I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА
I. INDUSTRIAL SAFETY AND GEOMECHANICS

Н.В. Черданцев // N.V. Cherdantsev
nvch2014@yandex.ru

д-р техн. наук, главный научный сотрудник ФГБУН «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10
doctor of technical sciences, chief scientific researcher of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 650065, Kemerovo, Leningradsky Av., 10

А.В. Шадрин // A.V. Shadrin
avsh-357@mail.ru

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10
doctor of technical sciences, leading scientific researcher of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 650065, Kemerovo, Leningradsky Av., 10

УДК 622.023.23

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ ТРЕЩИНЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД, НАГРУЖЕННОЙ ДАВЛЕНИЕМ ЖИДКОСТИ
A FLUID PRESSURE-LOADED SINGLE CRACK LOCATED IN A ROCK MASSIF PROPAGATION TRAJECTORY CALCULATION

Представлены результаты решения задачи о распространении одиночной трещины, наполненной под давлением жидкостью, в массиве горных пород. Массив нагружен неравно компонентным гравитационным полем напряжений и представляет собой однородную упругую среду. Причины возникновения трещины и её нагружения внутренним давлением не рассматриваются.
В поставленной задаче массив горных пород находится в условиях плоского деформированного состояния. В данной работе влияние выработки на напряжённое состояние массива и траекторию движения трещины не рассматривается.
Задача решается в рамках классических представлений о состоянии трещины, её устойчивом и неустойчивом росте в бесконечной пластине из хрупкого материала, основанных на теориях Гриффитса – Ирвина.
По результатам проведённых исследований построены траектории движения трещины для ряда значений угла наклона трещины к горизонту, характеристик, связанных с прочностью вмещающих пород. Представлен анализ изменения критических давлений при прорастании трещины.
The task solving results of a single crack filled with liquid under pressure propagation in a rock mass are presented. The rock mass is loaded with an unequal component gravitational field of stresses and represents a homogeneous elastic medium. The causes of the crack occurrence and its loading by internal pressure are not considered.
In the task set, the rock mass is under conditions of a flat deformed state. In this paper, the effect of the opening on the stressed state of the rock mass and on crack propagation trajectory is not considered.
The task is solved within the framework of classical concepts of the state of a crack, its stable and unstable growth in an infinite plate of brittle material, based on the theories of Griffiths - Irwin.
Based on the results of the studies carried out, crack propagation trajectories are constructed for a number of the crack to the horizon inclination angle values, the characteristics associated with the strength of the enclosing rocks. An analysis is given of the critical pressures change during the crack intergrowth.
Ключевые слова: *МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГИДРОТРЕЩИНА, КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ*
Key words: *ROCK MASSIF, COAL SEAM, HYDRAULICK CRACK, STRESSES' INTENSITY COEFFICIENT*

1 ВВЕДЕНИЕ

Расчёт напряжённого состояния массива около выработки, пройденной по угольному пласту, в краевых частях которого из-за низких характеристик прочности по сравнению с вмещающим массивом образуются предельно-напряжённые зоны, является важной научной задачей и актуальной производственной проблемой [1–3]. Наличие предельно напряжённых зон может быть причиной различных геодинамических явлений: горных ударов, внезапных выбросов из забоев выработок горной массы, пучения почвы и значительных смещений их кровли [1, 4–6], и это обстоятельство должно учитываться при проектировании и эксплуатации горных предприятий [7, 8].

В зависимости от характеристик прочности угольного пласта и вмещающих боковых пород их переход в предельное состояние при отработке пласта происходит по-разному. В одних случаях наступление предельного состояния пород кровли пласта с последующим их обрушением происходит при сравнительно небольших размерах выработанного пространства, в других – выработанное пространство перед обрушением охватывает значительные площади. В этом случае зависание может привести к пучению пород почвы пласта, горным ударам, а при обрушении кровли – к поломкам горного оборудования и авариям, связанным с проветриванием выработок.

Для уменьшения размеров зависания основной кровли используют ряд способов, наиболее эффективным из которых является метод направленного гидроразрыва [9]. Суть его состоит в принудительном обрушении пород кровли (почвы) пласта посредством искусственного инициирования трещины типа щели и её развития в этих породах за счёт закачки в трещину под большим давлением жидкости.

Одной из первых работ, послуживших началом бурного применения метода гидроразрыва, является работа С.А. Христиановича и Ю.П. Желтова, научно обосновавших возможность и эффективность применения гидроразрыва в нефтегазовой промышленности для повышения дебета нефтеносной скважины [10].

К настоящему времени в угольной промышленности накоплен значительный опыт применения различного рода гидровоздействий на массив горных пород [11, 12]. В решениях большинства задач о распространении трещины в горном массиве считается, что она находится в однородном поле напряжений, т.е. влиянием выработки, создающей неоднородное поле напряжений, пренебрегается.

Проблема состоит в том, чтобы заложить оптимальные параметры положения щели для создания наиболее эффективного обрушения кровли растущей трещиной гидроразрыва. На траекторию движения трещины влияет много факторов, и наиболее существенным из них является поле напряжений в окрестности растущей трещины. На угольных шахтах трещина гидроразрыва распространяется не в однородном поле напряжений нетронутого массива, а вблизи пластовой выработки, которая, как сказано выше, значительно изменяет поле напряжений.

Эта задача достаточно сложна и к настоящему времени, по-видимому, полностью не решена.

В этой связи в данной работе авторы решили сначала представить и обсудить результаты детального решения задачи о распространении трещины, находящейся под внутренним давлением жидкости, в массиве, нагруженном неравнокомпонентным полем напряжений. При этом, как уже было отмечено выше, вопрос о возникновении этой трещины и поступлении в неё жидкости здесь не рассматривается. В этой работе сделан упор лишь на чисто геомеханических аспектах задачи.

2. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СОСТОЯНИИ ГИДРОТРЕЩИНЫ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Задача формулируется следующим образом. В массиве горных пород, моделируемом бесконечной плоскостью, нагруженной по краям сжимающими гравитационными напряжениями: сверху и снизу γH, а по бокам - $\lambda\gamma H$, имеется узкий разрез длиной $2l_0$, имитирующий начальную («зародышевую») трещину, нагруженную изнутри постоянным давлением p_t. При определённом значении этого давления $p_t > p_{kp} = p^*_{kp}$ трещина увеличивает длину до значения $2l$. Длина разреза пренебрежимо мала по сравнению с размерами плоскости. Начала глобальной системы yz и локальной $y_t z_t$ лежат в середине трещины, а сама она повёрнута к горизонту на угол α_t (рис. 1).

В ходе решения задачи рассматриваются условия равновесия, страгивания и распространения трещины в породах массива.

Известно, что при теоретическом анализе проблемы прочности и распространения сильных разрывов перемещений в твёрдых деформируемых телах используется универсальное уравнение термодинамики, которое применительно к телу с трещиной может быть применено к двум смежным его состояниям: перед и после

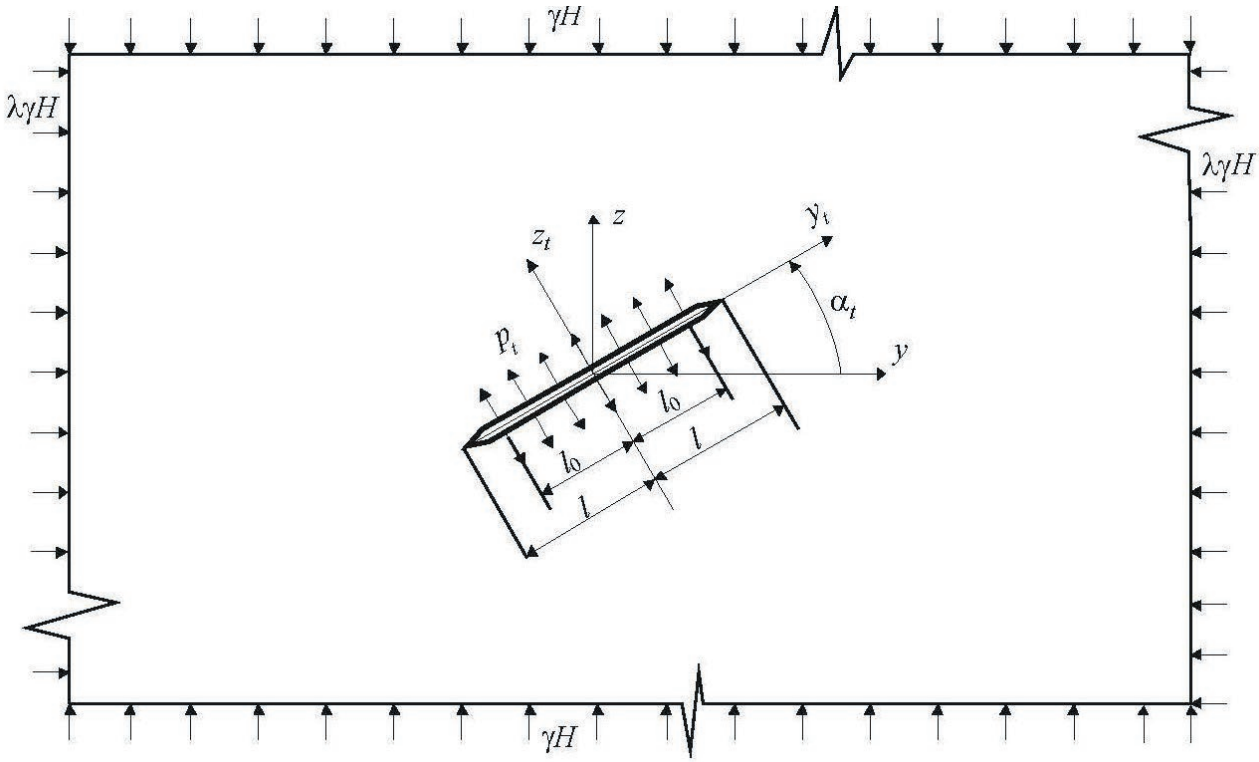

Рисунок 1 – Схема задачи о гидротрещине в массиве горных пород
Figure 1 – Hydraulic crack in the rock massif task scheme

её прорастания на некоторую величину. Применительно к квазистатическим процессам это уравнение имеет вид [13, 14]

$$\Delta\Lambda = \Delta(U - A) = -\Delta\Pi, \qquad (1)$$

где Λ – полная потенциальная энергия деформации тела, U – энергия деформации тела, A – работа внешних сил, Π – энергия, необходимая на преодоление силы сцепления между частицами материала при расширении границы трещины (энергия разрушения при расширении трещины).

Изменение полной потенциальной энергии упругой деформации определяется следующим образом [14]

$$\Delta\Lambda = -\frac{(\kappa+1)}{8G}\left(k_I^2 + k_{II}^2\right)\cdot\Delta l, \qquad (2)$$

где k_I – коэффициент интенсивности напряжений, обусловленный действием расклинивающей (нормальной) нагрузки p_I на берегах трещины, k_{II} – коэффициент интенсивности напряжений от действия касательной нагрузки p_{II} на берегах трещины, Δl приращение трещины, κ – параметр, зависящий от типа плоской задачи. Для плоской деформации $\kappa=3-4\mu$ (μ – коэффициент Пуассона пород массива), G – модуль упругости второго рода пород массива, связанный с модулем упругости первого рода E следующей зависимостью $E=2(1+\mu)G$.

Коэффициенты интенсивности напряжений выражаются следующими зависимостями [13]

$$k_I = (p_t - p_I)\sqrt{\pi l}, \quad k_{II} = p_{II}\sqrt{\pi l}, \qquad (3)$$

где p_I, p_{II} – нормальные и касательные напряжения на берегах трещины, обусловленные напряжениями на бесконечности γH, $\lambda\gamma H$. Они определяются по известным формулам вычисления напряжений по наклонным площадкам [13, 14]

$$p_I = \frac{\gamma H}{2}\left[1+\lambda+(1-\lambda)\cdot\cos 2\alpha_t\right],$$

$$p_{II} = \frac{\gamma H}{2}\left[(1-\lambda)\cdot\sin 2\alpha_t\right]. \qquad (4)$$

Изменение энергии разрушения $\Delta\Pi$ по Гриффитсу определяется следующим образом

$$\Delta\Pi = \gamma_t\cdot\Delta l, \qquad (5)$$

где γ_t – плотность поверхностной энергии, необходимой для образования единицы поверхности.

После подстановки выражений (2) и (5) в уравнение (1) и некоторых преобразований получается следующая зависимость, которая является условием страгивания концов трещины.

$$n = \frac{N\cdot(t_{подг} + t_{спуск})}{t_{р\,офп}\cdot(1-K) + t_{подг} + t_{спуск} + t_{актив}} \qquad (6)$$

Выражения (3) с учётом давления жидкости в трещине и зависимостей (4) принимают вид

$$= \left\{ p_t - \frac{\gamma H}{2}\left[1+\lambda+(1-\lambda)\cdot\cos 2\alpha_t\right]\right\}\sqrt{\pi l}\,,$$

$$k_{II} = \frac{\gamma H}{2}\left[(1-\lambda)\cdot\sin 2\alpha_t\right]\sqrt{\pi l}\,. \qquad (7)$$

Из формулы (7) следует, что при $\alpha_t=0°$ $k_{II}=0$, а положительное значение коэффициента k_I, при котором возможно существование щели, может быть реализовано лишь при

$$p_t \geq \gamma H.$$

Подстановка выражения (7) в условие страгивания трещины (6) и исключение из него значения давления, соответствующего этому условию, приводит к следующему выражению

$$p_t = p_{kp} = \frac{\gamma H}{2}\left[1+\lambda+(1-\lambda)\cdot\cos 2\alpha_t\right]+$$

$$\sqrt{\frac{E\gamma_t}{\pi l_0\left(1-\mu^2\right)} - \left[\frac{\gamma H}{2}(1-\lambda)\cdot\sin 2\alpha_t\right]^2}\,. \qquad (8)$$

Величина давления p^*_{kp}, при котором обеспечивается продвижение трещины на заданную величину $\Delta l=l-l_0$, вычисляется следующим образом [12, 13]

$$p^*_{kp} = \frac{\pi}{2\mathrm{arctg}\left(\dfrac{l_0}{\sqrt{l^2-l_0^2}}\right)}$$

$$\left\{\frac{\gamma H}{2}\left[1+\lambda+(1-\lambda)\cdot\cos 2\alpha_t\right]+\right.$$

$$\left.\sqrt{\frac{E\gamma_t}{\pi l\left(1-\mu^2\right)} - \left[\frac{\gamma H}{2}(1-\lambda)\cdot\sin 2\alpha_t\right]^2}\right\}. \qquad (9)$$

В теории Гриффитса, относящейся к чисто упругим материалам, характеристика γ_t одна и та же по всем направлениям и для всех типов деформации трещины, и отклонения трещины от начального направления следует ожидать при $k_{II}\neq 0$. В этой связи направлением продвижения трещины является такое направление $\theta=\theta_c$, для которого при заданной внешней нагрузке левая часть условия (6), называемая «трещинодвижущей» силой, имеет максимальное значение из всех возможных.

Вполне очевидно предположить, что это направление совпадает с площадкой максимального растягивающего направления. Известно, что по этой площадке отсутствует касательное напряжение, нормальное напряжение по ней является главным напряжением σ_1, а сама площадка называется главной площадкой.

В соответствии с этим предположением направление движения трещины задаётся углом θ_c, который определяется из решения следующего тригонометрического уравнения относительно угла θ, отсчитываемого от направления трещины в момент её страгивания [15]

$$k_I\left(\sin\frac{\theta}{2}+\sin\frac{3\theta}{2}\right)+$$

$$k_I\left(\cos\frac{\theta}{2}+3\cos\frac{3\theta}{2}\right)=0\,. \qquad (10)$$

Если коэффициент λ не равен единице, то из формул (7) следует, что значение k_{II} не равно нулю, поэтому при достижении давлением p_t своего критического значения p_{kp} трещина изменит первоначальное (исходное) направление и будет его менять при каждом новом приращении длины при прорастании [15].

Как показывают результаты аналитических исследований, рост длины трещины происходит экспоненциально, и эта зависимость выявлена на основе анализа акустической эмиссии растущей трещины [12]. В результате ряда экспериментов, проводимых с трещинами гидрообработки, в частности гидрорыхления угольных пластов, это теоретическое положение подтвердилось [16]. В этой связи в расчётах траектории трещины изменение её длины следует задавать следующим образом

$$l = l_0 e^{\frac{j}{k_t}}\,,\ k_t = \frac{N_{sk}}{\ln\left(\dfrac{l_k}{l_0}\right)} \qquad (11)$$

где j – номер скачка давления, l_k – конечная длина трещины, N_{sk} – количество скачков давления до момента окончания прорастания трещины.

При построении траектории движения трещины на первом шаге расчёта по форме (8) вычисляем p_{kp} , затем по формулам (7) вычисляем k_I и k_{II}, причём вместо p_t берём только что полученное значение p_{kp}. После этого найденные значения k_I и k_{II} подставляем в уравнение (10) и после его решения находим $\theta=\theta_c$. Далее, добавляя к l_0 некоторую (определим её ниже) величину прорастания трещины Δl, находим l, и по формуле (9) вычисляем p^*_{kp}.

На последующих шагах вычислительной процедуры к участку щели добавляется участок прорастания трещины, который наклонён к горизонту на угол $\theta=\alpha_t+\theta_c$.

При нескольких циклах роста трещины начальную, конечную длины трещины и величину

её приращения соответствующему j-му циклу на основании формул (11) определяем следующим образом

$$l_{0j} = l_0 e^{\frac{j-1}{k_t}}, \; l_j = l_0 e^{\frac{j}{k_t}}, \; \Delta l_{j-1} = l_j - l_{0j}.$$

Схема растущей трещины с геометрическими и силовыми параметрами представлена на рис. 2. На нём n_t – номер крайней точки траектории трещины в момент её остановки.

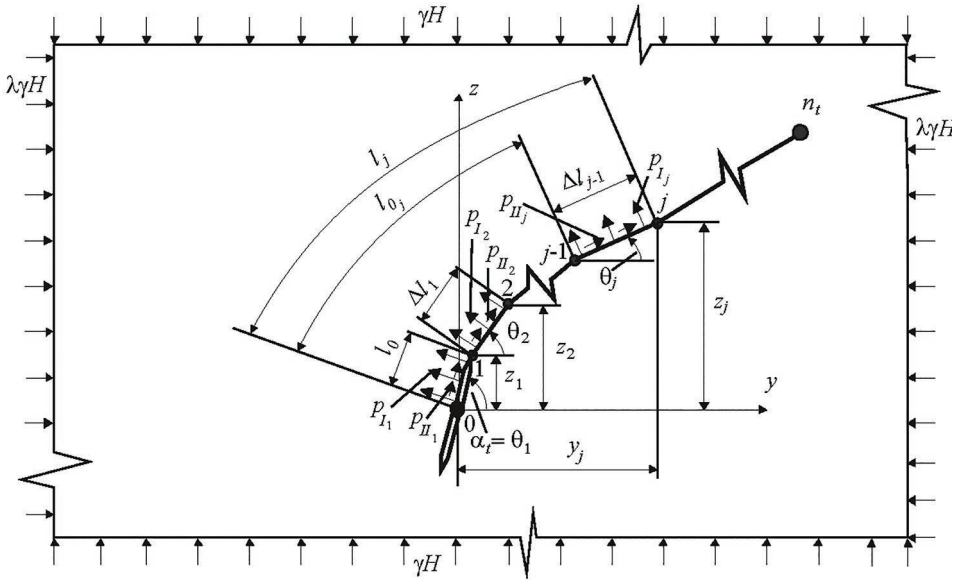

Рисунок 2 – Схема траектории движения трещины
Figure 2 – Crack movement trajectory scheme

Из рисунка 2 вытекают следующие рекуррентные соотношения для шага j, используемые в алгоритме расчёта траектории движения гидротрещины.

$$l_j = l_{0j} + \Delta l_{j-1}, \; \theta_j = \theta_{j-1} + \Delta\theta_{cj-1}, \; y_j = y_{j-1} + \Delta l_{j-1} \cdot \cos\theta_j, \; z_j = z_{j-1} + \Delta l_{j-1} \cdot \sin\theta_j,$$

$$p_{nj} = \frac{\gamma H}{2}\left[1 + \lambda + (1-\lambda)\cdot\cos 2\theta_j\right], \; p_{tj} = \frac{(1-\lambda)\gamma H}{2}\cdot\sin 2\theta_j,$$

$$k_I = p_{kpj}\sqrt{\pi l_{0j}} - \frac{1}{\sqrt{\pi l_{0j}}}\left(\pi\Delta l_{j-1}\sum_{j=2}^{j} p_{nj} + \pi l_0 \cdot p_{n1}\right), \; k_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi l_{0j}}}\left(\pi\Delta l_{j-1}\sum_{j=2}^{j} p_{tj} + \pi l_0 \cdot p_{t1}\right),$$

$$p_{kp} = \frac{1}{\sqrt{\pi l_{0j}}}\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi l_{0j}}}\left(\pi\Delta l_{j-1}\sum_{j=2}^{j} p_{nj} + \pi l_0 \cdot p_{n1}\right) + \sqrt{\frac{E\gamma_t}{1-\mu^2} - \left[\frac{1}{\sqrt{\pi l_{0j}}}\left(\pi\Delta l_{j-1}\sum_{j=2}^{j} p_{tj} + \pi l_0 \cdot p_{t1}\right)\right]^2}\right\},$$

$$p^*_{kp} = \frac{\pi}{2\sqrt{l_j}\,\mathrm{arctg}\left(\frac{l_{0j}}{\sqrt{l_j^2 - l_{0j}^2}}\right)}\left\{\begin{array}{l}\frac{1}{\sqrt{\pi l_j}}\left(\pi\Delta l_{j-1}\sum_{j=2}^{j} p_{nj} + \pi l_0 \cdot p_{n1}\right) + \\ + \sqrt{\frac{E\gamma_t}{1-\mu^2} - \left[\frac{1}{\sqrt{\pi l_{0j}}}\left(\pi\Delta l_{j-1}\sum_{j=2}^{j} p_{tj} + \pi l_0 \cdot p_{t1}\right)\right]^2}\end{array}\right\}.$$

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже приведены графические результаты вычислительного эксперимента. За исходные данные в нём приняты следующие параметры массива: γ=25 *кН/м*^{3}, H=800 *м*, λ=0,7, γ_t=0,0087 *МПа·м*, l_0=0,1 *м*, конечная полудлина l_k=3 *м*. Остальные данные в ходе эксперимента менялись. Координаты концов начальной трещины определяются по формулам $y=\pm l_0 cos\alpha_t$, $z=\pm l_0 sin\alpha_t$.

В качестве демонстрации проведённых исследований на рисунках 3а, 3б цифрой 1 показана началь-

ная трещина, расположенная под углом $\alpha_t=30°$ к горизонту, а цифрой 2 обозначена траектория её движения, построенная при двух значениях N_{sk} числа скачков. Из рисунка следует, что траектории трещины нелинейны, и они не совпадают с первоначальным её направлением, однако в обоих случаях распространяются вдоль горизонтальной координатной оси, причём чем больше скачков увеличения длины, тем быстрее траектория стремится к горизонту, и тем более она проявляет свою нелинейность. С увеличением числа скачков в траектории трещины проявляется периодичность.

На рисуннках 3в, 3г приведены графики зависимости критических давлений, построенные при указанных значениях числа скачков от длины растущей трещины. Кривая 1 – это график изменения p_{kp} с ростом длины трещины от исходного значения l_0, и он соответствуют моментам её страгивания, а координатами кривой 2 являются значениями p^*_{kp} и длина растущей трещины l.

Механизм развития трещины следующий. При достижении нагнетаемой жидкостью давления p_{kp} (рис. 3в) трещина находится в неустойчивом равновесии. На рисунке это состояние соответствует точке A, расположенной в начале кривой 1. Для прорастания трещины на величину Δl необходимо повысить давление до значения p^*_{kp}, и в этом случае точка A скачком переместится в точку B, принадлежащую кривой 2. При скачкообразном увеличении длины трещины, жидкость распространяется по увеличивающемуся объёму, при этом её давление падает. В результате точка B перемещается в точку C. Для следующего шага прорастания трещины необходимо повысить давление в точке C до давления в точке D, а из точки D давление скачкообразно уменьшается до давления в точке F. Этот процесс продолжается до полного прорастания трещины на заданную длину. Последовательность увеличения длины трещины путём перехода с одной кривой на другую на рис. 3 в показана стрелками.

Отметим три важных момента. Во-первых, меньшему числу скачков соответствует большее значение p^*_{kp} при первом скачке прорастания трещины. Во-вторых, значения первого и второго критического давлений на первом шаге прорастания трещины отличаются друг от друга в несколько раз. В-третьих, с увеличением дли-

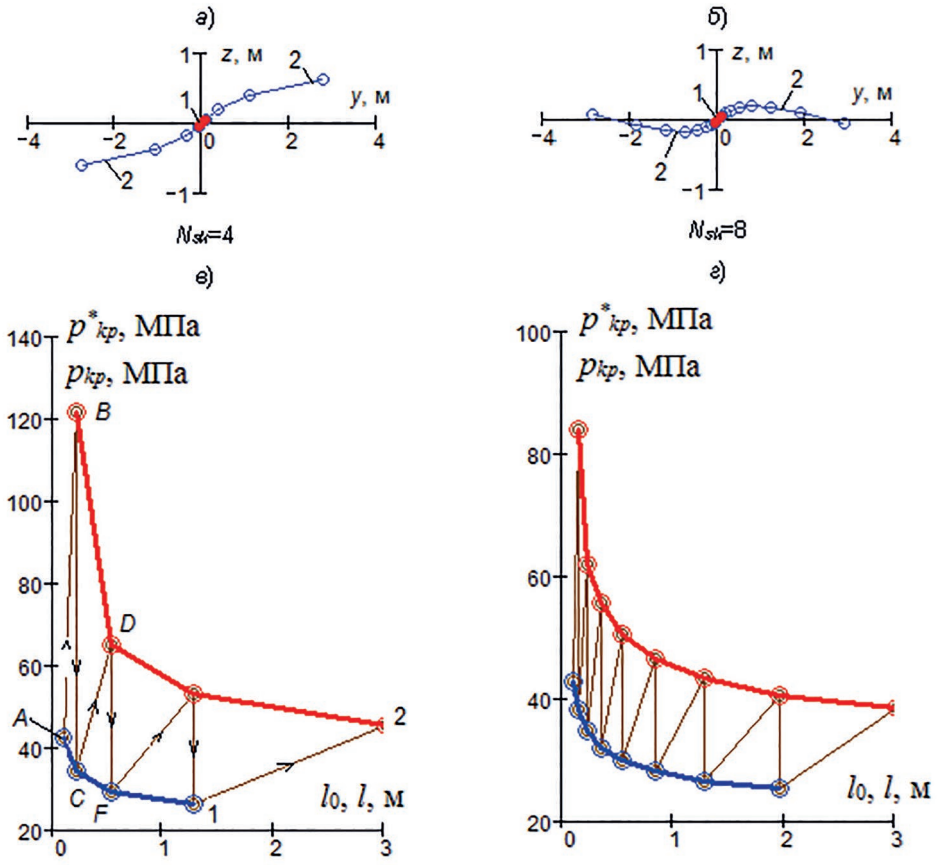

Рисунок 3 – Траектории трещины и графики критических давлений, соответствующие $\alpha_t=30°$
Figure 3 – Crack trajectories and critical stress graphs corresponding to $\alpha_t=30°$

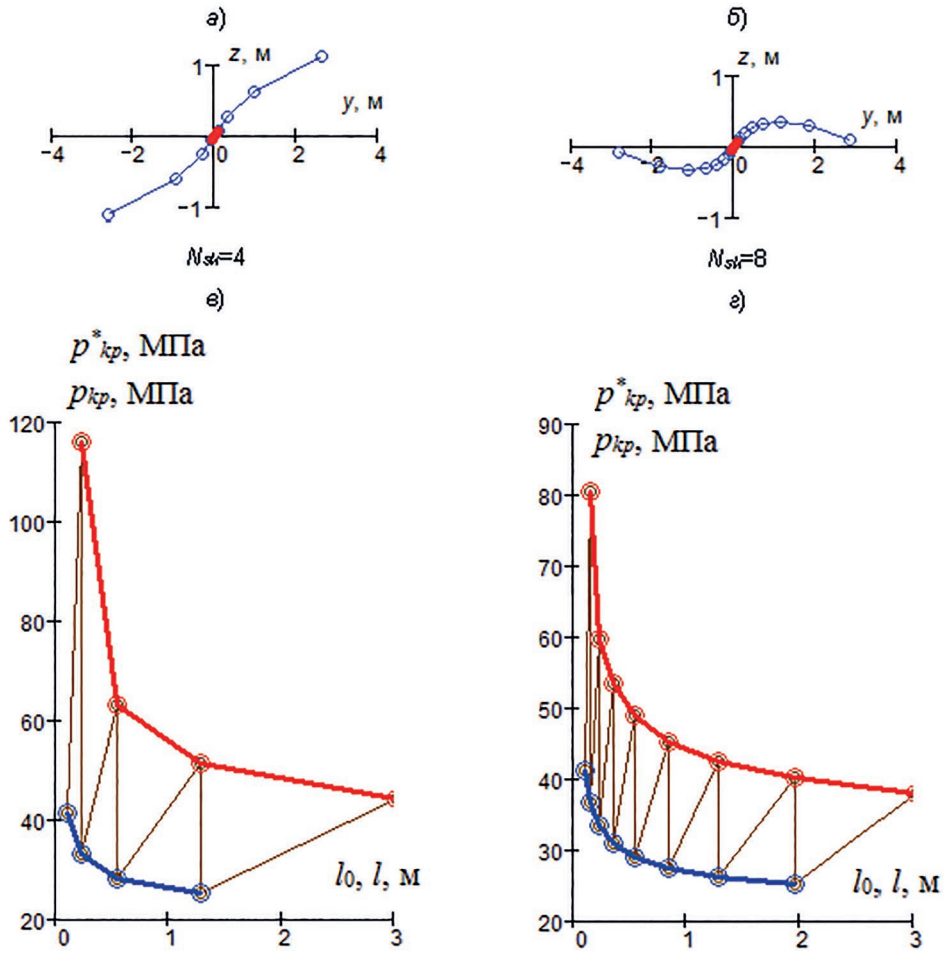

Рисунок 4 – Траектории трещины и графики критических давлений, соответствующие α_t=45°
Figure 4 – Crack trajectories and critical stress graphs corresponding to α_t=45°

ны трещины оба критических давления резко уменьшаются, и при значительной её длине эти уменьшения становятся небольшими.

На рисунке 4 представлены траектории движения трещины и графики критических давлений, построенные при угле наклона начальной трещины к горизонту под углом *45°*, причём на фрагментах а, в данного рисунка они соответствуют $N_{sk}=4$, а на фрагментах б, г – $N_{sk}=8$.

Из рисунка следует, что картины траекторий движения трещины по сравнению с траекториями рисунка 3 качественно не изменились, однако уменьшился период траектории трещины при $N_{sk}=8$. Что касается графиков критических давлений, то их ординаты уменьшились по сравнению с ординатами этих давлений, построенных на рисунке 3 при $\alpha_t=30°$.

Из сравнения графиков верхних критических давлений, представленных на рисунках 3, 4, следует, что их ординаты зависят от количества скачков приращения длины трещины при её прорастании, и особенно это касается первых значений p^*_{kp}.

В этой связи на рисунке 5 построены графики зависимости верхних критических давлений, соответствующих первому скачку прорастания трещины (кривая 1) и последнему скачку (кривая 2) от количества скачков N_{sk}. Угол наклона начальной трещины $\alpha_t=30°$.

Графики представляют собой плавные вогнутые убывающие кривые. Из них следует, что прорастание трещины происходит при сравнительно большом давлении жидкости.

4. ВЫВОДЫ:

1. Траектория скачкообразного прорастания наклонённой к горизонту одиночной «зародышевой» трещины, находящейся под внутренним давлением, определяется рядом факторов. В неравнокомпонентном поле напряжений (коэффициент бокового давления меньше единицы) нагруженного массива горных пород движение трещины, длина которой увеличивается экспоненциально, происходит по нелинейной траектории. Её нелинейный характер в большей

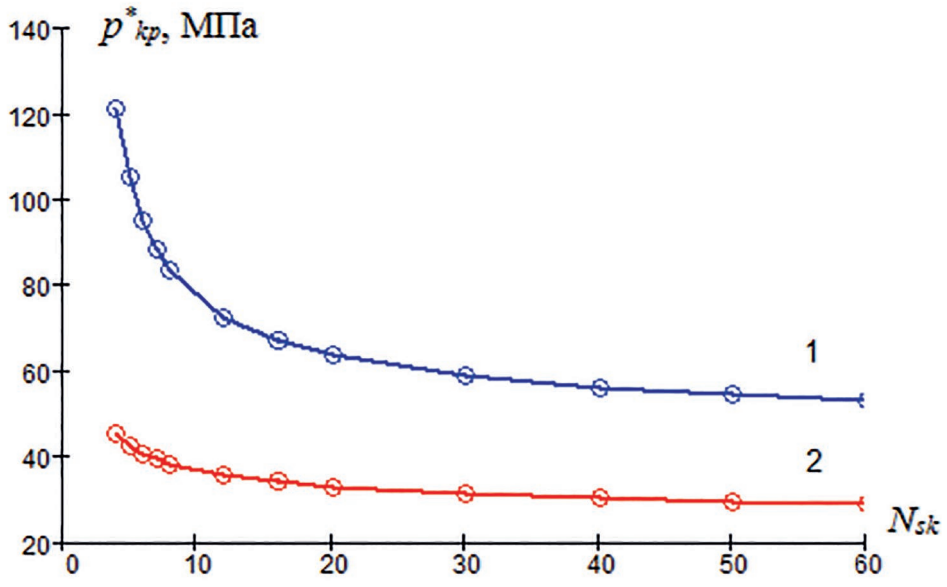

Рисунок 5 – График зависимости критического давления p^*_{kp} от числа скачков N_{sk}
Figure 5 – Critical stress p^*_{kp} dependence graphs of jump number N_{sk}

степени проявляется с увеличением числа скачков акустической эмиссии. Причём, независимо от угла наклона, трещина распространяется вдоль горизонтальной линии, перпендикулярной максимальному главному напряжению исходного гравитационного поля.

2. С увеличением количества скачков растущей трещины траектория её движения приобретает гармоническую составляющую, период которой зависит ещё и от угла наклона начальной трещины.

3. Верхнее критическое давление, при котором происходит прорастание трещины, зависит от количества скачков приращения длины трещины. Связь между этими параметрами нелинейная. Зависимость же критических давлений от угла наклона «зародышевой» трещины незначительна.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).
The study was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant(project No. 17-17-01143).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
2. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
3. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Разработка модели геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 11. С. 41□45.
4. Чернов О. И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.
5. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В., Назаров Н.Ю. Некоторые особенности управления метанообильностью высокопроизводительного выемочного участка // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 9. С. 322–325.
6. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогеомеханических процессов на выемочном участке шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 2. С. 28–35.
7. Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л., Михайлов А.Ю. Экономическая эффективность реализации новых нормативных требований по вскрытию и подготовке склонных к самовозгоранию угольных пластов // Горная промышленность. 2016. № 1 (125). С. 54–57.
8. Варфоломеев Е.Л., Борисов И.Л. Технология разработки мощного пласта системой параллельных камер шириной до 6,0 м по каждому слою с погашением межкамерных целиков // Вестник КузГТУ. 2014. № 5. С. 40–43.
9. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко. Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. 524 с.
10. Христианович С.А. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981. 484 с.
11. Мыртынюк В.А., Павлов В.А., Сердюков С.В. Комплексное использование гидроразрыва и деформационных измерений в оценке напряжённого состояния массива проницаемых горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №. 2. С. 155–163.
12. Шадрин А.В. Сейсмоакустическая реакция угольного массива на процесс его гидрообработки // ФТПРПИ. 1983. № 6. С. 29–34.

13. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1984. 560 с.
14. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.
15. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
16. Шадрин А.В., Зыков В.С. Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов. Обзорная информация. М.: ЦНИЭ-Иуголь, 1991. 43 с.

REFERENCES

1. Petukhov, I.M., & Linkov, A.M. (1983). *Mekhanika gornykh udarov i vybrosov [Rock shocks and outbursts mechanics].* Moscow: Nedra [in Russian].
2. Fisenko, G.L. (1976). *Predelnyie sostoiania gornykh porod vokrug vyrabotok [Limiting conditions of rocks around openings].* Moscow: Nedra [in Russian].
3. Cherdantsev, N.V., & Cherdantsev, S.V. (2014).Razrabotka modeli geomekhanicheskogo sostoyaniya ugleporodnogo massiva, vmeshchayushchego plastovuyu vyrabotku [Development of a model for the geomechanical state of a coal-bearing massif containing a seam opening]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti – Industrial Labor Safety, 11*, 41-45 [in Russian].
4. Chernov, O.I., & Puzyrev, V.N. (1979). *Prognoz vnezapnykh vybrosov uglia i gaza [Sudden coal and gas outbursts' forecast].* Moscow: Nedra [in Russian].
5. Kozyreva, Ye.N., Shinkevich, M.V., & Nazarov, N.Yu. (2011). Nekotorye osobennosti upravleniya metanoobilnostiu vysokoproizvoditelnogo vyemochnogo uchastka [Some management features of the high methane inflow high-performance coal extraction section]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 9,* 322-325 [in Russian].
6. Kozyreva, Ye.N., & Shinkevich,M.V., (2010). Osobennosti gazogeomekhanicheskih processov na vyemochnom uchastke shahty [Features of gas geomechanical processes at the mine coal extraction section]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 2*, 28-35 [in Russian].
7. Varfolomeev, Ye.L, Borisov,I.L., & Mikhailov,A.Yu. (2016) Ehkonomicheskaya ehffektivnost realizatsii novykh normativnykh trebovanii po vskrytiyu i podgotovke sklonnyh k samovozgoraniyu ugolnyh plastov [Economic efficiency of new regulatory requirements implementation for the opening and preparation of coalbeds prone to spontaneous combustion]. *Gornaya promyshlennost – Coal Mining, 1(125)*, 54-57 [in Russian].
8. Varfolomeev, Ye.L., & Borisov, I.L. (2014). Tekhnologiya razrabotki moshchnogo plasta sistemoj parallelnyh kamer shirinij do 6,0 m po kazhdomu sloyu s pogasheniem mezhkamernyh tselikov [The technology of developing a thick seam with a system of parallel chambers up to 6.0 m wide for each layer with extraction of the inter-chamber pillars]. *Vestnik KuzGTU – KuzGTU Herald, 5,* 40-43 [in Russian].
9. Klishin, V.I., Zvorygin, L.V., Lebedev, A.V., & Savchenko, A.V. (2011). *Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoi razrabotki ugolnykh mestorozhdenii [Safety problems and new methods of underground coal reserves development].* Novosibirsk: Novosibirski pisatel [in Russian].
10. Khristianovich, S.A. (1981). *Mekhanika sploshnoi sredy [Continuum mechanics].* Moscow: Nauka [in Russian].
11. Martyniuk, V.A., Pavlov, V.A, & Serdiukov, S.V. (2013). Kompleksnoe ispolzovanie gidrorazryva i deformacionnykh izmerenii v otsenke napryazhyonnogo sostoyaniya massiva pronitsaemykh gornykh porod [Comprehensive use of hydraulic fracturing and deformation measurements in the evaluation of permeable rock massif stressed state]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 2,* 155-163 [in Russian].
12. Shadrin, A.V. (1983). Seismoakusticheskaya reatsiya ugolnogo massiva na protsess ego gidroobrabotki [Seismoacoustic reaction of a coal massif to the process of its hydrotreatment]. *FTPRPI 6,* 29-34 [in Russian].
13. Sedov, L.I. (1984). *Mekhanika sploshnoi sredy [Continuum mechanics].* Moscow: Nauka [in Russian].
14. Kachanov, L.M. (1974). *Osnovy mekhaniki razrushenia [Destruction mechanics grounds].* Moscow:Nauka [in Russian].
15. Khellan, K. (1988). *Vvedeniie v mekhaniku razrusheniia [Introduction into destruction mechanics].* Moscow: Mir [in Russian].
16. Shadrin, A.V., & Zykov, V.S. (1991). *Akusticheskaia emissia vybrosoopasnykh plastov. Obzornaia informatsia. [Acoustic emission of outburst prone seams. Review].* Moscow: CNIEIugol [in Russian].