_t = -30^\circ$, $\theta_k = -43,47^\circ$, $a = 40,35$ м, $N = 28$

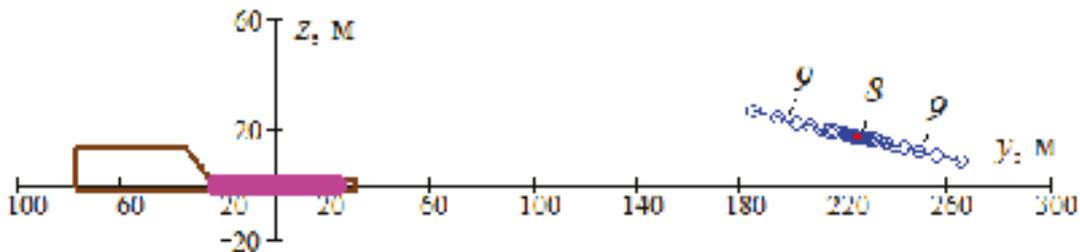


Рис. 17. Траектория трещины при $\theta_t = 0^\circ$, $\theta_k = -13,59^\circ$, $a = 41$ м, $N = 28$

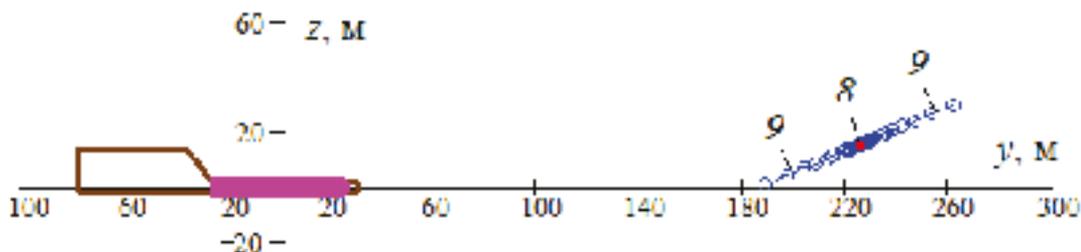


Рис. 18. Траектория трещины при $\theta_t = 30^\circ$, $\theta_k = 21,72^\circ$, $a = 39$ м, $N = 28$

На рис. 19, 20 представлены графики изменения параметров гидротрещины в зависимости от её положения относительно забоя

очистной выработки. Цифрами 1–3 обозначены графики, построенные при $\theta_t = -30^\circ$, $\theta_t = 0^\circ$, $\theta_t = 30^\circ$, соответственно.

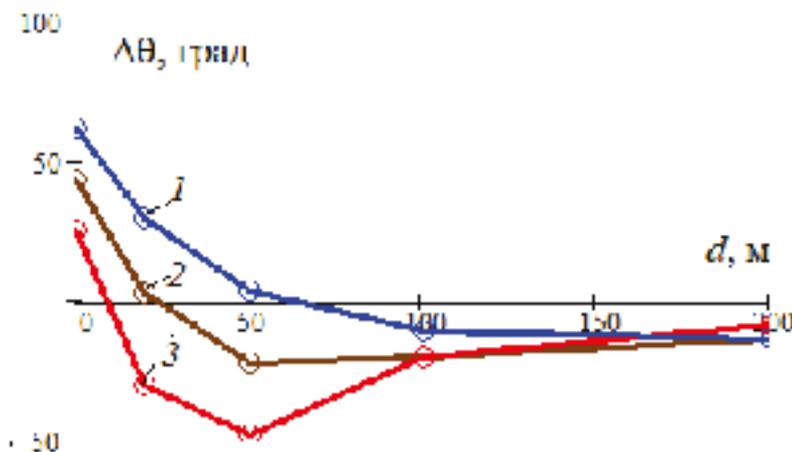


Рис. 19. Графики изменения угла наклона гидротрещины в зависимости от расстояния до кромки пласта для ряда значений угла наклона зародышевой трещины

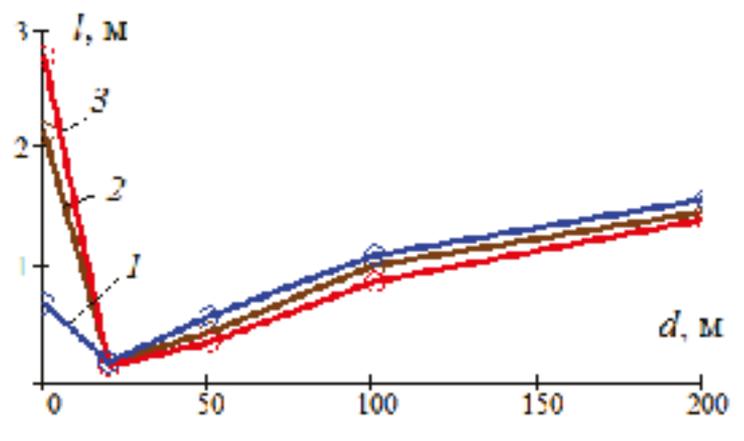


Рис. 20. Графики зависимости удельной длины l трёх гидротрещин от расстояния до кромки пласта для трёх углов наклона зародышевой трещины

Из представленных рисунков видно, что графики изменения угла наклона трещины гидроразрыва, а также её длины в двух последних примерах очень близки друг к другу. Следует отметить, что основные изменения в параметрах гидротрещины происходят на участке пласта впереди очистной выработки на расстоянии порядка ста метров. По мере удаления зародышевой трещины от забоя выработки параметры гидротрещины стабилизируются и меняются незначительно. Таким образом, существенное влияние очистной выработки на параметры гидротрещины сказывается на расстоянии порядка 100 м. Однако результаты расчётов показывают, что влияние очистной выработки на параметры гидротрещины сказывается и на более значительном удалении зародышевой выработки от её забоя, хотя это влияние и меньше.

Для сравнения полудлина зародышевой трещины в нетронутом горными работами породном массиве на той же глубине и при 28 циклах нагружения получается равной 47,515 м (удельная длина составляет 1,697 м). Таким образом, трещина гидроразрыва, распространяющаяся в окрестности очистной выработки имеет большую удельную, чем одиночная гидротрещина, если она инициирована из скважины, пробуренной из забоя выработки и наклонённой к горизонту на угол более девяноста градусов. В этом случае зародышевая трещина находится строго над

выработанным пространством, где уровень напряжений ниже, чем в глубине массива.

ВЫВОДЫ

1. Поле напряжений и ориентация зародышевой трещины в непосредственной окрестности очистной выработки оказывают существенное влияние на развитие трещины гидроразрыва в прочных породах кровли пласта.

2. Растущая трещина гидроразрыва, инициирующая (зародышевая) трещина которой образована щелеобразователем из шестнадцатиметровой скважины, расположенной в различных местах вдоль трассы очистной выработки и наклоненной к горизонту под углами 60° (наклон в сторону движения выработки), 90° (скважина пробурена вертикально) и 120° градусов (наклон в сторону выработанного пространства), характеризуется следующим:

1). Зародышевая трещина, расположенная над выработанным пространством (угол наклона скважины к горизонту более 90°), обеспечивает достаточно быстрое распространение гидротрещины в породах кровли пласта по сравнению с расположением её впереди очистного забоя.

2). В окрестности очистной выработки трещина гидроразрыва распространяется менее интенсивно, а её конечная длина меньше, чем у гидротрещины, движущейся в массиве горных пород вдали от ведения очистных ра-

бот (в нетронутом массиве). Наименее рациональное расположение зародышевой трещины находится в непосредственной близости от максимума опорного давления (около 20 м вглубь массива).

3). На значительном удалении зародышевой трещины от очистного забоя её влияние уменьшается, однако даже на расстоянии 200 м оно остаётся заметным.

4). Трещина гидроразрыва, развиваемая из скважины, пробуренной из очистного забоя, в процессе роста увеличивает угол наклона к горизонту (трещина поворачивается против часовой стрелки) по отношению к ориентации зародышевой трещины. Растущая же трещина гидроразрыва, расположенная вдоль трассы выработки впереди очистного забоя,

отклоняется по часовой стрелке, уменьшая угол наклона зародышевой трещины.

3. Обеспечить траекторию трещины гидроразрыва, близкую к прямолинейной форме и незначительно отклоняющуюся от направления зародышевой трещины в породах кровли пласта в окрестности очистной выработки возможно, но только в том случае, если зародышевая трещина расположена на достаточно большом расстоянии от забоя выработки. В противном случае гидротрещина значительно отклоняется от первоначального направления.

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, 2011. 524 с.
2. Зубков В.В., Кошелев В.Ф., Линьков А.М. Численное моделирование инициирования и роста трещин гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 1. С. 45–63.
3. Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В. и др. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. Новосибирск, 2016. 312 с.
4. 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.
5. Черданцев Н.В. Распространение трещины гидроразрыва в окрестности очистной выработки // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. № 2. С. 38–47.
6. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. 2003. № 5. С. 19–21.
7. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. О влиянии предварительно обжатой пружины на зону нарушения сплошности вокруг цилиндрической полости // Прикладная механика и техническая физика. 2005. № 3. С. 141–148.
8. Черданцев Н.В. Устойчивость целиков в окрестности системы выработок, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестник КузГТУ. 2012. № 1. С. 15–19.
9. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Анализ состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение // Механика твёрдого тела. 2018. № 2. С. 110–121.
10. Черданцев Н.В. Об одном варианте расчёта напряжённого состояния пласта, обрабатываемого очистной выработкой // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 8. С. 23–28.
11. 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.
12. Черданцев Н.В. Анализ траектории трещины гидроразрыва около пластовой выработ-

ки и условия её прямолинейного роста // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 5. С. 18–23.

13. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1984. 560 с.

14. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.

15. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

16. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2-х томах. Т. 1. М.: Мир, 1990. 448 с.

17. Баклашов И.В. Основы геомеханики. Т. 1. М., 2004. 208 с.

18. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.

19. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.

20. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.

21. Черданцев Н.В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 7–13.

22. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.70.11.003

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

RESULTS OF CALCULATION OF FRACTURE PARAMETERS OF HYDRAULIC FRACTURING PROPAGATING IN STRONG ROCKS OF FORMATION ROOF NEAR TREATMENT MINE WITH LARGE SPAN

Studies on the propagation of fracture of hydraulic fracturing in the strong rocks of the formation roof in the vicinity of the treatment mine were carried out as part of previously constructed models on the geomechanical state of the carbon mass containing the production and surging fracture of hydraulic fracturing.

These models are based on fundamental methods of elastic theory in the form of potentials and methods of boundary integral equations for constructing a stress field; general and special Coulomb–Mora criteria to assess the transition to the limit state of rocks and bulk media; Griffiths–Irwin brittle fracture mechanics to construct a fracturing crack trajectory.

The implementation of the models was carried out through a number of developed algorithms and specially compiled programs.

During a large-scale computational experiment conducted for a number of mining-geological and mining parameters, an extensive amount of results was obtained.

By analyzing these results, a number of patterns and features in the behavior of the fracturing crack are established depending on the orientation of the well from which the initiating crack is created, relative to a treatment mine with a large area of exposure of the developed space.

Keywords: ROCK MASS, MINING, FRACTURING CRACK, COAL BED.

REFERENCES

1. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V. and other Safety problems and new technologies for underground mining of coal deposits. Novosibirsk, 2011. 524 p. [In Russ.].
2. Zubkov V.V., Koshelev V.F., Linkov A.M. Numerical modeling of initiation and growth of hydraulic fracturing cracks // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 2007. No. 1. P. 45–63. [In Russ.].
3. Cherny S.G., Lapin V.N., Esipov D.V. and other Methods for modeling the initiation and propagation of cracks. Novosibirsk, 2016. 312 p. [In Russ.].
4. Teodorovich E.V., Trofimov A.A., Shumilin I.D. The shape of a plane hydraulic fracture in an elastic impermeable medium at different injection rates // Bulletin RAS. Mechanics of liquid and gas [Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza]. 2011. No. 4. P. 109–118. [In Russ.].
5. Cherdantsev N.V. Propagation of a hydraulic fracture crack in the vicinity of a working mine // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2021. No. 2. P. 38–47. [In Russ.].
6. Cherdantsev N.V. Zones of discontinuity in the area of conjugation of two workings of a square cross-section // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2003. No. 5. P. 19–21. [In Russ.].
7. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. On the influence of a pre-compressed spring on the zone of discontinuity around a cylindrical cavity // Applied Mechanics and Technical Physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 2005. No. 3. P. 141–148. [In Russ.].
8. Cherdantsev N.V. Stability of pillars in the vicinity of the system of workings constructed in anisotropic rock mass // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2012. No. 1. P. 15–19. [In Russ.].
9. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Analysis of the state of the coal-rock mass, containing a seam development and geological disturbance // Rigid body mechanics [Mekhanika tverdogo tela]. 2018. No. 2. P. 110–121. [In Russ.].
10. Cherdantsev N.V. On one option for calculating the stress state of the seam worked out by the longwall // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2020. No. 8. P. 23–28. [In Russ.].
11. Cherdantsev N.V. One of the approaches to constructing the trajectory of a hydraulic fracture in a rock mass near a mine working // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 2020. No. 2. P. 208–233. [In Russ.].
12. Cherdantsev N.V. Analysis of the trajectory of a hydraulic fracture near a seam development and the conditions for its rectilinear growth // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2021. No. 5. P. 18–23. [In Russ.].
13. Sedov L.I. Continuum mechanics. Moscow: Science, 1984. 560 p. [In Russ.].
14. Hellan K. Introduction to fracture mechanics. Moscow: World, 1988. 364 p. [In Russ.].
15. Cherepanov G.P. Brittle fracture mechanics. Moscow: Science, 1974. 640 p. [In Russ.].
16. Murakami Yu. Handbook of stress intensity factors in 2 volumes. Vol. 1. Moscow: World, 1990. 448 p. [In Russ.].
17. Baklashov I.V. Fundamentals of Geomechanics. Vol. 1. Moscow, 2004. 208 p. [In Russ.].
18. Lurie A.I. The theory of elasticity. Moscow: Science, 1970. 940 p. [In Russ.].
19. Parton V.Z., Perlin P.I. Methods of the mathematical theory of elasticity. Moscow: Science, 1981. 688 p. [In Russ.].
20. Fisenko G.L. Limiting states of rocks around workings. Moscow: Subsoil, 1976. 272 p. [In Russ.].
21. Cherdantsev N.V. The results of the numerical solution of the equations of the limiting state of the boundary zone of the reservoir and their approximation by polynomials // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].
22. Sokolovskiy V.V. Bulk media statics. Moscow: Science, 1990. 272 p. [In Russ.].