

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.86.21.003

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2024

**Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ**

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



## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛОСКОЙ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ ОКОЛО ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ

*Модель плоской трещины гидроразрыва, распространяющейся в угольном пласте, построена на основных положениях механики разрушения Гриффитса – Ирвина и механики деформируемого твёрдого тела.*

*Параметры траектории движения трещины гидроразрыва определяются рядом факторов: характеристиками иницирующей («зародышевой») трещины, физико-механическими характеристиками среды, горно-геологическими условиями отработки месторождения, обуславливающими поле напряжений углепородного массива, а также характеристиками насосного оборудования.*

*Поле напряжений в углепородном массиве, вмещающем пластовую выработку, построено методом граничных элементов, с помощью которого решается краевая задача теории упругости. К этой задаче сведена упругопластическая задача, в которой зоной пластичности или предельно напряжённой зоной являются краевые зоны пласта. Критериями наступления предельного состояния являются обций и специальный критерии Кулона – Мора.*

*Построенное поле напряжений в окрестности ведения горных работ является неоднородным и оказывает существенное влияние на параметры трещины гидроразрыва, поскольку его компоненты используются в основных зависимостях теории Гриффитса – Ирвина. Это поле.*

*На основе анализа полученных результатов выявлены особенности в распространении трещины гидроразрыва в окрестности очистной выработки.*

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

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими проблемами при отработке угольных месторождений подземным способом являются газодинамические явления, происходящих либо в форме внезапных выбросов газугольной смеси, либо в форме внезапных и обильных выделений метана из забоев горных выработок [1–3].

Большинство этих явлений происходит в окрестности пластовых выработок, проходящих по угольному пласту [4–7].

Как правило, газодинамические явления происходят в краевых зонах пласта, примыкающих к выработанному пространству. В этих зонах, называемых предельно напряжёнными зонами или зонами опорного давления, пласт деформируется не упруго и на их границе с упругой областью концентрация напряжений достигает максимальных значений [5–7].

Горно-геологические условия отработки угольных месторождений в значительной степени определяют характер ведения горных

работ и их степень опасности. Если породы кровли пласта не отличаются высокой прочностью, то зоны опорного давления в пласте незначительны, а обрушение этих пород происходит циклично и при сравнительно небольших размерах выработанного пространства и, как правило, не вызывает проблем при ведении горных работ [4–7].

Значительно более опасная ситуация возникает при отработке пластов с прочными вмещающими пласт горными породами, которые после выемки части пласта перед обрушением образуют большие пространства. При этом параметры опорного давления (размер предельно напряжённой зоны  $L_p$  и коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$  — отношение максимального вертикального напряжения к гравитационным напряжениям в массиве до ведения горных работ) достигают больших величин. При этом смещения пород над выработанным пространством значительны, а их обрушение сопровождается аэродинамической волной сжатия, способной опрокинуть вентиляционную струю шахтного проветривания. Это обстоятельство приводит к авариям и сбоям в ритмичной работе горного предприятия [4, 5].

Одним из эффективных методов по предотвращению зависания пород кровли является метод направленного гидроразрыва. Смысл метода состоит в отсечении зависающей над выработанным пространством «тяжёлой» кровли путём проведения в ней трещины гидроразрыва. Он достаточно подробно изложен в ряде работ [4]. Теоретическое решение задачи о распространении трещины гидроразрыва в весьма прочных породах кровли пласта изложено в работах [8–10]. В них также приведены результаты исследований, показывающие влияние характеристик среды, положение инициирующей трещины и характеристик насосного оборудования на параметры трещины гидроразрыва: её траекторию движения и длину.

Сложная ситуация возникает и при ведении очистных работ по пластам с высокой природной газоносностью. При достаточно высокой скорости отработки пласта

поступления метана из его краевой зоны могут значительно превысить допустимые нормы концентрации в забое выработки, и это обстоятельство также вызовет сбой в работе шахты и может быть причиной взрыва метановоздушной смеси [3–5]. В таких случаях следует проводить мероприятия по предварительной дегазации отработываемых угольных пластов. Одним из наиболее эффективных способов дегазации пласта также является метод направленного гидро разрыва пласта [4].

Идея метода направленного гидроразрыва состоит в искусственном нарезании из скважины щели, так называемой зародышевой трещиной, либо в прочных породах кровли пласта, либо в самом пласте с последующей подачей в неё под давлением жидкости (флюида). Жидкость, создавая высокую концентрацию напряжений у краёв щели, инициирует появление и развитие трещины во вмещающих породах [4, 8–10]. В конечном итоге она полностью пересекает всю толщу слоя горных пород или угольного пласта, что приводит в первом случае к обрушению пород кровли, а во втором — к образованию поверхности, через которую поступает из пласта в скважину свободный метан.

Зародышевая щель бывает двух типов: дисковой и плоской [4]. Дисковая трещина нарезается за счёт вращения щелеобразователя, расположенного в концевой части скважины, а плоская трещина образуется путём искусственного нарезания на поверхности скважины на всю её длину двух небольших канавок (выемок), называемых пропилами, которые расположены на противоположных концах её диаметра (рис. 1).

Проблема эффективного использования способа гидроразрыва состоит в том, чтобы заложить рациональные параметры зародышевой трещины с целью оптимального распространения гидротрещины в окружающих её породах для обеспечения оптимального решения поставленной задачи [4, 10].

В связи с этим разработана математической модели о состоянии угленородного массива, вмещающего пластовую выработку

и трещину гидроразрыва, является важной научной и производственной задачей, позволяющей решать проблемы безопасности горных работ и повышения производительности труда на угледобывающих предприятиях.

Ниже представлена модель и приведены результаты решения в плоской постановке задачи о геомеханическом состоянии углеродного массива и распространения в угольном пласте плоской трещины гидроразрыва в окрестности очистной выработки.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Задача о напряжённом состоянии углеродного массива, вмещающего угольный пласт, обрабатываемый очистной выработкой, формулируется следующим образом (рис. 1). В массиве горных пород, моделируемом бесконечной плоскостью, на глубине  $H$  по угольному пласту 1 мощностью  $t$ , пройдена сначала монтажная камера 2 (для монтажа угледобычного оборудования) шириной  $a_k$  и высотой  $h_k$ , а затем проводится очистная выработка 3, оснащённая механизированной крепью 4. Ширина выработки  $a_v$ , а её высота  $h$ , равная мощности пласта.

Прочность вмещающих пород массива значительно выше прочности угольного пласта, поэтому зоны неупругого деформирования 5 шириной  $L_p$  (в борту очистной выработки) и  $L_k$  (в борту монтажной камеры) образуются только в краевых частях пласта, но не в окружающих породах.

Плоскость нагружена сверху, снизу и с боков равнокомпонентным гравитационным давлением  $\gamma H$  ( $\gamma$  — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород).

Из подготовительной выработки (вентиляционного штрека) впереди очистного забоя перпендикулярно направлению движения очистной выработки пробурена скважина 6 радиусом  $r$ . Скважина расположена в срединной плоскости пласта, в которой лежит координатная ось  $y$  ( $z_t = 0$ ). По боковой поверхности скважины нарезаются две канавки 7, расположенные на противоположных точках её диаметра, которые образуют зародышевую трещину. Ширина каждой канавки равна  $b_t$ , а высота —  $h_t$ . Изнутри скважина нагружена давлением жидкости  $p$ , а зародышевая трещина наклонена к горизонту под углом  $\theta_t$ . Её координаты в системе  $yOz$ , совпадающей с центральными осями выработки,  $y_s, z_s = 0$ .

Поскольку трещина гидроразрыва вблизи горной выработки распространяется в окрестности выработки, то на траекторию трещины существенное влияние оказывает неоднородное поле напряжений, обусловленное этой выработкой. В этой связи основу математической модели развития трещины гидроразрыва составляет модель

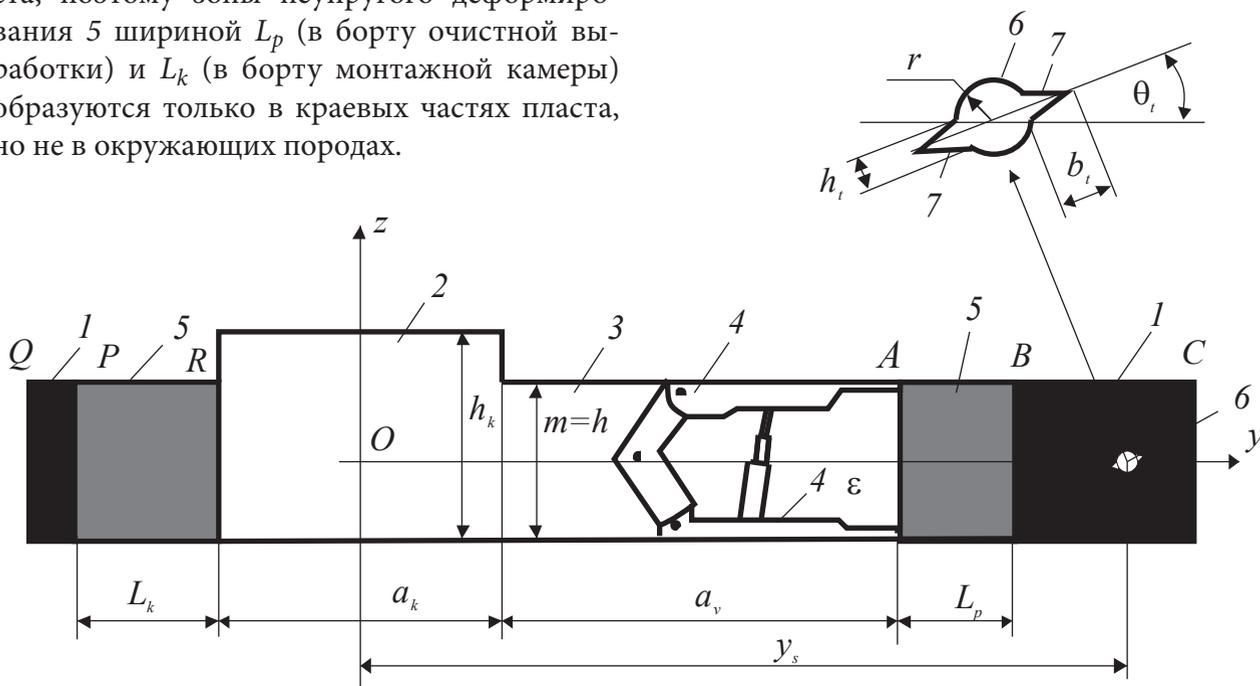


Рис. 1. Расчётная схема пластовой выработки и скважины с инициирующей трещиной

геомеханического состояния анизотропного массива горных пород, вмещающего систему выработок [3, 11].

В расчётах используются следующие характеристики пласта:  $\sigma_0$  — предел прочности на одноосное сжатие,  $K$  — коэффициент сцепления,  $\rho$  — угол внутреннего трения. Характеристики прочности пород по контактам пласта с остальным массивом:  $K'$  — коэффициент сцепления,  $\rho'$  — угол внутреннего трения, и они значительно ниже, чем по угольному пласту и, тем более по вмещающим породам массива.

Поскольку краевые зоны угольного пласта испытывают неупругие деформации, задачу о напряжённом состоянии массива около пластовой выработки требуется решать как упругопластическую задачу.

В предельно напряжённых зонах пласта напряжения определяются путём совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и двух критериев прочности Кулона — Мора, общего и специального [12]. Общий критерий формулируется для всех точек пласта кроме точек, принадлежащих контакту пласта с боковыми породами, а специальный критерий для точек, принадлежащих только контакту пласта [5]. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений относится к классу уравнений гиперболического типа и решается методом характеристик [12, 13].

Затем на основании аксиомы статики о связях предельная зона отбрасывается, а к её контуру на упругую область массива с обратным знаком прикладываются реактивные силы, обусловленные напряжениями на контуре предельной зоны. После этого задача сводится к классической второй внешней краевой задаче теории упругости, которая формулируется в статических граничных условиях о вырезах, на контуре которого нагрузка известна, а на бесконечности она задана гравитационными (тектоническими) силами и представляется интегральным уравнением Фредгольма второго рода относительно плотности поверхностной (фиктивной) нагрузки, приложенной к контуру выреза [10]. Это уравнение может

быть решено численно, например, методом механических квадратур [14, 15].

Неизвестный размер предельно напряжённой зоны, входящий в размеры области интегрирования, определяется методом последовательных приближений. Этот метод заключается в применении итерационной процедуры уравнивания вертикальных напряжений  $\sigma_z$  в точке  $B$ , действующих вдоль линии  $ABC$  (рис. 1) в предельно напряжённой зоне 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, поле напряжений во вмещающем массиве построено, т.е. напряжения могут быть определены в любой точке и по любому направлению [10, 11].

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

Известно, что при теоретическом анализе проблемы прочности и распространения трещин в твёрдых деформируемых телах при квазистатических процессах используется уравнение Ирвина [16, 17]

$$k_n^2 + k_t^2 = \frac{E \cdot \Gamma}{1 - \mu^2} = k_{IC}^2, \quad (1)$$

где  $k_n, k_t$  — коэффициенты интенсивности напряжений, обусловленные действием нормальной (расклинивающей)  $p_n$  и касательной  $p_t$  нагрузок на берегах трещины;  $E$  — модуль упругости, а  $\mu$  — коэффициент Пуассона пород массива.  $\Gamma$  — плотность энергии разрушения материала, необходимой для образования единицы поверхности,  $k_{IC}$  — коэффициент трещиностойкости материала (справочные данные для некоторых типов горных пород приведены в [18]).

Коэффициенты интенсивности напряжений для плоской трещины размером  $a$ , нагруженной внутренним давлением на участке  $b$  ( $b < a$ ), расположенной в поле напряжений вблизи выработки, выражаются зависимостями, приведёнными в [19, 20].

$$k_n = \frac{2p\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{a^2 - b^2}} - \frac{J_1}{\sqrt{\pi a}}, k_t = \frac{J_2}{\sqrt{\pi a}} \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) параметры  $J_1, J_2$  выражаются по формулам [10] через нормальную нагрузки  $p_n$  и касательную нагрузки  $p_t$ , которые в свою очередь связаны с компонентами поля напряжений известными соотношениями [14]

$$p_n = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + \left( \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \right) \cos 2\theta + \tau_{yz} \sin 2\theta,$$

$$p_t = \left( \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \right) \sin 2\theta + \tau_{yz} \cos 2\theta,$$

Направленный гидро разрыв горных пород реализуется посредством насосных установок с жёсткими рабочими характеристиками: напор  $p_0$  и расход жидкости в единицу времени  $Q$ . В таких установках  $Q = \text{const}$ ,  $p_0$  — меняется.

Процесс образования и развития трещины представляется двумя этапами.

На первом этапе развитие трещины происходит при постепенном повышении давления жидкости, начиная с нуля. Достигнув некоторого значения  $p_{кр.min}$  [16] трещина «стремится», при этом направление её движения совпадает с направлением зародышевой трещины, поскольку на её кончике действует только давление жидкости. При дальнейшем увеличении давления на  $\Delta p$  до некоторого текущего значения  $p$  трещина должна увеличить свой размер на  $\Delta l$ .

В процессе гидроразрыва давление жидкости при прохождении по трещине за счёт вязкости  $\eta$  и параметров самой трещины (раскрытие  $w$  перед очередным циклом  $j$  прорастания на  $\Delta l$  и её длиной  $2a$ ) изменяется согласно закону Пуазейля [21]

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

В выражении (3)  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости, а раскрытие трещины  $w$  определяется по формуле [22]

$$w_j = \frac{4(1-\mu^2)}{E} (p_j - p_{n_j}) \sqrt{a_j^2 - x_{ij}^2}, \quad (4)$$

где давление  $p_j$  в трещине определяется из численного решения трансцендентного уравнения [10]

$$p_j - \frac{\pi}{2a_j \cdot \operatorname{arctg} \frac{b_j}{\sqrt{a_j^2 - b_j^2}}} \left( J_1 + \sqrt{\frac{E \cdot \Gamma \cdot a_j}{\pi(1-\mu^2)}} - J_2^2 \right) = 0, \quad (5)$$

а  $x_{ij}$  — абсцисса, отсчитываемая от середины трещины вдоль её оси,  $p_{n_j}$  — нормальная нагрузка по поверхности трещины.

Размер трещины  $a_j$  на каждом цикле  $j$  её нагружения определяется в ходе итерационной процедуры, согласно которой на каждом шаге итерации размер  $a$  увеличивается на малую величину и решается уравнение (5). Затем по формуле (3) вычисляется новое значение  $p$ , к нему добавляется очередное приращение давления  $\Delta p$  и начинается новый цикл прорастания трещины и повторяется процедура итерационного процесса определения размера трещины, соответствующего этому циклу.

Для определения давления жидкости, при котором происходит рост трещины на определённую (заданную) величину, необходимо учесть тот факт, что приращение трещины происходит значительно быстрее, чем его заполнение жидкостью. Таким образом, пока жидкость занимает часть трещины длиной  $2b$ , сама длина трещины стала равна  $2a = 2(b + \Delta l)$ .

Отклонения трещины от начального направления в изотропной среде следует ожидать при  $k_t \neq 0$  [17].

В этой связи направление продвижения трещины происходит под таким углом  $\theta = \theta_c$  относительно начального её положения, которое совпадает с направлением площадки с максимальным растягивающим напряжением. Известно, что по этой площадке отсутствует касательное напряжение, нормальное напряжение по ней является главным напряжением  $\sigma_3$ , а сама площадка называется главной площадкой.

Угол  $\theta_c$  определяется из решения следующего тригонометрического уравнения

относительно угла  $\theta$ , отсчитываемого от направления трещины в момент её «страгивания» [17]

$$k_n \left( \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) + k_t \left( \cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2} \right) = 0.$$

В уравнении (5) значение  $b$  следует положить равным  $b_t$  и после этого найти величину  $a$ . Его решение может производиться последовательными приближениями, например, увеличивая на каждом шаге итерации размер  $a$  на малую величину до тех пор, пока не будет выполнено условие (5). Приращение  $\Delta l$  определится как разность между конечной величиной  $a$  итерационного процесса и значением  $b=b_t$ . После этого по формуле (4) вычисляется значение  $w$ , в котором  $x_t$  следует положить, равным  $b_t$ . Затем по формуле (3) вычисляется новое значение  $p$ , к нему добавляется очередное приращение давления  $\Delta p$  и начинается новый цикл первого этапа расчёта трещины.

На новом цикле размер  $b$  становится равном размеру  $a$  предыдущего цикла. После этого вычисляются компоненты напряжений на участке приращения трещины и определяются компоненты  $p_n, p_t$  в которых  $\theta=\theta_t$ . Далее в ходе итерационного процесса решения уравнения (5) определяются параметры  $a, b$ . Затем по формуле (4) вычисляется параметр  $w$ , в котором абсцисса  $x_t$  равна значению  $b$  этого цикла. Затем по формуле (3) вычисляется  $p$ , потом к нему добавляется  $\Delta p$ , вычисляются компоненты напряжений и вновь определяются компоненты  $p_n, p_t$  для нового шага прорастания трещины. Следующие циклы повторяются в той же последовательности.

Второй этап расчёта трещины соответствует её росту при  $p=p_0$ . К этому моменту её полудлина сравнима с радиусом скважины. В этом случае правомерна замена отверстия трещиной и тогда её полудлиной считается сумма полудлины трещины, полученной на первом этапе роста, и значение радиуса скважины [17].

Циклы второго этапа выполняются таким же образом, как и циклы первого этапа, но следует учесть, что на втором этапе прироста давления  $\Delta p$  нет.

Рост трещины прекращается в том случае, если давление в ней стало меньше напряжений в нетронутом массиве (на бесконечности), либо в случае прекращения подачи жидкости в трещину, ограничившись определённым числом циклов.

Ниже представлены результаты моделирования развития трещины гидроразрыва.

Исследования проведены при следующих исходных данных:  $\gamma=25$  кН/м<sup>3</sup>,  $H=650$  м,  $a_v=20$  м,  $h=3$  м,  $a_k=5$  м,  $h_k=4,5$  м,  $E=5000$  МПа,  $\mu=0,2$ ; предел прочности пласта на одноосное сжатие  $\sigma_0=10$  МПа,  $\rho=20^\circ$ ,  $K'=0$ ,  $\rho'=10^\circ$ ,  $K_{1C}=0,27$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> ( $\Gamma=1,4\times 10^{-5}$  МПа $\times$ м),  $r=0,021$  м,  $b_t=0,008$  м.  $\eta=13,04\times 10^{-10}$  МПа $\times$ с,  $Q=0,0035$  м<sup>3</sup>/с,  $p_0=30$  МПа.

На рис. 2, 3 построены графики 1, 2, представляющие собой эпюру напряжений  $\sigma_z$ , изменяющуюся вдоль кровли пласта (вдоль линии ABC и RQP на рис. 1): график 1 в предельно напряжённой зоне, а график 2 в упругой области. Из рисунка следует, что максимальная величина опорного давления в окрестности очистной выработки равна  $2,267 \gamma H$ , а длина предельно напряжённой зоны  $L_p=5,95$  м. В окрестности монтажной камеры эти параметры, соответственно, равны  $2,188 \gamma H$  и  $L_k=5,8$  м.

На рис. 4–7 представлены графические результаты расчёта траекторий трещины, распространяющейся от скважины, пробуренной

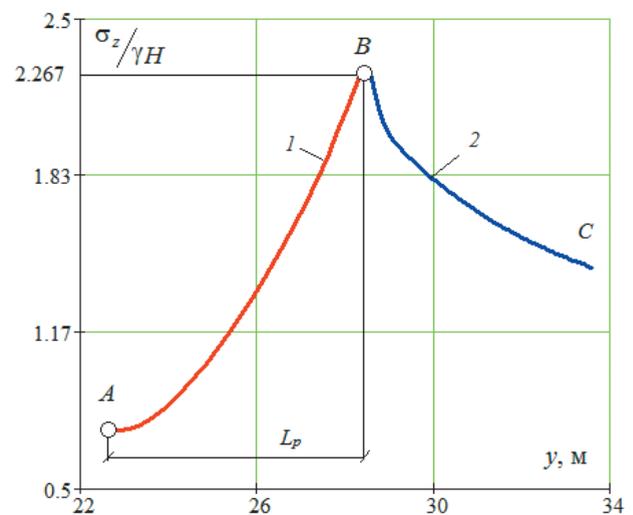


Рис. 2. Эпюра напряжений вдоль кровли пласта впереди очистной выработки

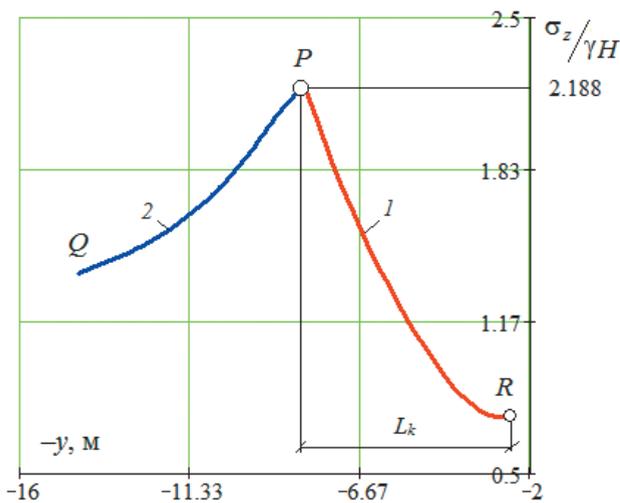


Рис. 3. Эпюра напряжений вдоль кровли пласта позади монтажной камеры

на расстоянии  $y_s=50$  м от начала принятой системы координат, в которой зародышевая трещина наклонена к горизонту под углом  $\theta_f = -30^\circ$ .

На рис. 4 показаны: 1 — скважина, 2 — зародышевые выемки, 3 — трещина гидроразрыва, развивающаяся от выемок до того, как растущее давление в скважине достигнет величины  $p_0 = 30$  МПа. Кружками отмечены положения трещины, соответствующие циклам (скачкам) её роста (нагрузения). По результатам расчёта следует, что давление в трещине достигает проектной величины  $p_0$ , когда число циклов нагружения становится равным 7 ( $N=7$ ), при этом, полудлина трещины стала равной 0,0224 м.

На рис. 5 иницирующая трещина вместе со скважиной обозначена цифрой 1, а цифрой 2 обозначена трещина гидроразрыва, когда она достигает своими крайними точками поверхностей кровли и почвы пласта. По результатам расчётов полудлина трещины получилась равной 6,82 м, и она достигает этого значение при числе циклов  $N=18$ . Следует заметить, что траектория трещины не является прямолинейной,

а с увеличением длины она становится пологой кривой и с каждым циклом её наклон к горизонту по сравнению с зародышевой трещиной уменьшается.

На рис. 6 приведены наглядные результаты моделирования очистной выработки 1, монтажной камеры 2, предельно напряжённых зон пласта 3, 4 в их бортах, а также распространения трещины гидроразрыва б в угольном пласте, у которой зародышевая трещина 5 находится впереди очистной выработки на расстоянии 50 м от начала координат. Как указано выше, для того чтобы трещине полностью пересечь пласт под заданным углом наклона зародышевой трещины, в сумме потребуется 25 циклов её роста и при этом её длина составляет 13,64 м.

На рис. 7 показана трещина гидроразрыва, зародышевая трещина которой расположена на расстоянии 100 м от начала заданной системы координат. Также как и на рис. 5 цифрой 1 отмечена зародышевая трещина, а цифрой 2 ветви трещины гидроразрыва. Из рисунка

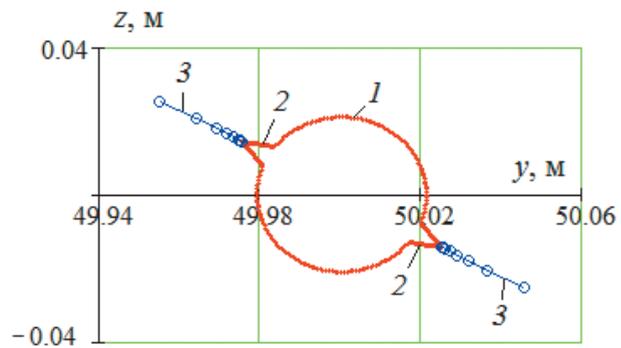


Рис. 4. Траектория трещины при  $p < p_0 = 30$  МПа,  $N=7$ ,  $a=0,0224$  м,  $\theta_f = -30^\circ$

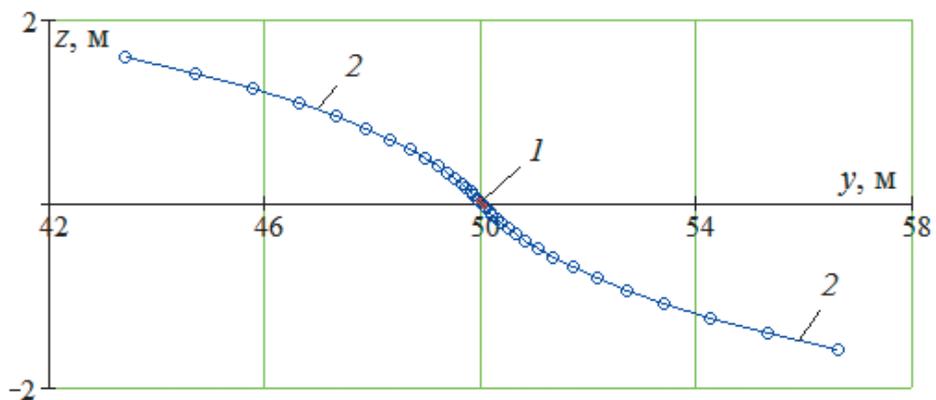


Рис. 5. Траектория трещины при  $p=p_0=30$  МПа,  $N=18$ ,  $a=6,82$  м,  $\theta_f = -30^\circ$

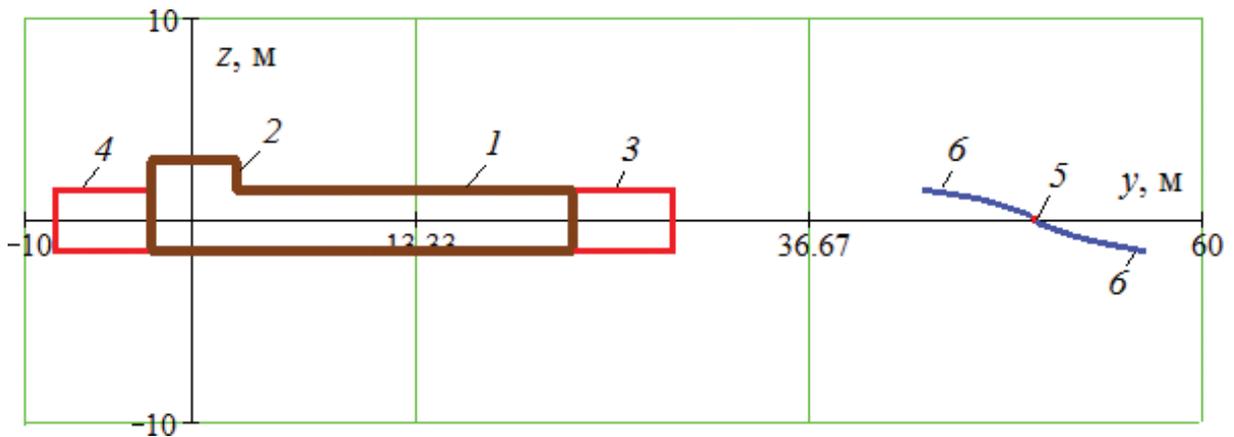


Рис. 6. Траектория трещины гидроразрыва около очистной выработки

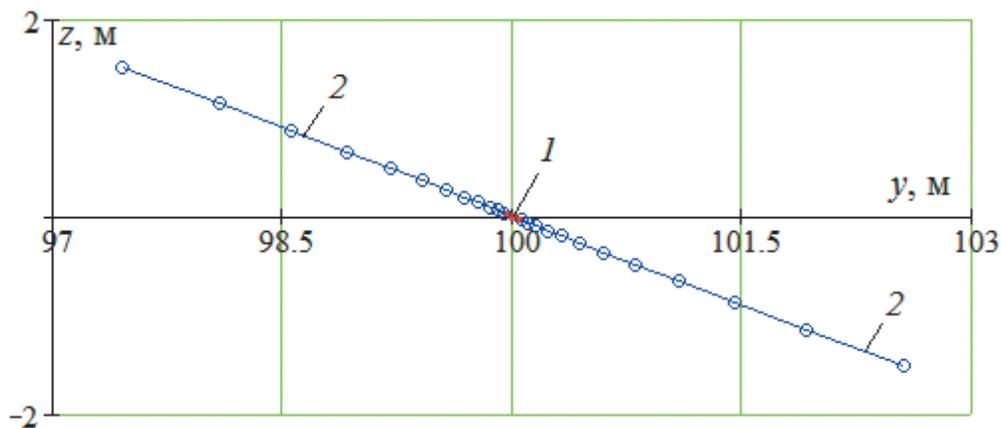


Рис. 7. Траектория трещины при  $p=p_0=30$  МПа,  $N=12$ .  $a=2,95$  м,  $\theta_t=-30^\circ$

следует, что траектория трещины прямолинейна и её направление совпадает с направлением зародышевой трещины, а для полного пересечения мощности пласта требуется ещё дополнительно 12 циклов к предыдущим 7, когда давление в ней достигает проектной величины в 30 МПа. При этом её полная длина составляет  $2 \times 2,95 \text{ м} = 5,9 \text{ м}$ .

Из анализа результатов расчёта трещин гидроразрыва, представленных на рис. 6 и 7, следует, что трещина гидроразрыва, чья зародышевая трещина расположена ближе к очистной выработке, распространяется в более сложных условиях, поскольку находится ближе к максимальному значению опорного давления. При этом, для полного пересечения мощности пласта требуется большее количество циклов накачки жидкости в скважину, а траектория трещины довольно существенно отклоняется от исходного направления.

Если требуется наибольшая поверхность обнажения трещины гидроразрыва, то в этом случае направление зародышевой трещины должно совпадать с направлением оси абсцисс. В этом случае гидротрещина не пересекает мощность пласта и поэтому может распространяться на значительную длину, поскольку ориентирована вдоль горизонта. В этой связи в рамках модели проведён вычислительный эксперимент по определению длины трещины гидроразрыва, у которой зародышевая трещина расположена на оси абсцисс на различном удалении от начала координат. В расчётах принято, что на втором этапе роста гидротрещины количество циклов  $N$  во всех случаях одинаково и равно двадцати.

На рис. 8 построен график зависимости полудлины  $a$  распространяющейся горизонтально трещины гидроразрыва в зависимости от абсциссы зародышевой трещины.

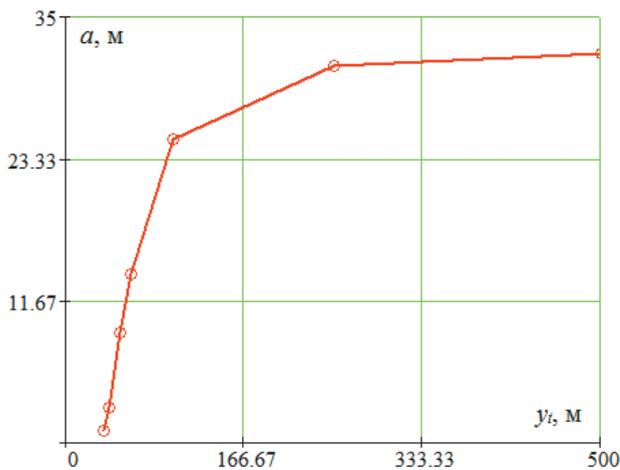


Рис. 8. График зависимости полудлины трещины  $a$  от положения зародышевой трещины

Из графика следует, во-первых, на расстояниях  $y_t \geq 250$  м полудлина трещины гидроразрыва практически не меняется и составляет порядка 31,5 м; во-вторых, при  $y_t \leq 35$  м, когда зародышевая трещина достаточно близко расположена к пику опорного давления, её полудлина становится меньше одного метра.

## ВЫВОДЫ

1. Модель геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего пластовые выработки и распространяющуюся по угольному пласту плоскую трещину гидроразрыва, базируются на зависимостях и методах механики деформируемого твёрдого тела и механики разрушения. Она отражает реальные условия работы массива горных пород и учитывает основные горно-геологические и горнотехнические условия обрабатываемого месторождения, позволяет довольно точно

строить поле напряжений вмещающего массива, проводить широкомасштабные исследования и тем самым обеспечить эффективность применения метода гидроразрыва для дегазации угольных пластов. В этой связи она может быть отнесена к разряду фундаментальных моделей.

2. Распространение трещины гидроразрыва, зародышевая трещина которой расположена недалеко от краевой части пласта, весьма затруднено из-за существенного влияния опорного давления.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024–2025 гг.» (рег. № 1022041300134-5-1.5.1;2.7.5).*

*The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2024-0013 «Creation of multipurpose systems for monitoring and forecasting of gas-dynamic phenomena, control of the stress state, development of methods for their prevention and efficiency assessment during underground development of coal deposits. 2024–2025» (Reg. No. 1022041300134-5-1.5.1;2.7.5).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
2. Зыков В. С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5 (114). С. 44–48.
3. Черданцев Н. В., Преслер В. Т., Ануфриев В. Е. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок. Кемерово: ИУ СО РАН, 2012. 222 с.
4. 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.
5. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
6. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. М.: Недра, 1989. 488 с.

7. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
8. Зубков В. В., Кошелев В. Ф., Линьков А. М. Численное моделирование инициирования и роста трещин гидроразрыва // ФТПРПИ. 2007. № 1. С. 45–63.
9. 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.
10. 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.
11. Черданцев Н. В., Черданцев С. В. Анализ состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение // Механика твёрдого тела. 2018. № 2. С. 110–121.
12. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
13. 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.
14. Лурье А. И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
15. Партон В. З., Перлин П. И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.
16. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1984. 560 с.
17. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
18. Баклашов И. В. Основы геомеханики. Т. 1. М.: Моск. гос. геол. ун-т, 2004. 208 с.
19. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
20. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений в 2-х томах, т. 1, М.: Мир, 1990. 448 с.
21. 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.
22. Снеддон И. Н., Берри Д. С. Классическая теория упругости. М.: Физматгиз, 1961. 220 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.86.21.003

UDC 622.023.23

© N. V. Cherdantsev, 2024

**N. V. CHERDANTSEV**

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

#### **MODELING THE PROPAGATION OF A HYDRAULIC FRACTURING FLAT CRACK IN A COAL SEAM NEAR A TREATMENT PLANT**

*The model of a hydraulic fracturing plane crack propagating in a coal seam is based on the basic principles of Griffiths–Irwin fracture mechanics and deformable solid mechanics.*

*The parameters of the fracturing fracture trajectory are determined by a number of factors: the characteristics of the initiating («germinal») crack, the physical and mechanical characteristics of the medium, the mining and geological conditions of the deposit, causing the stress field of the carboniferous massif, as well as the characteristics of pumping equipment.*

*The stress field in the carboniferous massif containing the formation is constructed by the boundary element method, which solves the boundary value problem of the theory of elasticity. An elastically plastic*

problem is reduced to this problem, in which the zone of plasticity or the extremely stressed zone are the marginal zones of the formation. The criteria for the onset of the limiting state are the general and special Coulomb–Mohr criteria.

The constructed stress field in the vicinity of mining operations is heterogeneous and has a significant effect on the parameters of the hydraulic fracturing crack, since its components are used in the main dependencies of the Griffiths–Irwin theory. This is the field.

Based on the analysis of the results obtained, the features in the propagation of the hydraulic fracturing crack in the vicinity of the treatment work are revealed.

Keywords: ROCK MASS, MINING, STRESS INTENSITY COEFFICIENTS, HYDRAULIC FRACTURING CRACK, COAL SEAM

#### REFERENCES

1. Petukhov I. M., Linkov A. M. The Mechanics of Rock Bursts and Discharges. Moscow: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
2. Zykov V. S. About the mechanism of formation of an outlier situation in the treatment face of a coal mine // Surveyor's Bulletin. 2016. No. 5 (114). P. 44–48.
3. 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.].
4. 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.
5. Fisenko G. L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
6. Turchaninov I. A., Iofis M. A., Kasparian E. V. Fundamentals of rock mechanics. M.: Nedra, 1989. 488 p. [In Russ.].
7. Borisov A. A. Mechanics of rock and arrays. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].
8. Zubkov V. V., Koshelev V. F., Linkov A. M. Numerical modelling of hydraulic fracture initiation and development // Journal of Mining Science. 2019. Vol. 43. No. 1. P. 40–56.
9. 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.].
10. 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. 2020 No. 2. P. 208–233. [In Russ.].
11. Cherdantsev N. V. Cherdantsev S. V. Analysis of the state for a coal massif in-seam working and a geological discontinuity // Mechanics of Solids. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 211–220.
12. Sokolovsky V. V. Loose Medium Statics. M.: Nauka. 1990. 272 p. [In Russ.].
13. 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. 2020. No. 3. P. 45–57.
14. Lurie A. I. Theory of Elasticity. Moscow: Nauka, 1970. 940 p. [In Russ.].
15. Parton V. Z., Perlin P. I. Methods of Mathematical Theory of Elasticity. Moscow: Nauka, 1981. 688 p. [In Russ.].
16. Sedov L. I. Continuum Mechanics. M.: Nauka, 1984. 560 p. [In Russ.].
17. Hellan K. Introduction to fracture mechanics. Norway: University of Trondheim, 1984. 376 p.
18. Baklashov I. V. Fundamentals of geomechanics. M.: Mosk. State Geol. University, 2004. Vol. 1. 208 p.
19. Cherepanov G. P. Mechanics of brittle destruction. M.: Nauka, 1974. 640 p. [In Russ.].
20. Murakami Y. The society of materials science. Tokio: Pergamon Books LTD, 1987. 470 p.
21. 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. 2011. Vol. 46. No. 4. P.603–612.
22. Sneddon I. N., Berry D. S. The classic theory of elasticity. Verlag: Springer, 1958. 238 p.