

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.58.52.002

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2020

Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ

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



РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДИСКОВОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В ОКРЕСТНОСТИ ШТРЕКОВОЙ ВЫРАБОТКИ

Модель геомеханического состояния дисковой трещины гидроразрыва, распространяющейся в прочных горных породах в окрестности пластовой выработки построена на основных положениях механики хрупкого разрушения Гриффитса–Ирвина и механики деформируемого твёрдого тела.

Поле напряжений в угленородном массиве, вмещающем пластовую выработку и растущую трещину гидроразрыва, построено путём решения упругопластической задачи, в которой областью пластичности являются предельно напряжённые краевые зоны пласта. Критериями наступления предельного состояния являются общий критерий Кулона–Мора по пласту и специальный критерий по его контакту с массивом.

На основе анализа полученных результатов выявлены следующие особенности в распространении трещины. При относительно небольших рабочих давлениях жидкости в насосной установке траектория трещины гидроразрыва представляет собой плавную кривую линию небольшого размера и значительным отклонением её концов от направления зародышевой трещины. С увеличением рабочего давления жидкости длина трещины гидроразрыва увеличивается, а её отклонение от направления зародышевой трещины уменьшается. При некотором значении давления жидкости и ориентации зародышевой трещины относительно выработки она распространяется прямолинейно и практически не меняет направления.

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ, ТРЕЩИНА ГИДРОРАЗРЫВА, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ.

ВВЕДЕНИЕ

Способ направленного гидроразрыва широко используется для регулируемого обрушения вмещающих пород и повышения проницаемости угольного пласта с целью обеспечения безопасности ведения горных работ [1].

Основными проблемами эффективного применения метода направленного являются следующие: выбор заложения зародышевой

трещины относительно выработки, а также назначение рабочих характеристик насосного оборудования, осуществляющего нагружение трещины давлением жидкости. В этой связи возникает задача в расчете рациональных параметров трещины, исходя из соображений оптимального шага обрушения пород кровли пласта.

Наиболее существенным фактором, влияющим на траекторию трещины гидроразрыва, является поле напряжений во вмещающем

углепородном массиве, обусловленном горно-геологическими (глубина ведения горных работ, мощность и характеристики прочности пласта) и горнотехническими (размеры выработки) условиями разработки угольного месторождения. Это поле оказывает значительное влияние на траекторию трещины, и в некоторых случаях существенно искажая её проектное, как правило, прямолинейное направление.

В настоящее время опубликован ряд работ, посвящённых расчётам и применению направленного гидроразрыва пласта и вмещающих пород [2–5]. В них приведены теоретические решения задач гидроразрыва, основанные на фундаментальных методах механики твёрдого деформируемого тела. В работах [2, 3] приведены результаты исследований о распространении трещин гидроразрыва, развивающихся от поверхности скважины, которая находится в однородном гравитационном поле напряжений.

К теоретическим работам о распространении трещин гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горных выработок можно отнести работы [4, 5]. Причём, в работе [4] приведены результаты расчёта параметров плоской трещины гидроразрыва в окрестности пластовой выработки, в которой инициирующая (зародышевая) трещина представляет собой продольные пропилы на поверхности скважины. В работе [5] представлены результаты расчёта дисковой трещины гидроразрыва, также распространяющейся в кровле пласта около пластовой выработки. В этом случае зародышевая трещина создаётся специальным устройством щелеобразователем.

В данной статье представлены некоторые результаты исследований формы и размеров траектории дисковой трещины гидроразрыва для рационального её размещения и выбора насосного оборудования. Исследования проводились при различных положениях инициирующей трещины относительно пластовой выработки и трёх значениях рабочего давления p_0 жидкости в насосной установке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Задача формулируется в постановке предыдущих работ [4, 5] (рис. 1). В массиве горных пород, моделируемом невесомой плоскостью, имеется выработка 1 прямоугольного сечения высотой h_v и пролётом b_v . Она пройдена на глубине H по угольному пласту 2 на всю его мощность. Кровля и почва выработки изнутри нагружена реакцией крепи f . Характеристики прочности угольного пласта меньше, чем характеристики прочности пород вмещающего массива, но больше, чем по контактам пласта с боковыми породами. Массив нагружен гравитационным давлением сверху и снизу γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород), а с боков — $\lambda \gamma H$ (λ — коэффициент бокового давления). В краевых частях пласта образуются зоны неупругого деформирования 3 шириной L . Из середины кровли выработки под углом к горизонту θ_s пробурена скважина 4 длиной l_s . Из неё щелеобразователем создаётся дисковая щель 5 (зародышевая трещина) радиусом b . Она нагружена давлением p и наклонена к горизонту на угол θ_t . Её координаты в системе yOz , совпадающей с центральными осями выработки, y_t, z_t . Очевидно, что геометрические параметры щели связаны с параметрами скважины следующими соотношениями:

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

Как и ранее [4, 5], в процессе решения задачи полагается: размеры выработки вдоль абсциссы x значительно превосходят размеры в плоскости Oyz ; растущая трещина гидроразрыва не изменяет поля напряжений в окрестности выработки; процессы фильтрации жидкости в массиве и другие её утечки не учитываются.

Основу математической модели развития трещины гидроразрыва составляет модель геомеханического состояния анизотропного массива горных пород с системой выработок [6, 7]. Модель апробирована на решении ряда задач геомеханики [8–10]. В дальнейшем эта модель была расширена и реализована

при решении некоторых упругопластических задач геомеханики, к которым относятся задачи о напряжённом состоянии массива горных пород, вмещающих угольный пласт и пройденную по нему пластовую выработку. Поскольку характеристики прочности самого пласта, а тем более на его контактах с массивом значительно ниже характеристик проч-

ности боковых пород, то в краевых частях пласта образуются предельно напряжённые зоны (зоны пластичности) [11–13].

Наличие предельно напряжённых зон, в которых угольный пласт испытывает неупругие деформации, делает задачу о напряжённом состоянии массива около пластовой выработки упругопластической задачей.

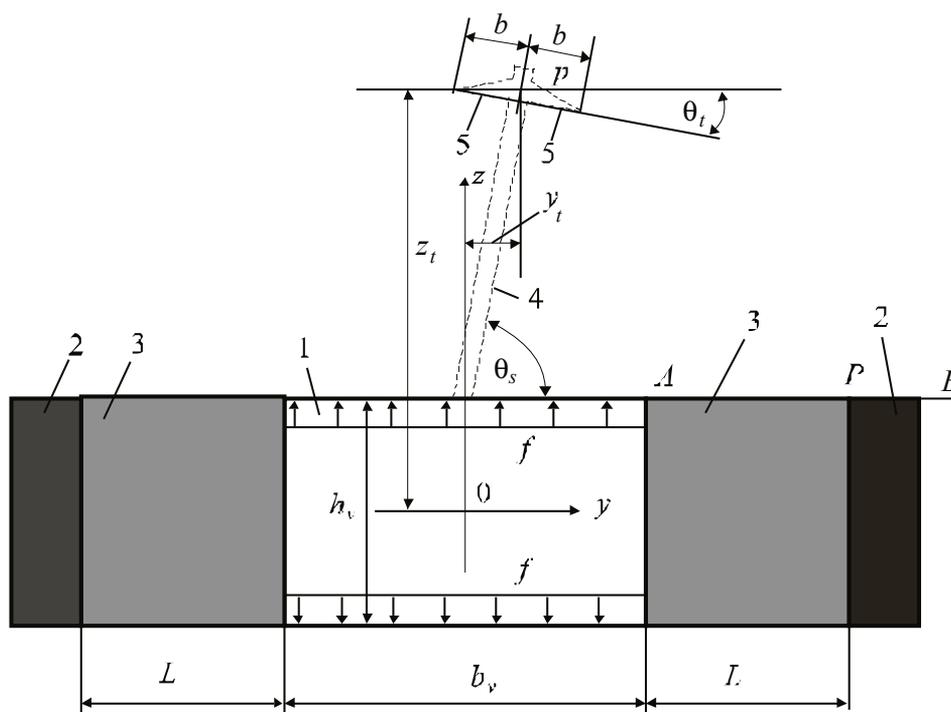


Рис. 1. Расчётная схема пластовой выработки и дисковой трещины

Механизм формирования предельно напряжённых зон с образованием линий скольжения изложен в работах [4, 14, 15]. 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 [16]. 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 [12]. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений относится к классу уравнений гиперболического типа и решается методом характеристик [16]. В замкнутом виде система

интегрируется лишь для нескольких участков пласта, примыкающих к его обнажению. На остальных участках его предельно напряжённой зоны решение можно получить только путём вычислительной процедуры, последовательно решая три краевые задачи механики предельного равновесия сыпучих сред для характерных участков этой зоны [14, 16].

Путём замены предельно напряжённой зоны пласта нормальными и касательными напряжениями, действующими на контакте пласта с окружающим массивом, задача о напряжённом состоянии около пластовой выработки с предельно напряжёнными зонами сводится к упругой задаче с неоднородными граничными условиями [4, 17].

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 P , действующих вдоль линии APB (рис. 1), в предельно напряжённой зоны пласта и в его упругой области. Процедура продолжается до тех пор, пока значения напряжений не совпадут или будут достаточно близки друг к другу. После того как произведена стыковка напряжений считается, что поле напряжений во вмещающем массиве построено, т. е. напряжения могут быть определены в любой точке массива [4, 17].

Следующим этапом решения задачи является расчёт параметров трещины гидроразрыва и графическое представление результатов расчёта траектории трещины.

Известно, что рост трещины в твёрдых деформируемых телах происходит при следующем условии Гриффитса–Ирвина [18, 19]:

$$k_I^2 + k_{II}^2 = \frac{E \cdot \gamma_t}{1 - \mu^2} = K_{IC}^2,$$

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; γ_t — плотность энергии на разрыв, необходимой для образования единицы поверхности, K_{IC} — коэффициент трещиностойкости материала (справочные данные для некоторых типов горных пород приведены в [20]).

Поскольку трещина гидроразрыва даже при достаточно больших размерах всё равно мала по сравнению с размерами вмещающего массива, то нагрузки p_p , p_{II} равны нормальным и касательным напряжениям на берегах трещины. После построения поля напряжений определить напряжения на берегах трещины не представляет принципиальных сложностей.

Коэффициенты интенсивности напряжений для дисковой трещины радиуса a , на-

груженной внутренним давлением на участке радиуса b ($b < a$), расположенной в гравитационном поле напряжений вблизи выработки, выражаются зависимостями, приведёнными в [21, 22].

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 $Q = \text{const}$, p_0 — величина переменная.

В процессе гидроразрыва давление жидкости при прохождении по трещине за счёт вязкости η и параметров самой трещины (раскрытие перед очередным циклом j прорастания w и её длиной $2a$) изменяется согласно закону Пуазейля [23]:

$$p_j = p_{j-1} - \frac{3Q\eta}{w_j^3} \Delta l_j. \quad (1)$$

В выражении (1) η — динамическая вязкость жидкости, раскрытие трещины w определяется по формуле Снеддона [24], приращение Δl_j находится как разность между конечной величиной a_j итерационного процесса и предыдущим значением b_j , p_j определяется из численного решения трансцендентного уравнения [25]:

$$p_j - \frac{1}{\left(1 - \sqrt{1 - \frac{b_j^2}{a_j^2}}\right)} \left(J_I + \sqrt{\frac{\pi E \gamma_t}{4a_j(1 - \mu^2)}} - J_{II}^2 \right) = 0, \quad (2)$$

в котором параметры J_1 , J_2 учитывают нагрузки p_p , p_{II} в неоднородном поле напряжений и размеры трещины на каждом её цикле развития. Они выражаются по формулам [25].

Размер трещины a_j на каждом цикле j её нагружения производится посредством итерационной процедуры, согласно которой на каждом шаге итерации размер a увеличивается на малую величину и решается уравнение (2). Затем по формуле (1) вычисляется новое значение p , к нему добавляется очередное приращение давления Δp и начинается новый

цикл прорастания трещины и повторяется процедура итерационного процесса определения размера трещины, соответствующего этому циклу.

Исследования проведены при следующих исходных данных: $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$, $H = 450 \text{ м}$, $\lambda = 1$, $f = 2,5 \text{ кН/м}^2$, $b_v = 5 \text{ м}$, $h_v = 3 \text{ м}$, $E = 20000 \text{ МПа}$, $\mu = 0,25$, предел прочности пласта на одноосное сжатие $\sigma_0 = 10 \text{ МПа}$, $K_{1C} = 1.66 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ($\gamma_t = 12,92 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}\cdot\text{м}$), $b = 0,066 \text{ м}$. $\eta = 13,04 \cdot 10^{-10} \text{ МПа}\cdot\text{с}$, $Q = 0,0035 \text{ м}^3/\text{с}$. $p_0 = 25 \text{ МПа}$, $p_0 = 30 \text{ МПа}$, $p_0 = 35 \text{ МПа}$. $\theta_t = -10^\circ$ ($\theta_s = 80^\circ$) $\theta_t = -50^\circ$ ($\theta_s = 40^\circ$). $l_s = 8 \text{ м}$, $l_s = 12 \text{ м}$, $l_s = 16 \text{ м}$.

На рис. 2 графики 1, 2 представляют собой эпюру напряжений σ_z , построенную вдоль кровли пласта (вдоль линии APB на рис. 1) в предельно напряжённой зоне (график 1) и в упругой области (график 2). Из анализа эпюры следует, что максимальная величина опорного давления равна $1,687 \gamma H$, а длина предельно напряжённой зоны — $L = 2,4 \text{ м}$. На рисунке горизонтальный участок предельно напряжённой зоны соответствует участку контакта пласта с массивом, на котором реализуется специальный критерий Кулона–Мора.

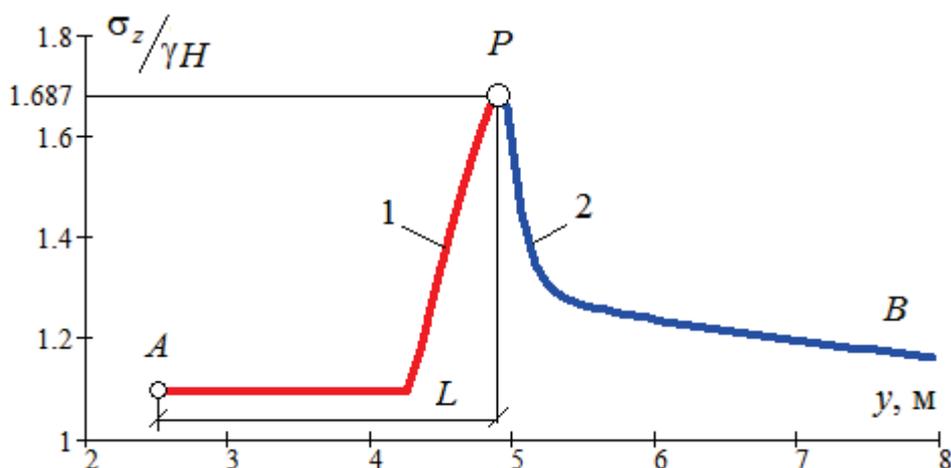


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений вдоль кровли пласта

На рис. 3–10 представлены графические результаты расчёта траекторий трещины для ряда значений угла θ_p , длины скважины l_s , рабочего давления p_0 в насосной установке и числа циклов нагружения N . На этих рисунках цифрой 1 обозначена выработка, цифрой 2 — предельно напряжённые зоны, 3 — зародышевая трещина, 4 — ветви траектории трещины. Кружками обозначены номера циклов, соответствующих росту трещины. В подрисуночных подписях указана конечная полу-длина трещины гидроразрыва при принятом количестве циклов её нагружения.

На рис. 3 показана траектория трещины гидроразрыва, рассчитанная при давлении в насосной установке $p_0 = 35 \text{ МПа}$, длине скважины $l_s = 8 \text{ м}$, значении угла наклона скважины $\theta_t = -10^\circ$ и числе циклов $N = 20$. Из рисун-

ка следует, что трещина распространяется прямолинейно и её направление совпадает с направлением зародышевой трещины.

На рис. 4 представлена траектория трещины гидроразрыва, рассчитанная при давлении в насосной установке $p_0 = 30 \text{ МПа}$, длине скважины $l_s = 8 \text{ м}$, значении угла наклона скважины $\theta_t = -10^\circ$ и числе циклов $N = 25$. Из рисунка видно, что трещина на большей части длины распространяется прямолинейно, но незначительно меняет направление, отклоняясь от направления зародышевой трещины в непосредственной близости к ней. Длина гидротрещины при этом значении давления даже при двадцати пяти циклах нагружения меньше длины гидротрещины, соответствующей $p_0 = 35 \text{ МПа}$.

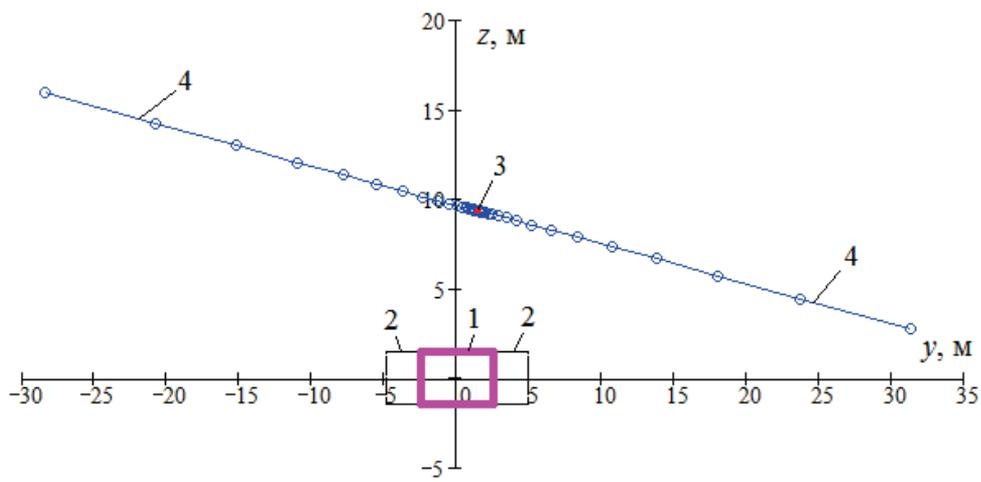


Рис. 3. Траектория трещины при $p_0 = 35$ МПа, $N = 20$. $A = 29,78$ м

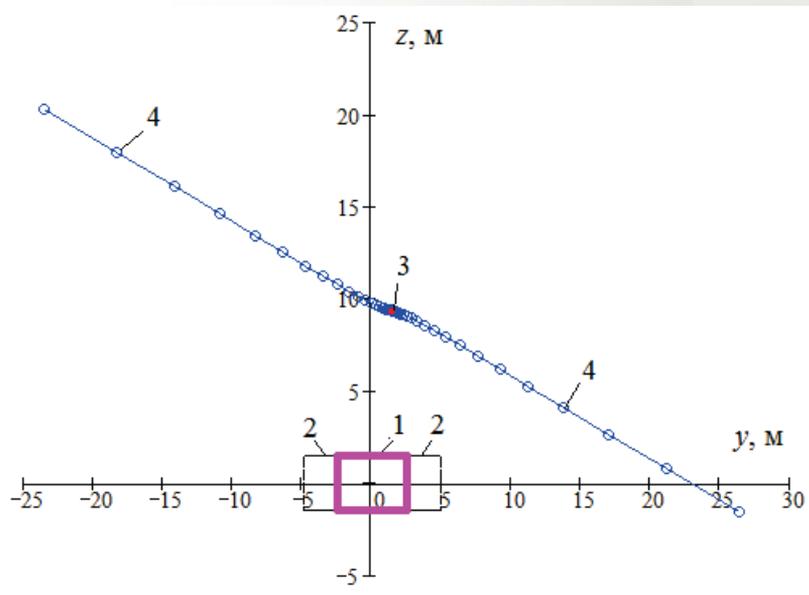


Рис. 4. Траектория трещины при $p_0 = 30$ МПа, $N = 25$. $a = 27,23$ м

На рис. 5 построена траектория трещины гидроразрыва, соответствующая давлению $p_0 = 25$ МПа, длине скважины $l_s = 8$ м, значению угла наклона скважины $\theta_t = -10^\circ$ и числу циклов $N = 30$. Из него хорошо видно, что трещина на большей части длины распространяется по криволинейной траектории и, при этом, значительно отклоняясь от направления зародышевой трещины. Следует также отметить, что при 30-ти циклах нагружения длина трещины почти в три раза меньше значений длины трещины в двух предыдущих случаях, построенных при больших значениях рабочего давления p_0 .

Сравнение количественных и качествен-

ных результатов трёх приведённых примеров показывает, что рабочее давление в насосной установке оказывает существенное влияние на длину трещины гидроразрыва и её направление. Как показывают детальные расчёты, полученные при изменении p_0 в интервале от 25 до 35 МПа с шагом в 1 МПа, прямолинейную траекторию трещина гидроразрыва сохраняет при соотношении $p_0/\gamma H \geq 3$. При этом её отклонение от направления зародышевой трещины составляет менее 5° . При $p_0/\gamma H = 2,5 - 3$ это отклонение достигает 10° . Если $p_0/\gamma H < 2,5$ отклонение трещины может быть более 90° , а её траектория становится криволинейной.

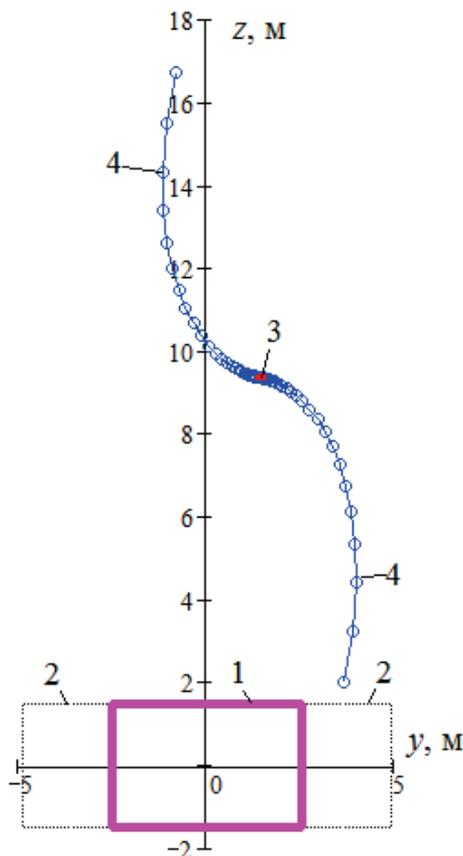


Рис. 5. Траектория трещины при $p_0 = 25$ МПа, $N = 30$. $a = 9,3$ м

На рис. 6–8 построены траектории трещин гидроразрыва, соответствующие следующим параметрам зародышевой трещины: $\theta_t = -50^\circ$, $l_s = 8$ м. Цифрами на этих рисунках обозначены те же параметры, что и на предыдущих рисунках 3–5. В подрисуночных подписях указаны конечные значения длины трещины, а также значения p_0 и N .

Из рисунков следует, что, во-первых, траектории трещины при всех значениях p_0 практически совпадают с направлением зародышевой трещины, оставаясь прямолинейными. Во-вторых, как и ранее, повышение давления увеличивает длину трещины.

Из анализа рис. 3–5, а также рис. 6–8 следует, что положение зародышевой трещины оказывает большое влияние на длину и форму траектории трещины гидроразрыва.

На рис. 9, 10 траектории гидротрещины

построены при других значениях длины скважины и $p_0 = 35$ МПа. Из рисунков видно, что при удалении зародышевой трещины от контура выработки её длина при фиксированном количестве циклов возрастает, а траектория остаётся прямолинейной, и совпадающей с направлением зародышевой трещины.

На рис. 11 построены графики 1–4 зависимости полудлины трещины a от угла наклона θ_t для трёх значений длины скважины (1 — график соответствует $l_s = 8$ м, 2 — $l_s = 12$ м, 3 — $l_s = 16$ м, 4 — одиночная трещина без учёта влияния выработки). Видно, что на интервале изменения $\theta_t = -(25^\circ - 72^\circ)$ длина гидротрещины меньше длины трещины в массиве в отсутствие выработки. На остальных интервалах изменения θ_t длина гидротрещины может существенно превышать длину одиночной трещины.

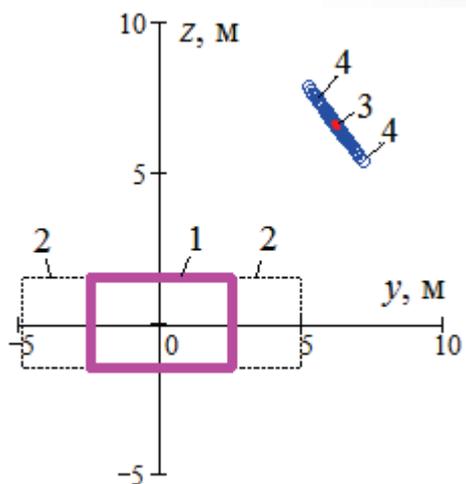


Рис. 6. Траектория трещины при $p_0 = 25$ МПа, $N = 30$. $a = 1,581$ м

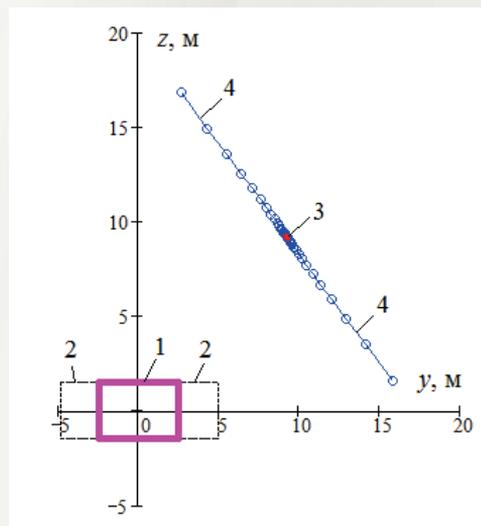


Рис. 9. Траектория трещины при $p_0 = 35$ МПа, $l_s = 12$ м, $\theta_t = -50^\circ$, $N = 20$. $a = 10,05$ м

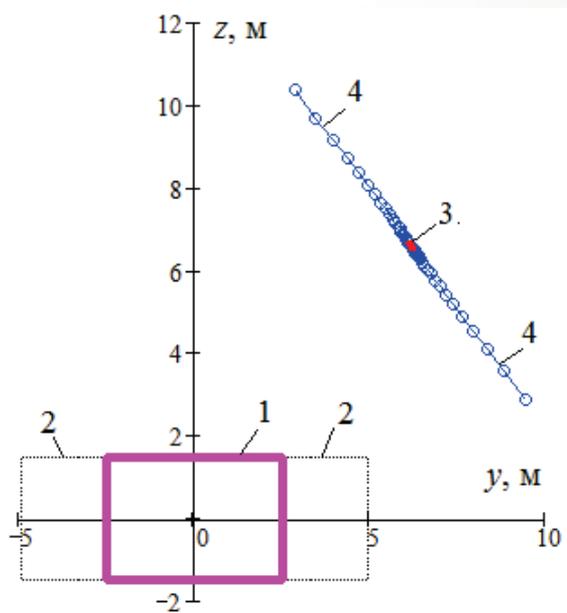


Рис. 7. Траектория трещины при $p_0 = 30$ МПа, $N = 25$. $a = 5$ м

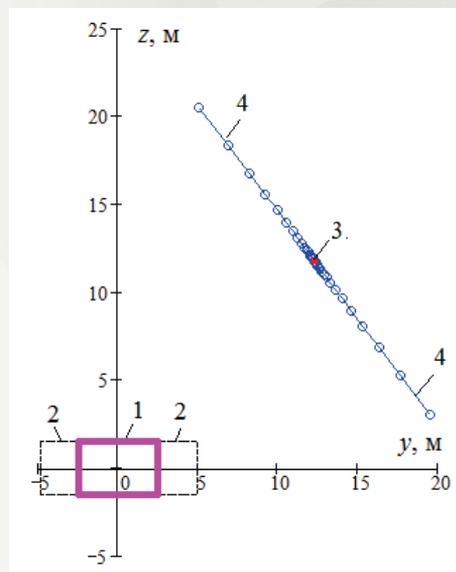


Рис. 10. Траектория трещины при $p_0 = 35$ МПа, $l_s = 16$ м, $\theta_t = -50^\circ$, $N = 20$. $a = 11,33$ м

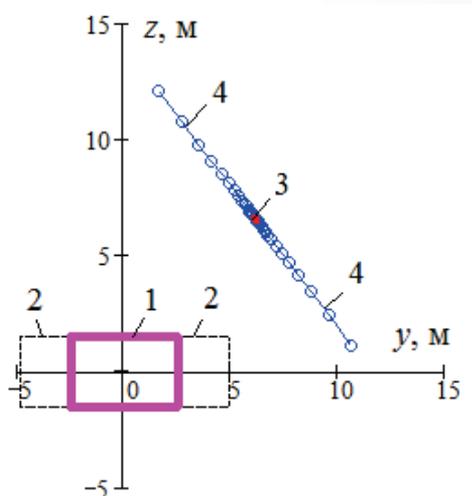


Рис. 8. Траектория трещины при $p_0 = 35$ МПа, $N = 20$. $a = 7,09$ м

На рис. 12 построен график 1 зависимости полудлины трещины a от числа циклов её роста j . Он построен при $p_0 = 35$ МПа, $l_s = 8$ м, $\theta_t = -50^\circ$. График 2 на рис. 12, близкий к графику 1, является показательной функцией [3]:

$$a_j = b_t \cdot \left(\frac{a_N}{b_t} \right)^{j/N}, \quad (3)$$

где N — конечное число циклов, a_N — конечная полудлина трещины, a_N — конечное значение трещины, соответствующее N циклам.

Из рисунка видно, что графики 1 и 2 практически совпадают друг с другом. Отсюда следует вывод, что длина трещины растёт по закону показательной функции.

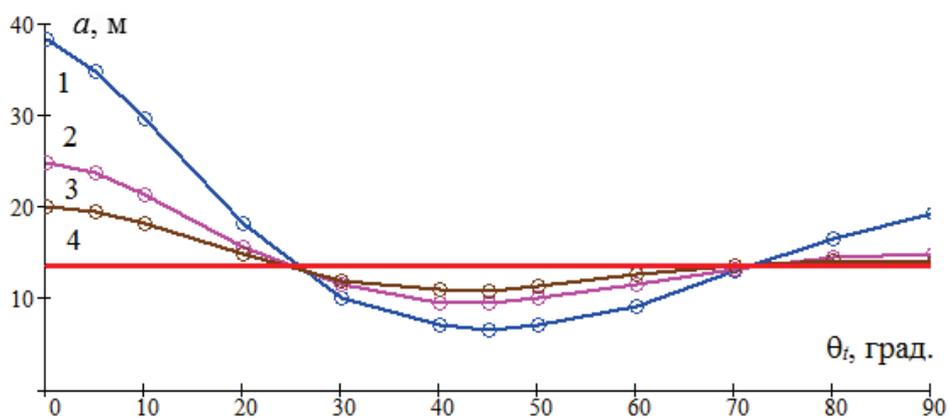


Рис. 11. Графики зависимости полудины a от угла наклона θ_i для ряда значений l_s

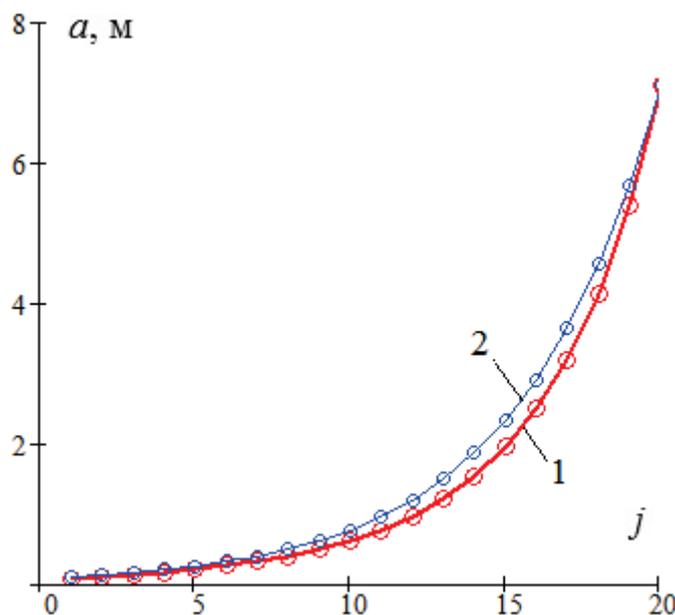


Рис. 12. Графики зависимости полудины трещины a от числа циклов j

ВЫВОДЫ

1. Наличие выработки оказывает весьма существенное влияние на параметры трещины гидроразрыва: её размеры и форму траектории. В этой связи эти параметры определяются положением зародышевой трещины относительно выработки.

2. Выделено три интервала изменения угла наклона зародышевой трещины, в пределах которых растущая трещина принимает большие или меньшие значения по сравнению с одиночной трещиной гидро-

разрыва, распространяющейся вдали от выработки.

3. Рабочее давление жидкости в насосной установке оказывает значительное влияние на параметры. При $p_0/\gamma H \geq 3$ — траектория прямолинейная и совпадает с направлением зародышевой трещины, а при $p_0/\gamma H < 2,5$ траектория становится кривой линией, а её отклонение трещины может быть более 90° .

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. 524 с.
2. Зубков В.В., Кошелев В.Ф., Линьков А.М. Численное моделирование инициирования и роста трещин гидроразрыва // ФТПРПИ. 2007. № 1. С. 45–63.
3. Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В., Куранаков Д.С. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 312 с.
4. 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.
5. Черданцев Н.В. К расчёту траектории дисковой трещины гидроразрыва в прочных породах вблизи пластовой выработки // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 10. С. 59–64.
6. Черданцев Н.В., Шаламанов В.А. Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений // Известия вузов «Горный журнал». 2004. № 5. С. 50–54.
7. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Ануфриев В.Е. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок. Кемерово: ИУ СО РАН, 2012. 222 с.
8. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Классификация вырезов по степени их влияния на окружающий массив // Вестник КузГТУ. 2006. № 5. С. 3–7.
9. Черданцев Н.В. Влияние анкерной крепи на устойчивость породного массива, вмещающего одиночную выработку // Вестник КузГТУ. 2012. № 4. С. 3–7.
10. 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.
11. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
12. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
13. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. М.: Недра, 1989. 488 с.
14. Черданцев Н.В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами // Безопасность труда в промышленности. № 6. С. 7–13.
15. Черданцев Н.В. Исследование предельно напряжённого состояния пласта в его краевой зоне методами механики сыпучей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 45–57.
16. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
17. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Анализ состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение // Механика твёрдого тела. 2018. № 2. С. 110–121.
18. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1984. 560 с.
19. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
20. Баклашов И.В. Основы геомеханики. Т. 1. М.: Моск. гос. геол. ун-т, 2004. 208 с.
21. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
22. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2-х томах. М.: Мир, 1990. Т. 1. 448 с.
23. 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.

24. Снеддон И.Н., Берри Д.С. Классическая теория упругости. М.: Физматгиз, 1961. 220 с.

25. 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.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.58.52.002

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2020

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 TRAJECTORY SIMULATION OF DISK FRACTURE OF HYDRAULIC FRACTURING IN VICINITY OF ROD MINE

The model of the geomechanical state of the hydraulic fracturing disk crack propagating in strong rocks in the vicinity of the formation mine is based on the main positions of the Griffiths-Irwin brittle fracture mechanics and the mechanics of the deformable solid.

The stress field in the carbon mass containing the formation and the growing fracture of hydraulic fracturing is built by solving the elastoplastic problem in which the area of plasticity is the extremely stressed edge zones of the formation. The criteria for the onset of the limit state are the general Coulomb-Mor criterion for the formation and a special criterion for its contact with the array.

Based on the analysis of the obtained results, the following features in crack propagation were identified. With relatively small operating fluid pressures in the pump unit, the fracturing crack trajectory is a smooth curve line of small size and a significant deviation of its ends from the direction of the germ crack. With an increase in the working pressure of the liquid, the length of the fracturing crack increases, and its deviation from the direction of the germ crack decreases. With a certain value of the fluid pressure and the orientation of the germ crack relative to the production, it propagates rectilinear and practically does not change direction.

Keywords: ROCK MASS, MINING, STRESS INTENSITY FACTORS, FRACTURING CRACK, COAL BED.

REFERENCES

1. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Security Issues and new technologies of underground coal mining. Novosibirsk: Novosibirsk writer, 2011. 524 p. [In Russ.].

2. Zubkov V.V., Koshelev V.F., Linkov A.M. Numerical modelling of hydraulic fracture initiation and development // Journal of Mining Science [FTPRPI]. 2019. T. 43. No. 1. P. 40–56. [In Russ.].

3. Cherny S.G., Lapin V.N., Osipov D.V., Kurenkov D.S. Methods for modeling of initiation and propagation of cracks. Novosibirsk: S.B., 2016. 312 p. [In Russ.].

4. 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.].

5. Cherdantsev N.V. To the calculation of the trajectory of a disk fracture of hydraulic fracturing in strong rocks near the formation workings // Labor Safety in Industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 10. P. 59–64. [In Russ.].

6. Cherdantsev N.V., Shalamanov V.A. Boundary integral equations in problems of mechanics of underground structures // Bulletin of universities «Gornyy Zhurnal» [Izvestiya vuzov «Gornyy zhurnal»]. 2004. No. 5. P. 50–54. [In Russ.].

7. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Anufriev V.E. Questions of methodological and instrumental support for monitoring of mine workings. Kemerovo: IU SB RAS, 2012. 222 p. [In Russ.].

8. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Classification of cutouts by the degree of their influence on the surrounding array // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 5. P. 3–7. [In Russ.].

9. Cherdantsev N.V. Influence of anchor support on the stability of rock mass containing a single mine working // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2012. No. 4. P. 3–7. [In Russ.].

10. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Geomechanical state of a strength anisotropic rock mass in the vicinity of mating tunnels // Journal of Mining Science [FTPRPI]. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 143–148. [In Russ.].

11. Borisov A.A. Mechanics of rock and arrays. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].

12. Fisenko G.L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].

13. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparian E.V. Fundamentals of rock mechanics. M.: Nedra, 1989. 488 p. [In Russ.].

14. Cherdantsev N.V. Results of numerical solution of equations of the marginal state of the boundary zone of the formation and their approximation by polynomials // Labor Safety in Industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].

15. Cherdantsev N.V. Investigation of the extremely stressed state of the reservoir in its edge zone by methods of loose medium mechanics // Mining information and analytical Bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2020. No. 3. P. 45–57. [In Russ.].

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

17. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Analysis of the state for a coal massif in-seam working and a geological discontinuity // Mechanics of Solids [Mekhanika tvordogo tela]. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 211–220. [In Russ.].

18. Sedov L.I. Continuum Mechanics. M.: Nauka, 1984. 560 p. [In Russ.].

19. Hellan K. Introduction to fracture mechanics. M., 1984. 376 p. [In Russ.].

20. Baklashov I.V. Fundamentals of geomechanics. M.: Mosk. State Geol. University, 2004. T. 1. 208 p. [In Russ.].

21. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle destruction. M.: Nauka, 1974. 640 p. [In Russ.].

22. Murakami Y. The society of materials science. M., 1987. 470 p. [In Russ.].

23. 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.].

24. Sneddon I.N., Berry D.S. The classic theory of elasticity. M., 1958. 238 p. [In Russ.].

25. Cherdantsev N.V. Calculation of parameters of a hydraulic fracturing disk crack located in the strong rocks of the reservoir roof near the reservoir development // Science-Intensive technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyomkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. 2020. No. 6. P. 84–89. [In Russ.].