

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 539.375

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В СЖАТОМ КВАЗИРЕГУЛЯРНОМ БЛОЧНОМ МАССИВЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

П. А. Мартынюк, Е. Н. Шер

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Проанализировано влияние нерегулярности строения сжатого блочного массива на процесс развития трещины гидроразрыва. Исследован предельный случай, когда двусосное поле сжатия является изотропным.

Гидроразрыв, блочный массив, поле сжатия, раскрытие трещин

При проведении гидроразрыва используются частицы проппанта, которые транспортируются по растущей трещине. По окончании процесса давление в трещине сбрасывается, ее берега под действием внешнего сжимающего поля напряжений начинают смыкаться и садятся на частицы проппанта, создавая слой, проницаемый для откачки нефти или газа. В реальных условиях горный массив обладает структурой [1, 2], которая влияет на форму развивающейся трещины. На ней образуются изломы и возможно появление участков, где нормальное раскрытие будет существенно меньше среднего значения раскрытия по длине. Это необходимо учитывать, так как минимальное нормальное раскрытие должно быть не меньше определенного значения, связанного с размерами частиц проппанта. Простой моделью, учитывающей структуру массива, является модель блочной среды. В работе [3] исследовался процесс развития трещины гидроразрыва в сжатом массиве с регулярной блочной структурой. В настоящей работе проводится анализ влияния квазирегулярности строения массива на распространение трещины.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается плоская деформация. В упругой среде имеется начальная прямолинейная трещина, ориентированная по направлению максимального сжатия, которая выходит на границу блочного массива. Полагаем, что левый конец этой трещины находится на скважине, через которую проводится нагнетание жидкости, поэтому трещина сохраняет свою длину.

Общая схема исследуемой задачи изображена на рис. 1а, где прямолинейные участки соответствуют граням блоков. Каждая узловая точка сетки блоков является точкой стыковки трех блоков. Полагается, что при выходе трещины в узловую точку возникают две зародышевые тре-

Работа выполнена по проекту ОНЗ РАН 3.1 и проекту № 11-05-00371 Российского фонда фундаментальных исследований.

щины малой длины, которые в процессе гидроразрыва могут прорасти до следующих узловых точек. Ставится задача: в упругом теле, сжатом на бесконечности напряжениями интенсивностью p и q ($q/p \leq 1$, γ — угол между направлением максимального сжатия p и осью Ox), имеется некоторая система связанных трещин, состоящая из прямолинейных звеньев, которая нагружена изнутри давлением жидкости. Требуется проследить ее дальнейшее развитие в зависимости от основных параметров: поля сжатия, размеров, формы и ориентации блоков. В качестве рабочего флюида принимается идеальная жидкость. Делаются следующие основные предположения:

1) массив считается изотропным упругим телом, так как податливость прослоек между упругими блоками на больших глубинах, где проводится гидроразрыв, достаточно мала;

2) трещина может развиваться только по границам блоков. Условие предельного равновесия берется в виде $K_1 = K_{IC}$, где K_1 — коэффициент интенсивности напряжений в вершине звена трещины, K_{IC} — вязкость разрушения прослоек (считается, что она много меньше вязкости разрушения материала блока).

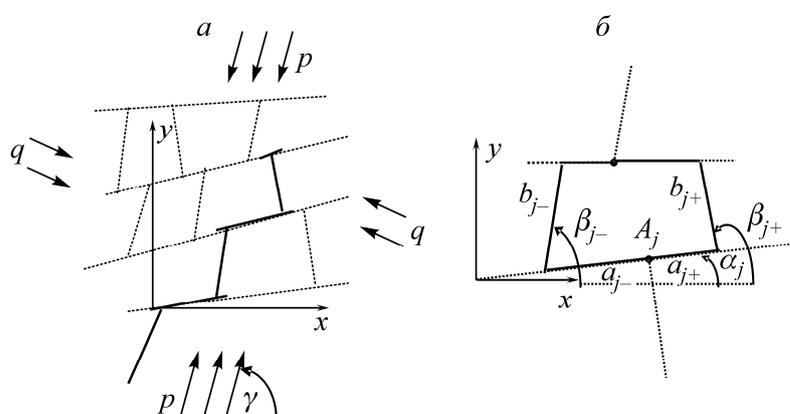


Рис. 1. Схема исследуемой задачи (а) и параметры произвольного блока (б)

Сформулированная задача о равновесном развитии такой системы трещин решается как суперпозиция двух задач. Первая — на бесконечности действует поле сжатия с параметрами p , q , γ , а границы звеньев трещины свободны, т. е. выполняются граничные условия: $\sigma_{nj} = \tau_{sj} = 0$, $j = 1, N$, где N — число звеньев трещины; σ_{nj} , τ_{sj} — нормальные и касательные напряжения. Вторая — напряжения на бесконечности отсутствуют, а на границах трещины $\sigma_{nj} = -p$, $\tau_{sj} = 0$, $j = 1, N$.

Решение этих задач сводится к нахождению решения системы из N комплексных сингулярных интегральных уравнений [3–9]. Система решается численно с использованием квадратурных формул [5]. Дополнительные условия, которые замыкают систему уравнений, — требования ограниченности смещений берегов трещины в узловых точках и условие однозначности определения смещений при обходе контура трещины [1–3, 5, 9]. Развитие системы трещин происходит в равновесном режиме. Существенно, что значение минимального давления закачки жидкости p^* определяется не только выполнением условия предельного равновесия, но и условием протекания — требованием, чтобы нормальные раскрытия всех участков трещины до подрастающего звена были положительными. Задача решается по шагам. На каждом шаге находится критическое значение p^* и звенья системы, в которых выполнены условия продвижения. Эти звенья получают приращение, после чего вновь решается исходная задача для измененной геометрии трещины.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1б изображен произвольный j -й блок. Его геометрия определяется длинами a_{j+} , a_{j-} — правого и левого звена ($l_j = a_{j+} + a_{j-}$ — длина горизонтальной грани блока), α_j — углом наклона грани к оси Ox , b_{j+} , b_{j-} — длинами боковых граней и β_{j+} , β_{j-} — их углами наклона. Точка A_j — узловая. Все перечисленные значения параметров блоков в расчетах разыгрываются с использованием датчика случайных чисел. Полагаем, что блочный массив имеет выделенное направление напластования, определяемое углом α_0 , равным среднему значению углов α_j , при этом $\alpha_j = \alpha_0 \pm \Delta\alpha$. В большинстве проведенных расчетов угол γ меняется от 35 до 55°.

В работе [3] исследовалась регулярная блочная система типа кирпичной кладки, и блоки были прямоугольными. Чтобы оценить влияние отклонения формы блоков от прямоугольной, изменялся случайным образом угол наклона их боковых граней. При этом среднее значение принималось равным 2γ , следовательно, $\beta_j = 2\gamma \pm \Delta\beta$. В частном случае при $\gamma = 45^\circ$ $\beta_j = \pi/2 \pm \Delta\beta$. Параметр b — среднее значение боковых размеров b_{j+} , b_{j-} характеризует среднюю толщину слоев и $b_j = b \pm \Delta b$. Параметр L — средняя длина блоков $l_j = L \pm \Delta L$, a — средняя длина звеньев a_{j+} , т. е. $a_{j+} = a \pm \Delta a$. С учетом того, что K_{IC} для прослоек мало, в работе равновесное давление определялось из условия $K_I \geq 0$. Аналогично, из-за малости размеров частиц проппанта, за условие протекания жидкости по трещине принято, что нормальные раскрытия всех звеньев от нагнетающей скважины до растущего звена $[v(x)]_j \geq 0$. Выполнение обоих критериев определяется геометрией связанной системы трещин и относительными значениями параметров q/p , p^*/p . Критерий по трещиностойкости в принятом виде не зависит от абсолютных размеров блоков при их подобном изменении и от упругих констант E , ν (E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона), так же как и критерий по протеканию. В расчетах размеры блоков приводятся в относительных к масштабу l_0 единицах. Величина l_0 может выбираться в соответствии с параметрами реального блочного массива.

В качестве иллюстрации приведены некоторые результаты численных расчетов при $q/p = 0.5$ ($\alpha_0 = 0$, $\Delta\alpha = 5^\circ$, $\Delta\beta = 20^\circ$) для трех вариантов случайного розыгрыша параметров блоков и трех значений γ : 35, 45, 55°. При этом $L = 7$, $\Delta L = 3$, $a = 4$, $\Delta a = 3$, $b = 2$, $\Delta b = 0.5$. Фактически, учитывая только звенья, участвующие в расчетах, получаем: в первом варианте $a = 4$, $b = 2$, $L = 6.4$; во втором $a = 2.5$, $b = 2.5$, $L = 6.4$; в третьем $a = 4.7$, $b = 2.6$ (либо $b = 2.5$), $L = 7.3$.

Длина подводящей начальной трещины равнялась $l_1 = 9$. На каждом шаге прорастания трещины фиксировалось значение p^*/p . Для всех звеньев трещины находилось их безразмерное раскрытие по длине $[v_1(s)]_j = \frac{[v(s)]_j E}{4(1-\nu^2)pl_0}$. В качестве характеристики раскрытия звеньев принималось их среднее по длине звена раскрытие $v_{*j} = V_j / L_j$ (V_j — объем звена на единицу высоты, L_j — длина j -го звена). Размерное усредненное по длине звена раскрытие $\overline{[v(s)]}_j = \frac{4(1-\nu^2)pl_0}{E} v_{*j}$. Например, при $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па, $p = 2 \cdot 10^7$ Па, $\nu = 0.3$, $l_0 = 0.5$ м получаем $\overline{[v(s)]}_j = 1.21v_{*j}$ (мм).

На рис. 2а представлены результаты расчетов развития магистральной трещины для $\gamma = 35^\circ$. Значение $p^*/p \approx 0.64$ имеет тенденцию несколько уменьшаться с ростом длины магистральной трещины (с увеличением числа звеньев). Обозначим $\max(v^*)_B$, $\min(v^*)_B$, $\max(v^*)_Г$, $\min(v^*)_Г$ наибольшие и наименьшие средние по длине раскрытия на вертикальных и горизонтальных участках. На момент окончания счета $\max(v^*)_B = 2 - 2.4$ в первом и третьем вариантах, а $\max(v^*)_B / \max(v^*)_Г = 3.5 - 5$. Минимальные раскрытия получаются на горизонтальных участках и примерно в 20–30 раз меньше $\max(v^*)_B$. Это объясняется тем, что горизонтальные звенья примерно в 2 раза длиннее вертикальных и по ним происходит сдвиг, который увеличивает раскрытие вертикальных звеньев. Кроме того, σ_{n0} (нормальные сжимающие напряжения, порожденные внешним полем) на вертикальных звеньях часто меньше, чем на горизонтальных. Во втором варианте, где $a/b \approx 1$, $\max(v^*)_B / \max(v^*)_Г = 0.9/0.6 = 1.5$ и $\max(v^*)_B / \min(v^*)_Г \approx 10$.

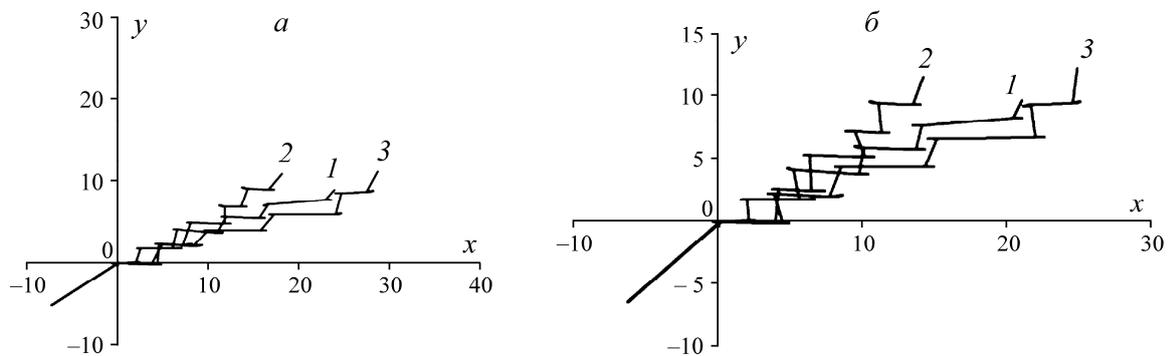


Рис. 2. Магистральные трещины при $\gamma = 35^\circ$ (а) и при $\gamma = 45^\circ$ (б): 1–3 — номер варианта

На рис. 2б изображены магистральные трещины для $\gamma = 45^\circ$. Все параметры блоков такие же, как и в случае $\gamma = 35^\circ$, только соответствующие углы β_j увеличены на 20° . Приведем некоторые характерные значения: критическое давление $p^*/p \approx 0.7$; в первом варианте $\max(v^*)_B / \max(v^*)_Г = 2.6/0.8 = 3.25$; во втором $\max(v^*)_B / \max(v^*)_Г = 1.3/0.8 = 1.6$; в третьем $\max(v^*)_B / \max(v^*)_Г = 3.6/0.6 = 6$. Все изложенное выше (для $\gamma = 35^\circ$) справедливо и в этом случае. Для большинства звеньев системы трещин $p^* < |\sigma_{n0}|$.

На рис. 3 показан результат расчета для третьего варианта, когда угол между направлением действия p и направлением напластования $\gamma = 55^\circ$. Здесь развиваются дополнительные горизонтальные звенья, которые дорастают иногда до узловых точек, но обычно в дальнейшем подводящие к ним участки трещины смыкаются и их развитие прекращается. Значение $p^*/p \approx 1$ имеет тенденцию к росту с увеличением числа звеньев в системе. Максимальные раскрытия v_{*j} на вертикальных и горизонтальных участках примерно равны $v_{*j} \in (5.5 - 8)$ и относятся к средней части трещины.

Здесь приведены результаты расчетов, выполненные для значения отношения $q/p = 0.5$, но для всех $q/p \leq 0.9$ картина развития системы трещин во всех трех вариантах не меняется. Последовательно развиваются и тормозятся одни и те же звенья магистралей, что и при $q/p = 0.5$. С увеличением отношения q/p несколько возрастает критическое давление в жидкости и уменьшается раскрытие звеньев системы. Так, при $q/p = 0.9$ раскрытие соответствующих участков трещины примерно в 5 раз меньше, чем при $q/p = 0.5$.

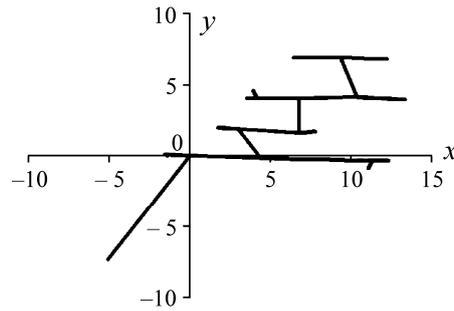


Рис 3. Результирующая трещина при $\gamma = 55^\circ$

Многочисленные расчеты показали, что при $\gamma = 35 - 45^\circ$ и $q/p \leq 0.9$ зародышевые трещины, не входящие в магистральную, практически не развиваются, т. е. магистральная трещина имеет ступенчатую форму. На рис. 4а изображена серия магистральных трещин, соответствующих $\gamma = 45^\circ$, $b = a = 2.5$, $\Delta\alpha = 5^\circ$, $\Delta\beta = 20^\circ$, $\beta = \pi/2 \pm \Delta\beta$, $\Delta a = 1.5$ и $\Delta b = 0.5$. Усредненные координаты правых концов трещин равны $\bar{x} = 26.08$, $\bar{y} = 24.21$, а их дисперсия и среднеквадратическое отклонение составит $D = 4.36$, $\sigma = 2.09$. Средний угол наклона траекторий к горизонтальной оси $\varphi = 42.87^\circ$. Для регулярной системы блоков, когда $a/b = 1$, угол $\varphi = 45^\circ$ [3].

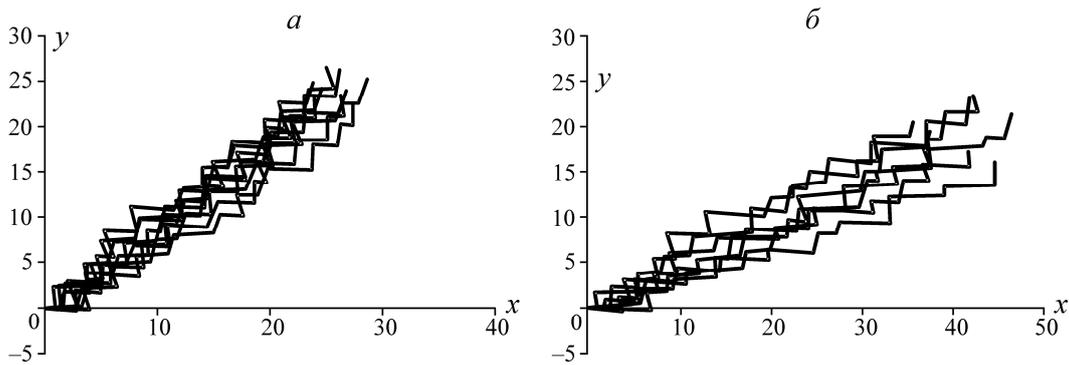


Рис. 4. Серия магистральных трещин при $\gamma = 45^\circ$: а — $a/b = 1$; б — $a/b = 2$

На рис. 4б приведена аналогичная серия трещин, соответствующих $\gamma = 45^\circ$, $b = 2$, $a = 4$, $\Delta\alpha = 5^\circ$, $\Delta\beta = 20^\circ$, $\Delta a = 3$ и $\Delta b = 1$. В этом случае имеем $\bar{x} = 41.88$, $\bar{y} = 19.18$, $\varphi = 24.61^\circ$, $D = 15.74$ и $\sigma = 3.97$. Для регулярной системы блоков, когда $a/b = 2$, угол $\varphi = 26.6^\circ$. Если уменьшить разброс значений углов наклона боковых граней блоков, приняв $\Delta\beta = 5^\circ$, то получаем $\varphi = 25.15^\circ$, $D = 17.32$, $\sigma = 4.16$. Основное влияние на дисперсию оказывают интервалы изменения горизонтальных и вертикальных размеров блоков. Так, для последнего случая, если взять $\Delta a = 1$, $\Delta b = 0.5$, то получаем $\varphi = 25.78^\circ$, $D = 3.7$, $\sigma = 1.92$.

При $q/p \rightarrow 1$ начинают развиваться зародышевые трещины, не входящие в магистральную. Они могут дорастать до узловых точек. В целом трещина сохраняет ступенчатую форму, но имеет дополнительные звенья, длины которых соизмеримы с размерами блоков. Как предельный случай подробно исследован вариант, когда $q/p = 1$. С использованием датчика случайных чисел построена сетка блоков, для которой $\alpha_0 = \Delta\alpha = 0$, $\beta = 90 \pm 20^\circ$, $l \in [4 - 9]$, $a_+ \in [1 - 6.6]$. Толщина слоев постоянная и равняется 2.

На рис. 5 показан процесс последовательного развития гидроразрыва в такой системе блоков. Отметим, что система трещин развивается при постоянном критическом давлении $p_* = 1.005 p$.

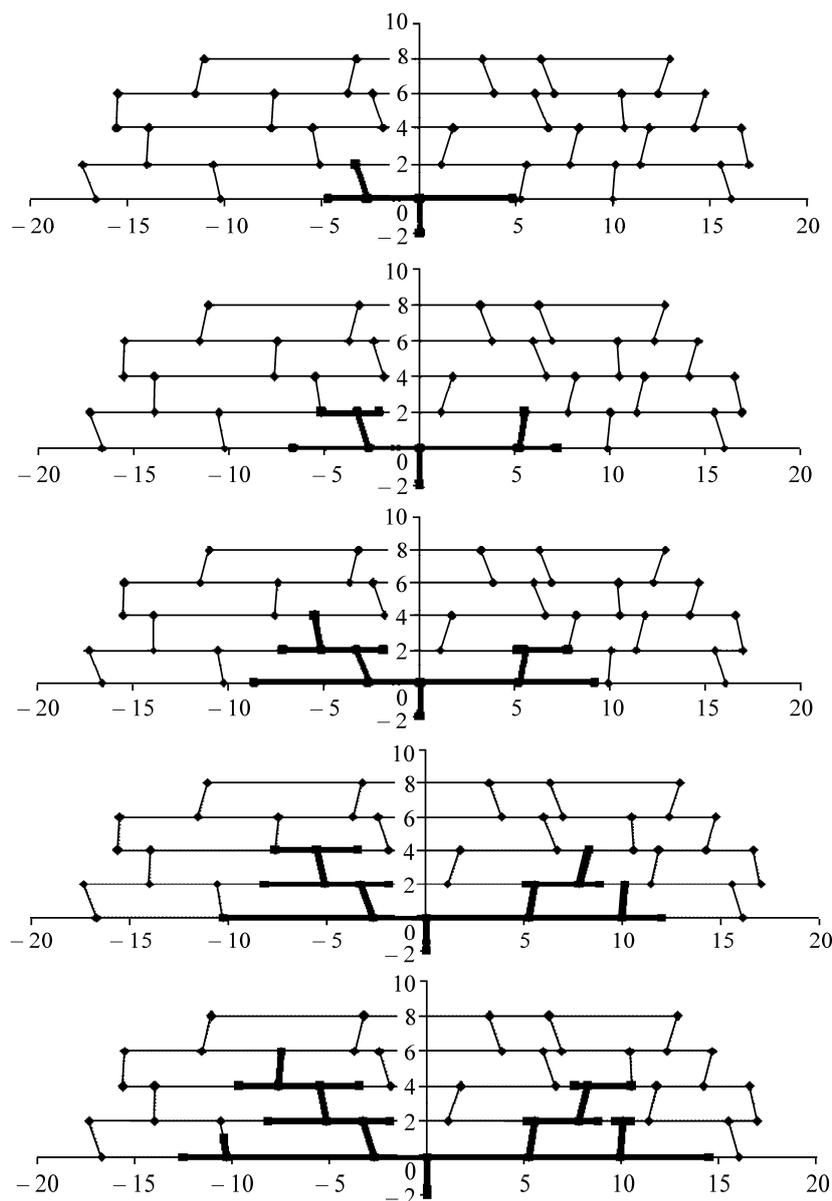


Рис. 5. Последовательный процесс обводнения блочного массива ($q/p = 1$)

Картина развития системы трещин не меняется при изменении угла наклона подводящей трещины в интервале $35-145^\circ$. Максимальные раскрытия получаются на горизонтальных звеньях, лежащих на оси Ox , и возрастают с увеличением числа звеньев. Так, на момент окончания счета $\max(v_*)_r \approx 0.06-0.04$. В средней части ступенчатых трещин раскрытия горизонтальных и вертикальных участков примерно одинаковые: $v_* = 0.015-0.02$. Заметим, что жидкость не обтекает блоки — смыкаются соответствующие зародышевые трещины либо подводящие звенья. В данном случае происходит обводнение блочного массива, заключенного между левой и правой “квазиступенчатыми” трещинами и трещинами, растущими по горизонтальной оси. С них в эту область прорастает множество дополнительных трещин — горизонтальных и вертикальных.

На рис. 6 представлена система трещин ($N = 25$) для другой блочной среды, в которой $\beta = 90 \pm 10^\circ$, $l \in [4-6]$, $a_+ \in [1-4.5]$. Все изложенное выше справедливо и в данном варианте.

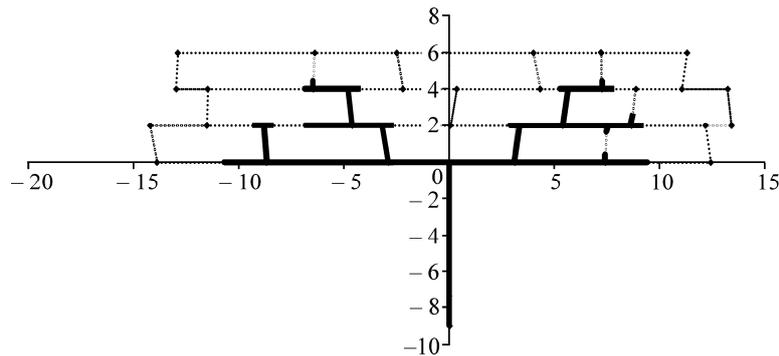


Рис. 6. Обводнение другой системы блоков

ВЫВОДЫ

Полученные результаты согласуются с данными работы [3], когда структура блочной среды приближается к регулярной. Установлено, что с увеличением угла $\gamma - \alpha_0 > 70^\circ$ между направлением максимального сжатия и направлением слоистости появляется возможность развития побочных зародышевых трещин вплоть до узловых точек и форма получаемой трещины гидроразрыва может существенно отличаться от ступенчатой. При $\gamma - \alpha_0 < 30^\circ$ развитие результирующей трещины будет идти по направлению напластования.

С увеличением отношения q/p в интервале $0.5 \leq q/p \leq 0.9$ форма итоговой трещины не меняется — растут одни и те же зародышевые трещины, но для их продвижения требуются большие значения предельного давления жидкости, а средние раскрытия звеньев трещины уменьшаются. В общем случае максимальные и минимальные раскрытия звеньев трещины не коррелируют со значениями сжимающих напряжений на этих звеньях, вызванных внешним полем сжатия. При $q/p \rightarrow 1$ почти все зародышевые трещины развиваются. В предельном случае $q/p = 1$ появляется зона обводнения, которая ограничена двумя ступенчатыми трещинами и трещинами, расположенными на горизонтальной оси. В этой области развивается множество горизонтальных и вертикальных трещин, но замкнутых контуров не получается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4.
2. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / отв. ред. М. А. Гузев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
3. Мартынюк П. А., Шер Е. Н. Развитие трещины гидроразрыва в сжатом блочном массиве // ФТПРПИ. — 2010. — № 5.
4. Мартынюк П. А. Особенности развития трещин гидроразрыва в поле сжатия // ФТПРПИ. — 2008. — № 6.
5. Саврук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. — Киев: Наук. думка, 1981.
6. Панасюк В. В., Саврук М. П., Дацьшин А. П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. — Киев: Наук. думка, 1976.
7. Осив П. Н., Саврук М. П. Определение напряжений в бесконечной пластине с ломаной или ветвящейся трещиной // ПМТФ. — 1983. — № 2.
8. Саврук М. П., Осив П. Н., Прокопчук Н. В. Численный анализ в плоских задачах теории трещин. — Киев: Наук. думка, 1989.
9. Мартынюк П. А., Шер Е. Н. Особенности формирования трещин отрыва в горных породах при сжатии // ФТПРПИ. — 2004. — № 6.

Поступила в редакцию 14/II 2014