

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РАСКЛИНИВАЮЩЕЙ ТРЕЩИНЫ В НАРУШЕННОМ МАТЕРИАЛЕ

Статья посвящена разработке критериев развития расклинивающих трещин в плоскости. Установлены зависимости коэффициента интенсивности напряжений первого рода от физико-механических свойств материала, длины нагружения и расстояния до наклонной трещины. Адекватность результатов моделирования подтверждалась аналитическими исследованиями.

В настоящее время в нефтяной и угольной промышленности получил достаточное развитие новый способ разрушения горных пород – флюидоразрыв [1]. При заполнении протяженных щелей материалом с заданными физическими свойствами появляется перспектива создания новых способов и геотехнологий различного назначения. Флюидоразрыв – это направленное разрушение горного массива с помощью трещин разрыва, где давление создается флюидами жидкости или пластической массы. Свое практическое применение флюидоразрыв находит для:

- цементации породного массива, что приводит к устойчивости подземных выработок;
- добычи полезных ископаемых, т.е. для выемки ценного минерального сырья при открытой и подземной разработке;
- новых способов управления горным давлением и состоянием массива, включая охрану выработок, борьбу с горными ударами, внезапными выбросами угля, породы, соли и газа;
- разупрочнения массива горных пород, добычи блочного камня;
- повышения эффективности таких процессов, как дренирование воды и газа, тампонаж пород и др.

Аналитические и численные решения по формированию трещин разрыва в горных породах изучены недостаточно. Одно из первых исследований по формированию трещин разрыва было опубликовано в работе [2]. В этом труде был разработан критерий развития трещины нормального разрыва плоскости для однородного материала в условиях плоской деформации, который имел следующий вид:

$$K_I = \frac{G \cdot h \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{l} \cdot \pi(1-\nu)}, \quad (1)$$

где  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжения первого рода, Н/м<sup>3/2</sup>;

$G$  – модуль сдвига;

$l$  – длина трещины, м;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Все остальные исследования проводились путем физического моделирования на образцах из эквивалентных материалов. Основной целью экспериментов являлась установка того, как будет протекать взаимодействие трещины флюидоразрыва с естественной трещиной. В итоге было определено, что пересечение щелью естественной трещины горного массива в основном зависит от его деформационных свойств, величины угла между плоскостями щели и трещины, а также давления флюида [3].

Целью данной работы является разработка критериев разрушения:

- плоскости с различной длиной нагружения магистральной трещины;
- массива расклинивающей трещиной на плоскости, нарушенной естественной трещиной.

На рис. 1 приведена схема, моделирующая развитие расклинивающей трещины в сплошном материале при изменении длины нагружения  $b$ . Формирование расклинивающей трещины направлено в сторону  $OB$ .

Краевые условия имели следующий вид:

$$u_h = h, \sigma_s = 0 \quad \text{при } y = 0, A \leq x \leq O;$$

$$\sigma_s = 0, \sigma_n = 0 \quad \text{при } y = 0, O \leq x \leq B,$$

где  $h$  – заданная величина.

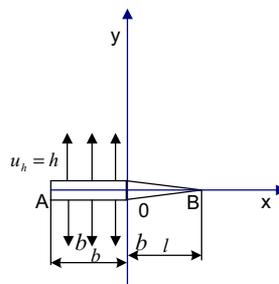


Рисунок 1. Схема, моделирующая развитие трещины нормального разрыва в сплошном материале

Реализация модели осуществляется методом граничных элементов [4].

Граничные интегральные уравнения для данной задачи приводились к следующей системе линейных уравнений:

$$0 = (\sigma_s^i)_0 = \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j, \quad i = \overline{1, N};$$

$$h = (u_n^i)_0 = \sum_{j=1}^N B_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^{ij} D_n^j, \quad i = \overline{1, M};$$

$$0 = (\sigma_n^i)_0 = \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j, \quad i = M+1, N,$$

где  $N$  – количество всех граничных элементов;

$M$  – количество граничных элементов, на которые разбивается участок АО;

$D_{nj}, D_{sj}$  – компоненты разрывов смещений  $j$ -го отрезка трещины в нормальном и касательном направлениях соответственно;

$u_n^i$  – нормальные перемещения;

$\sigma_s^i, \sigma_n^i$  – касательные и нормальные напряжения на границе тела соответственно;

$B_{ssij}, B_{snij}, B_{nsij}, B_{nnij}$  – фундаментальные решения.

Коэффициент интенсивности напряжения определялся по следующему критерию [5]:

$$K_I = -\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{G}{2 \cdot (1-\nu)} \cdot \lim_{x \rightarrow l} \frac{D_n}{\sqrt{l-x}}. \quad (2)$$

В результате расчетов был разработан критерий разрушения плоскости с различной длиной нагружения

$$K_I = \frac{G \cdot h \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{1-\nu} \cdot \pi \cdot (1-\nu)} \cdot f(b), \quad (3)$$

где  $b$  – длина нагружения, м.

Функция, характеризующая влияние величин  $b$  на коэффициент интенсивности напряжений первого рода, имела вид:

$$f(b) = 1 - 0,3808 \cdot e^{-0,4631 \cdot b}.$$

На рис. 2 представлена графическая зависимость функции  $f(b)$  от величины  $b$ , которая показывает, что при  $b \geq 0,1$  м критерий роста расклинивающей трещины совпадает с формулой Черепанова.

Расчет показал, что критерий, полученный при помощи численного метода, отличается от аналитического на 3%.

Таким образом, величина нагружения  $b$  оказывает существенное влияние на коэффи-

циент интенсивности напряжения первого рода и длину расклинивающей трещины.

На основе анализа, проведенного выше, рассмотрим модели развития расклинивающей трещины в нарушенном материале (рис. 3). Нарушение материала моделировалось трещиной CD с углами наклона  $\beta = 0^0; 45^0; 90^0$  к оси  $ox$  и расстоянием  $L = 0,5; 1,0; 5,0; 8,0; 15,0$  см, а  $h = 0,00012$  см.

Знак «-» перед  $D_n$  и  $D_s$  соответствует раскрытию трещины, а «+» ее – сжатию.

На рис. 4 приведены результаты изменения нормального и сдвигового раскрытия трещины CD от угла  $\beta = 0^0$  и различных значений длины  $L$ .

В таблице 1 приведена общая схема изменения нормального раскрытия трещины от угла  $\beta = 0^0$  по отношению к оси  $ox$  при фиксированных значениях длины  $L$ .

Анализ результатов моделирования показал, что при увеличении длины  $L$  нормальные раскрытия трещины уменьшаются. Для каждой величины  $L$  процесс раскрытия носит волнообразный характер. Исследования показали, что сдвиговые раскрытия трещины CD равны нулю.

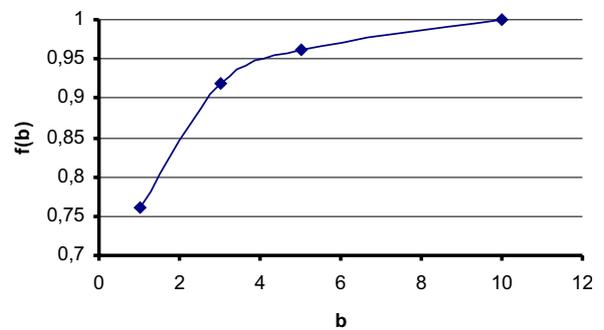


Рисунок 2. График функции  $f(b)$ ,  $1 \leq b \leq 10$  см.

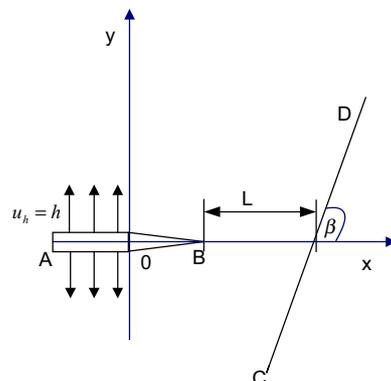


Рисунок 3

На рис. 5 показана графическая интерпретация изменения нормального и сдвигового раскрытия естественной трещины CD от угла наклона  $\beta = 45^\circ$  и различных значений длины L.

В таблице 2 приведены зависимости нормального и сдвигового раскрытия трещины по трем участкам от угла наклона  $\beta = 45^\circ$ .

На основании вышеизложенного следует, что при изменении длины L от 0,5 см до

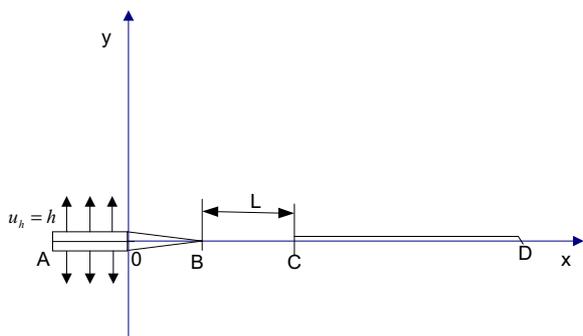


Рисунок 4. Схема изменения нормального и сдвигового раскрытия трещины CD от угла  $\beta = 0^\circ$  и различных значений длины L.

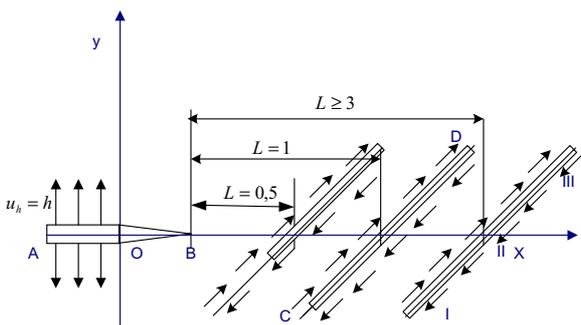


Рисунок 5. Схема изменения нормального и сдвигового раскрытия трещины CD от угла  $\beta = 45^\circ$  и различных значений длины L.

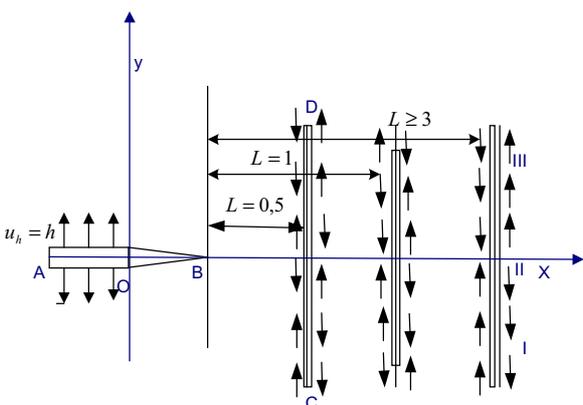


Рисунок 6. Схема изменения нормального и сдвигового раскрытия трещины CD от угла  $\beta = 90^\circ$  и различных значений длины L.

1 см нормальные раскрытия увеличиваются, а при L более 3 см естественная трещина попадает в зону продвижения расклинивающей трещины, что приводит к полному нормальному и сдвиговому ее раскрытию. При удалении природной трещины величины нормального раскрытия трещины уменьшаются. Так при изменении L от 1 до 15 см в среднем раскрытия становятся меньше в 35,113 раз.

Результаты расчетов для угла  $\beta = 90^\circ$  приведены на рисунке 6.

В таблице 3 приведены зависимости изменения нормального и сдвигового раскрытия трещины по трем участкам от угла наклона  $\beta = 90^\circ$  по отношению к оси ox.

Из данных таблицы 3 понятно, что при любом изменении длины L нормальные и сдвиговые раскрытия трещины происходят симметрично по всей длине трещины, как показано на рисунке 6.

В результате расчетов был разработан критерий разрушения массива расклинивающей трещиной на плоскости, нарушенной естественной трещиной, с учетом величины L и угла наклона  $\beta = 45^\circ$

$$K_I = \frac{G \cdot h \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{l \cdot \pi \cdot (1 - \nu)}} \cdot f(L), \quad (3)$$

где L – расстояние от расклинивающей трещины до естественной трещины, м.

Функция, характеризующая влияние расстояния L на величину роста трещины l, имела вид:

$$f(L) = 1 + 0,5026 \cdot e^{-1,268L}.$$

Картина изменения f(L) в материале, нарушенном природной трещиной, с углом наклона  $\beta = 45^\circ$  изображена на рис. 7.

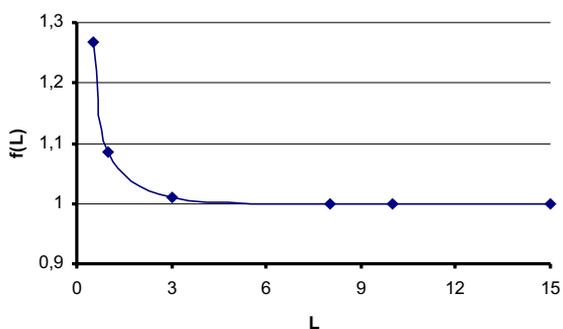


Рисунок 7. График функции  $f(L)$ ,  $0,5 \leq L \leq 15$  см.

Таблица 1. Результаты моделирования нормального раскрытия естественной трещины при различных значениях величины L

N	Dn, см			
	L = 0,5 см	L = 1,0 см	L = 8,0 см	L = 15,0 см
1	-0,00001558	-0,00000910	-0,00000064	-0,00000022
2	-0,00002046	-0,00001236	-0,00000093	-0,00000032
3	-0,00002264	-0,00001405	-0,00000111	-0,00000038
4	-0,00002357	-0,00001495	-0,00000123	-0,00000043
5	-0,00002381	-0,00001538	-0,00000133	-0,00000047
6	-0,00002362	-0,00001549	-0,00000139	-0,00000049
7	-0,00002314	-0,00001538	-0,00000144	-0,00000051
8	-0,00002246	-0,00001511	-0,00000146	-0,00000052
9	-0,00002163	-0,00001470	-0,00000146	-0,00000053
10	-0,00002069	-0,00001419	-0,00000146	-0,00000053
11	-0,00001967	-0,00001360	-0,00000144	-0,00000052
12	-0,00001856	-0,00001293	-0,00000141	-0,00000051
13	-0,00001738	-0,00001219	-0,00000136	-0,00000050
14	-0,00001612	-0,00001137	-0,00000130	-0,00000048
15	-0,00001471	-0,00001049	-0,00000123	-0,00000045
16	-0,00001333	-0,00000951	-0,00000114	-0,00000043
17	-0,00001176	-0,00000843	-0,00000103	-0,00000039
18	-0,00001000	-0,00000720	-0,00000089	-0,00000034
19	-0,00000794	-0,00000570	-0,00000073	-0,00000027
20	-0,00000524	-0,00000380	-0,00000049	-0,00000019

Таблица 2. Результаты моделирования нормального и сдвигового раскрытия естественной трещины от изменения величины L

L, см	Dn, см			Ds, см		
	I	II	III	I	II	III
0,5	0,0000300	-0,0000400	-0,0000149	-0,0000172663	-0,0000248268	-0,0000132510
1,0	-0,0000082	-0,0000347	-0,0000131	-0,0000223637	-0,0000147312	-0,0000069668
8,0	-0,0000013	-0,0000020	-0,0000011	-0,0000000493	-0,0000000307	-0,0000000304
15,0	-0,0000004	-0,0000006	-0,0000004	-0,0000000046	-0,0000000030	-0,0000000034

Таблица 3. Результаты моделирования нормального и сдвигового раскрытия естественной трещины от изменения величины L.

L, см	Dn, см			Ds, см		
	I	II	III	I	II	III
0,5	-0,00000153	-0,00000252	-0,00000153	-0,00000185	0,000001798	0,00000185
1,0	-0,00000208	-0,00001730	-0,00000208	-0,00000127	-0,000000650	0,00000127
8,0	-0,00000121	-0,00000185	-0,00000121	-0,00000015	-0,000000015	0,00000015
15,0	-0,00000041	-0,00000062	-0,00000041	-0,00000003	-0,000000003	0,00000003

На основании вышеизложенного следует, что рост расклинивающей трещины в материале зависит от расположения в нем естественной трещины. Чем ближе расположена природная трещина к расклинивающей, тем больше ускоряется процесс развития последней.

Таким образом, разработанный критерий разрушения горных пород позволяет прогнозировать рост расклинивающей трещины на плоскости, ослабленной естественной трещиной.

**Список использованной литературы:**

1. Чернов О.И. О флюидоразрыве породных массивов / О.И. Чернов, И.Г. Кю // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1988. – №6. С. 81-92.
2. Черепанов Г.П. Механика разрушения горных пород в процессе бурения. – М.: Недра, 1987. – 308 с.
3. Хямляйнен В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.
4. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
5. Линьков А.М. Комплексный метод граничных интегральных уравнений теории упругости. – СПб.: Наука, 1999. – 382 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.07