Записки Ленинградского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т 125, Л., 1991

УДК 622.235

О ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПРИ ВЗРЫВЕ В СКАЛЬНОЙ ПОРОДЕ

В.Я.ЧЕРТКОВ

В работах [3–5] обсуждался подход к прогнозу комплекса характеристик взорванной горной массы, основанный на локальной вероятностной связи трещин с осколками породы [6,7] и на использовании полуэмпирических выражений для трещиноватости, естественной [6] и наведенной взрывом [8]. Инженерное обоснование подхода и его обоснование на уровне физического эксперимента рассматривалось соответственно в работах [4,8] и [9]. В статье дано теоретическое обоснование выражений, описывающих трещиноватость как функцию размера трещин [3–9]. В центре внимания – построение модели, позволяющей количественно оценивать трещиноватость хрупкой среды как функцию времени и функционал напряжений. Модель проверяется численным путем на основе экспериментальных данных [2] по средней концентрации микротрещин в сливающихся сколах. С учетом связи трещиноватости с вероятностью дробления [6,7] сформулированы условия одно- и многократного дробления породы под действием напряжений. Кроме того, проведено сопоставление трещиноватости, рассчитанной на основе предлагаемой модели и на основе полуэмпирических выражений [4,6,8].

Вероятность образования трещин. Рассмотрим объем первоначально монолитной породы, в котором под действием статистически однородных напряжений происходит множественное трещинообразование. Для такой ситуации можно ввести среднюю по времени t_σ действия напряжений концентрацию $N(x, t_\sigma)$ трещин размера x любой ориентации и безразмерную величину

$$I(x, t_\sigma) = N(x, t_\sigma)\, x^3, \qquad (1)$$

названную в работе [6] трещиноватостью. Как $N(x,t_\sigma)$, так и $I(x,t_\sigma)$, вообще говоря, растут со временем. С помощью соотношения

$$N(x, t_\sigma) = P(x, t_\sigma) / V_*(x) \qquad (2)$$

(здесь $V_*(x)$ – объем, занимаемый трещиной) введем также растущую со временем вероятность $P(x,t_\sigma)$ образования трещины размером x к моменту t_σ в произвольном месте объема породы (однородное нагружение). Согласно (1)

и (2) вычисление трещиноватости, возникающей к данному моменту, сводится к вычислению вероятности $F(x,t_\sigma)$, которая может быть представлена в виде суммы вероятностей $dP(x)$ каждого из независимых возможных путей, ведущих к образованию трещины в условиях множественного трещинообразования.

Переход от микротрещин к макротрещинам. Множественное трещинообразование предполагает образование в объеме большого количества трещин различного размера, малого, однако, по сравнению с характерным размером объема. Качественно возможный механизм растрескивания в случае множественного трещинообразования (взрывного или естественного, несмотря на разные масштабы этих явлений) сводится к преимущественному образованию трещин любого размера за счет слияний в скоплениях микротрещин, случайно возникающих в процессе накопления последних под действием напряжений [6]. Слияния происходят после достижения средней концентрацией микротрещин в объеме $v(x)$ скопления (здесь x – размер скопления и трещины) уровня, соответствующего концентрационному критерию [2]. При этом средняя концентрация $n(t)$ во всем однородно нагруженном объеме $V \gg v(x)$ может быть значительно ниже средней концентрации в скоплении при его слиянии.

Рассмотрим конкретную реализацию перехода от микротрещин к макротрещинам размером x. В отсутствие слияний последовательно возникающие микротрещины распределяются в пространстве случайным образом и независимо друг от друга. Если расстояние между центрами любой пары микротрещин таково, что они не сливаются, будем называть микротрещиноватость фоновой. Время t с момента начала нагружения, в течение которого микротрещиноватость в объеме $v(x)$ остается фоновой, – случайная величина. Пусть за это время в объеме $v(x)$ появилось M микротрещин – тоже случайная величина. В интервале от t до $t+dt$ появляется первая нефоновая микротрещина. Затем в течение случайного интервала времени t' в объеме $v(x)$ появляются еще M' микротрещин (случайная величина). Эти трещины, фоновые и нефоновые, вместе с $(M+1)$ микротрещиной образуют скопление, удовлетворяющее концентрационному критерию [2]. Последняя микротрещина скопления возникает в интервале от t' до $t'+dt'$. К моменту $t+t'$ образования скопления часть входящих в него микротрещин уже сливается в трещины размером меньше x, поскольку слияния начинаются с возникновением первой же нефоновой микротрещины (между временем t и $t+dt$). По этой же причине время слияний $t_*(x)$ в скоплении размером x, как и время t', отсчитывается от момента t. Ввиду временных флуктуаций появления микротрещин в скоплении $t_*(x)$ – также случайная величина. Очевидно, что $t' \leq max\, t_*(x)$.

Итак, вероятность $dP(x)$ некоторой конкретной реализации перехода к моменту t_σ от микротрещин (при их накоплении $n(t_\sigma)$ в объеме V) к макротрещине размером x определяется случайными значениями t, t', M, M', интервалами dt, dt' и временем $max\, t_*(x)$. Интегрируя такие вероятности по возможным t и t' и суммируя по возможным M и M', получим вероятность $P(x,t_\sigma)$ образования трещины в монолитной породе за счет слияний в скоплениях. Таким образом, дело сводится к установлению диапазонов воз-

можных значений t, t', M, M', выражения для $max\, t_*(x)$ и выводу уравнения для вероятности $dP(x)$, которое строится как произведение вероятностей ряда элементарных последовательных событий в процессе формирования скопления микротрещин.

Возможные значения t и t'. При данных размере скопления (и трещины), ходе нагружения $\sigma_{ik}(t_\sigma)$ и длительности нагружения t_σ время образования скопления t' не должно превышать времени слияний в нем: $t' \leq max\, t_*(x)$, а поскольку время образования трещины (если образовалось скопление) не должно превышать длительности действия напряжений, то $t + max\, t_*(x) \leq t_\sigma$. Отметим, что в конкретных условиях t_σ имеет верхнюю границу.

При получении выражения для вероятности $dP(x)$ образования скопления удобно вместо t и t' в качестве переменных использовать относительную среднюю концентрацию микротрещин $\beta(t) = n(t)/n_*$ в объеме V и ее прирост $\beta'(t,t') = \beta(t+t') - \beta(t)$ за время t' (здесь n_* – средняя концентрация микротрещин, соответствующая концентрационному критерию [2]). Возможные значения β и β' определяются зависимостью $n(t)$ при данном ходе нагружения [10] и областью возможных значений t и t'.

Возможные значения M и M'. Среднее расстояние $K_* l$ между центрами микротрещин в скоплении, при котором последнее становится неустойчивым [2], одновременно является минимальным средним расстоянием между центрами фоновых микротрещин. С теоретической точки зрения $K_* l$ – расстояние между центрами микротрещин в скоплении, среднее и по объему скопления, и по возможным наборам M, M', t, t', ведущим к образованию трещины. Ясно, что при некоторых, достаточно больших M и M', среднее только по объему скопления расстояние между центрами микротрещин может быть и меньше $K_* l$ (такие микротрещины уже не будут фоновыми). За минимальное значение такого среднего расстояния примем $K_* l/2$. Тогда в объеме скопления могут разместиться не более M_0 микротрещин, причем

$$M_0(x) = 8\, v\,(x)/K_*^3\, l^3 .$$

Будем считать все размеры скопления близкими по величине, т.е. $v(x) = \pi x^3/6$. Поскольку объем $K_*^3 l^3$ фоновой ячейки в 8 раз больше объема обычной ячейки, то максимальное возможное число фоновых микротрещин в объеме $v(x)$ равно примерно $M_0/8$, т.е.

$$1 \leq M \leq M_0(x)/8 , \qquad (3)$$

а при данном M можно записать

$$M \leq M_0(x) - M - 2 , \qquad (4)$$

где число 2 соответствует первой нефоновой и последней микротрещинам скопления.

Скопление размером x, приводящее к трещине того же размера, должно содержать "остов" – специальную конфигурацию микротрещин, в идеализированном виде изображенную на рис.1 в работе [6]. Остов, как и трещина –

плоское образование, представляющее собой цепочку микротрещин, слияния которых с последующим продвижением возникшего общего контура в некоторой плоскости приводит к трещине. Данному x соответствует множество конфигураций остова. Для любой из них

$$x = A_1 A_2 \dots A_j \, \ell , \qquad (5)$$

где j – число последовательных слияний при образовании трещины (случайная величина); A_m – случайная величина, $A_m (1 \le m \le j)$ имеет значения в интервале $2 \le A_m \le 2K'$; K' – максимальное расстояние между центрами трещин, при котором пара трещин, возникающих при слияниях в остове, может слиться (K', вообще говоря, зависит от напряжений).

Подставляя в уравнение (5) среднее $\overline{A_1 \dots A_j}$ по множеству конфигураций остова, соответствующих данному x, средний размер скопления запишем в виде

$$x = (K+1)^i \ell , \qquad (6)$$

где i и K – параметры, появляющиеся в результате указанного осреднения; K имеет смысл среднего расстояния между центрами пары сливающихся трещин в остове, а i – среднего числа слияний пар все бо́льших трещин.

В силу его определения i может быть нецелым. Численные оценки показывают, что K не зависит от напряжений и размера скопления. Учитывая выражение (6), число микротрещин, образующих остов и среднее по различным его конфигурациям, можно записать в виде

$$M_*(x) = 2^i (x/\ell)^\alpha ; \quad x/\ell \ge K+1 ; \quad \alpha = \ln 2 / \ln(K+1) .$$

При данном M возможен ряд вариантов формирования остова. Он состоит из $M_*/2$ пар микротрещин. Из M фоновых микротрещин в остов при $M \ge M_*/2$ могут войти I микротрещин, причем

$$1 \le I \le M_*(x)/2 , \qquad (7)$$

т.е. имеем всего $M_*/2$ вариантов, а при $M < M_*/2$ имеем

$$1 \le I \le M \qquad (8)$$

и соответственно M вариантов. Кроме того, в I-м варианте в остов войдет в силу ее определения первая нефоновая микротрещина, а остальные $M_* - I - 1$ микротрещин берутся из числа $M'+1$ дополнительных микротрещин. Поэтому с учетом неравенства (4) при данных M и I получим

$$M_*(x) - I - 2 \le M' \le M_0(x) - M - 2 . \qquad (9)$$

Итак, при данных M, I и M' из диапазонов (3), (7) или (8), (9) скопление размером x имеет следующую структуру: оно содержит $M+M'+2$ микротрещины, из них $M_*(x)$ микротрещин образуют остов; $M-I$ микротрещины, которые размещаются в $M_0(x) - M_*(x)$ "ячейках", образуют фоновую мик-

ротрещиноватость; $(M-M'+2)-M_*(x)-(M-I)-M'-M_*(x)+I+2$ микротрещин размещаются произвольным образом в оставшихся незанятыми $M_0(x)-M_*(x)-(M-I)$ "ячейках".

Значение $\max t_*(x)$. Максимальное время слияния микротрещин в скоплении размером x можно оценить из следующих соображений:

I) $t_*(x)$ – это суммарное время последовательных слияний пар все больших трещин, начиная с пар микротрещин в остове;

2) время слияния каждой такой пары трещин размером L_j ($L_j=(K+1)^j\ell$, $j=0,I,\ldots,i-I$; $x=L_i$) включает собственно время слияния трещин $\tilde{t}(L_j)$ и время $\Delta t(L_j)$ задержки в их образовании.

При оценке $\tilde{t}(L_j)$ примем следующие допущения:

I) с наибольшей скоростью контуры сливающихся трещин продвигаются по кратчайшему расстоянию между ними;

2) контур возникшей трещины стремится к круговой форме;

3) наибольшая скорость контура равна максимальной скорости роста трещин v_m.

Время слияния двух первоначально круговых трещин размером L_j при расстоянии между их центрами KL_j с образованием круговой трещины размером L_{j+1} складывается из времени до момента соприкосновения контуров на линии кратчайшего расстояния между трещинами и времени выравнивания контура единой трещины до круговой формы: $\tilde{t}(L_j)=KL_j/v_m$. Возможное при слиянии трещин размером L_j поглощение меньших трещин не изменит времени $\tilde{t}(L_j)$ поскольку при этом контур продвигается скачком только на ограниченном участке и на его выравнивание уходит то же время, что и при развитии трещин в сплошной среде.

Задержка $\Delta t(L_j)$ в образовании двух близких по размеру сливающихся трещин должна с большой вероятностью удовлетворять условию $\Delta t(L_j)\leqslant\max t_*(L_j)$. Это следует из основного предположения: в условиях множественного трещинообразования магистральный рост трещин маловероятен [6]. Действительно, частое нарушение этого неравенства означало бы, что значительной доли слияний пар трещин скопления, из которого образовалась вторая трещина, еще не было к моменту образования первой, и первая трещина могла бы расти как магистральная за счет концентрации напряжений вблизи ее вершины.

На основе приведенных соображений после простых преобразований получим

$$\max t_*(x)=\frac{\ell}{v_m}\left[\frac{x}{\ell}\left(1+\frac{1}{K}+\frac{1}{K^2}\right)-\left(\ln\frac{x}{\ell}\right)\frac{K+2}{2K\ln(K+1)}-\right.$$
$$\left.-\left(\ln\frac{x}{\ell}\right)^2\frac{1}{2(\ln(K+1))^2}-\left(1+\frac{1}{K}+\frac{1}{K^2}\right)\right]. \qquad (10)$$

Вероятность образования скопления. Вероятность образования скопления размером x при данных M, I, M', t, t' (или β, β') – это произведение вероятностей ряда следующих событий при условии реализации предыдущих:

I) за время t при увеличении средней концентрации до n в объеме $v(x)$ возникают M микротрещин;

2) M микротрещин – фоновые;

3) за время dt при изменении средней концентрации на dn в объеме $v(x)$ возникает еще одна микротрещина;

4) эта новая микротрещина нефоновая;

5) за время t' при изменении средней концентрации на n' в объеме $v(x)$ возникают еще M' микротрещин;

6) за время dt' при изменении средней концентрации на dn' в объеме $v(x)$ возникает еще одна (последняя) микротрещина;

7) возникает структура при одном из возможных значений I.

В силу независимого накопления микротрещин в отсутствие слияний их число в данном объеме при данной средней концентрации (или изменение их числа в данном объеме при данном изменении средней концентрации) подчиняется распределению Пуассона. Соответственно, если учесть соотношения: $nv(x)=\beta M_0/8$, $dnv(x)=d\beta\cdot M_0/8$ и аналогичные соотношения для $n'v(x)$, $dn'v(x)$, то вероятности событий 1, 3, 5, 6 определяются выражениями:

$$P_1=\frac{(\beta M_0/8)^M}{M!}e^{-\beta M_0/8};\quad dP_3=(d\beta M_0/8)e^{-d\beta M_0/8}\simeq M_0\,d\beta/8;$$
$$P_5=\frac{(\beta' M_0/8)^{M'}}{M'!}e^{-\beta' M_0/8};\quad dP_6\simeq M_0\,d\beta'/8. \qquad (11)$$

Вероятность каждого из событий 2, 4, 7 есть отношение числа "нужных" к числу возможных вариантов (C_j^i – число сочетаний из j элементов по i):

$$P_2=Q/C_{M_0}^{M};\quad P_4=R/(M_0-M); \qquad (12)$$

$$P_7=\frac{S(x)\,C_{(M_0-M_*)/8}^{M-1}\,C_{M_0-M_*-M+1}^{M'-M_*+1+2}}{QR\,C_{M_0-M-1}^{M'+1}}, \qquad (13)$$

где Q – число вариантов фонового "расселения" M микротрещин в M_0 "ячейках"; $C_{M_0}^{M}$ – число возможных вариантов расселения M микротрещин в M_0 "ячейках"; R – число вариантов нефонового размещения $(M+1)$-й микротрещины при наличии M фоновых микротрещин в еще свободных M_0-M ячейках; M_0-M – число возможных вариантов размещения $(M+1)$-й микротрещины в M_0-M ячейках.

В знаменателе формулы (13) – число возможных вариантов "заселения" M_0 ячеек $M+M'+2$ микротрещинами при условии, что последовательно возникают M фоновых (множитель Q), одна нефоновая (множитель R) и $M'+1$ любых микротрещин в оставшихся M_0-M-1 "ячейке" (множитель $C_{M_0-M-1}^{M'+1}$), в числителе – число вариантов заселения M_0 ячеек $M+M'+2$ микротрещинами при условии, что возникает нужная структура. Здесь $S(x)$ – число вариантов размещения в объеме $v(x)$ $M_*(x)$ микротрещин в виде остова. При каждом таком варианте и фиксированном I множитель $C_{(M_0-M_*)/8}^{M-I}$

соответствует числу вариантов фонового размещения $M-I$ микротрещин в $(M_0-M_*)/8$ фоновых "ячейках". Множитель $C^{M'-M_*+I+2}_{M_0-M_*-M+I}$ дает при фиксированном I число вариантов произвольного размещения остальных $M'-M_*+I+2$ микротрещин в оставшихся незанятыми M_0-M_*-M+I "ячейках".

Оценим число вариантов $S(x)$. Остов, как и трещина,– плоское образование. Предполагается, что его плоскость в шаровом скоплении не любая, а определенная и связана с симметрией тензора напряжений и анизотропией прочностных свойств породы. Однако в явном виде ориентация трещин здесь определяется. Отметим также, что из-за случайных флуктуаций напряжений, связанных с самим процессом растрескивания, ориентация поверхности трещины, возникающей из скопления, в разных ее частях, вообще говоря, может меняться. Ясно, что остов в его плоскости можно повернуть на любой угол, кратный $2K\ell/x$ и не превышающий π. Все такие повороты дают возможные способы размещения остова в скоплении. Возможные способы размещения остова получаются и при аналогичного типа поворотах его частей, размеры которых связаны с x формулой (6) при возможных i. Из указанных соображений

$$S(x)=\left(\frac{\pi(K+1)^2}{2K}\right)^{\left(\frac{x}{\ell}\right)^{\alpha}-1}\Big/\frac{x}{\ell},\quad \alpha=\ln 2/\ln(K+1). \qquad (I$$

С учетом формул (II)–(I4) имеем

$$dP_{MIM'}(x,\beta,\beta')\equiv dP(x)=P_1P_2\,dP_3\,P_4P_5\,dP_6P_7 \qquad (I$$

(в произведении $P_2P_4P_7$ сокращаются R и Q).

Выражение для вероятности образования трещины имеет вид

$$P(x,t_\sigma)=\sum_{M,I,M'}\int_B dP_{MIM'}(x,\beta,\beta'), \qquad (I$$

где B – область изменения β и β'.

Зависимость P от x определяется $M_0(x),M_*(x),S(x)$ и зависимостью от x области B. Зависимость P от $\sigma_{ik}(t)$ и t_σ возникает счет зависимости от них области интегрирования B.

Анализ изложенного выше с учетом результатов [I0] показывает, что общем случае вероятность $P(x,t_\sigma)$ является функционалом обезразмеренного тензора напряжений $\sigma_{ik}(t)/E$ (здесь E – модуль упругости) и функциона безразмерных параметров

$$x/\ell,\ t_\sigma(A,K/K_*,K,\ell)\ \upsilon_m A,\ S_k.\ S_m,\Gamma_1,\ \Gamma_{21},\Gamma_{22}. \qquad (I$$

Последние пять параметров, как и параметр $A=\tau_0\exp(U/RT)$, где τ период тепловых колебаний; U – энергия активации; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная, связанные с расчетом копления микротрещин, определены в работе [I0]. В простейшем случае о

ного напряженного состояния и постоянного достаточно малого напряжения σ вероятность образования трещины зависит только от первых пяти параметров с заменой

$$A \to \tau = A \exp\left(-\frac{\gamma\sigma}{RT}\right),$$

где γ – соответствующий структурный коэффициент.

Отметим, что $P(x,t_\sigma)di$, вычисляемое согласно выражению (I6), дает вероятность образования трещины с размерами, соответствующими интервалу di параметра i. Это следует из структуры скопления с остовом размером $x=(K+1)^i\ell$. Для перехода к интервалу di', когда i' определяется соотношением $x=(K_*+1)^{i'}\ell$, нужно умножить $P(x,t_\sigma)$ на $\ln(K_*+1)/\ln(K+1)$.

Проверка модели. При каждом возможном наборе значений M, I, M', β и β' средняя концентрация микротрещин в сливающемся скоплении равна $(M+M'+2)/v(x)$. Усреднив эту среднюю по объему скопления концентрацию по всем возможным наборам M, I, M', β и β' с помощью плотности вероятности $dP_{MIM'}(x,\beta,\beta')/P(x,t_\sigma)$, получим экспериментально наблюдаемую концентрацию n_* микротрещин в сливающемся скоплении, среднюю и по объему скопления, и по возможным способам его заполнения:

$$n_* = \sum_{MIM'} \int_{\mathcal{B}} \frac{M+M'+2}{v(x)} dP_{MIM'}(x,\beta,\beta')/P(x,t_\sigma). \qquad (I8)$$

Соотношение (I8) позволяет проверить соответствие модели следующим экспериментальным фактам:

I) величина $n_*\ell^3 = 1/K_*^3$ не зависит от напряженного состояния и размера скопления [2];

2) для горных пород предельному значению средней концентрации микротрещин в скоплении n_* соответствует $K_* \simeq 5$ [I]. Кроме того, для среднего расстояния (в единицах ℓ) между центрами пары соседних микротрещин, при котором они сливаются, должно выполняться очевидное условие $K<K_*$.

Для проверки модели нужно с помощью уравнения (I8) вычислить $n_*\ell^3K_*^3$ при нескольких наборах параметров (I7) и нескольких режимах нагружения. В случае согласия с экспериментом расчетные значения $n_*\ell^3K_*^3$ должны совпадать и быть равными примерно единице при $K_* = 5$ и некотором $K<K_*$ для различных наборов остальных параметров и различных напряженных состояний. Кроме того, указанное равенство не должно выполняться при $K_* \neq 5$ или $K>K_*$ независимо от значений остальных параметров и напряженного состояния.

Расчет при $K_* = 5$ и $K = 1{,}3\div1{,}8$ для гранита с упругими и кинетическими прочностными характеристиками [I0] при $\ell = 1\cdot10^{-4}$ м, $v_m = 1500$ м/с, x/ℓ, равных I0, $I0^2$, 10^3, $I0^4$, и постоянных одноосных растягивающих напряжениях σ, равных 5, I0, 20 МПа, дал значения $n_*\ell^3K_*^3$ с отклонениями от единицы в пределах единицы. При K_*, равных 7, 9 и II, отклонения значений $n_*\ell^3K_*^3$ от единицы превышает 5–6. Эти результаты можно рассмат-

ривать также как теоретическое объяснение экспериментально наблюдаемого для скальных пород значения $K_* \simeq 5$ [I].

У с л о в и е д р о б л е н и я. Расчет трещиноватости $I(x, t_\sigma)$ проводится согласно формулам (I), (2), (II)-(I6). Учитывая, что средняя концентрация микротрещин в сливающемся скоплении характеризуется значением K_*, за объем трещины $v_*(x)$ принят объем цилиндра диаметром x и высотой $2K_*\ell$:

$$v_*(x) = \pi K_* \ell x^2/2 .$$

Тогда согласно формулам (I) и (2)

$$I(x,t_\sigma) = \left(\ell n(K_*+1)/\ell n(K+1)\right) 2P(x,t_\sigma)(x/\ell)/(\pi K_*).$$

Трещиноватость зависит от параметров (I7) и нагружения как функции времени. Для скальных пород $\ell/v_m A \leq 10^{-20}$, т.е. фактически размер микротрещин входит в расчет только через безразмерный параметр x/ℓ и играет роль масштабного фактора, что согласуется с выпадением микропараметра ℓ из полуэмпирического выражения для трещиноватости [6].

Выше $I(x, t_\sigma)$ обозначала трещиноватость в первоначально монолитной породе. Снабдим ее теперь индексом I. По правилам, изложенным в [6,7], $I^1(x,t_\sigma)$ определяет вероятность дробления монолитной породы и гранулометрический состав осколков при длительности t_σ действия напряжений. Если по какой-то причине напряжения не снимаются до дробления, условно примем, что в момент однократного дробления t^1_σ вероятность дробления

$$1 - \exp\left(-I^1(x^1_m, t^1_\sigma)\right) = 0{,}9999.$$

Здесь $x = x^1_m$ – точка, в которой находится максимум трещиноватости при $t = t^1_\sigma$ [4].

В терминах максимальной трещиноватости $I^1_m(t^1_\sigma) = I^1(x^1_m, t^1_\sigma)$ условие однократного дробления имеет вид

$$I^1_m(t^1_\sigma) \simeq 8 . \qquad (I9)$$

В случае действия естественных напряжений в монолитном массиве t^1_σ определяет время релаксации напряжений за счет растрескивания, приводящего к блочной структуре. Для массива это условие выполняется [6], а при локальном дроблении монолитной породы в волне напряжений при взрыве t^1_σ определяет запаздывание фронта волны дробления в данной точке относительно фронта упругой волны (в этом случае подразумевается зависимость трещиноватости от координат точки). Напряжения $\sigma^1_{ik}(t)$, действующие до момента t^1_σ, затем либо исчезают (растяжение), либо перестраиваются (например, за фронтом волны дробления за счет изменения физико-механических свойств среды). В последнем случае при определенных условиях может происходить повторное дробление первичных осколков.

Его расчет при известных напряжениях $\sigma^2_{ik}(t)$ и $t > t^1_\sigma$ аналогичен изложенному выше с тремя отличиями:

1) сначала рассчитывается не полная трещиноватость

$$I^2(x, t_\sigma) = I^1(x, t_\sigma) + \Delta I^1(x, t_\sigma),$$

а добавка ΔI^1 к исходной трещиноватости (предполагается, что в напряжениях σ^2_{ik} учтено влияние на них трещиноватости I^1);

2) начальное значение средней концентрации микротрещин во всем объеме V отлично от нуля и равно $n^1(t^1_\varepsilon)$ – концентрации, достигнутой при однократном дроблении ($n^1(t^1_\sigma) \neq 0$ оценивается согласно [10]);

3) момент t^2_ε повторного дробления и возникающий максимальный размер осколков $x^2_m < x^1_m$ ищутся из условия (19) для полной, а не добавочной трещиноватости.

Расчет дробления большей кратности проводится аналогично. Отметим, что I^2 имеет в отличие от I^1 два максимума [7] и число максимумов с ростом кратности дробления возрастает. Каждый раз под x^k_m ($k = 1,2,\ldots$) понимается самый левый на оси x максимум $I^k_m(x, t_\sigma)$ [7].

Теоретическое обоснование уравнения для трещиноватости. Для демонстрации того, что трещиноватость, рассчитанную согласно рассмотренной модели, можно представить в виде [6,8]

$$I(x) = \alpha \ln(K_* + 1)(\lambda x)^4 \exp(-\lambda x), \qquad (20)$$

оценочный расчет теоретической трещиноватости проводился для гранита с упругими и кинетическими прочностными свойствами, указанными в работе [10]. Вычисления проводились для трех значений одноосного растягивающего напряжения (5, 10, 20 МПа), для одного значения $t_\sigma \leq t^1_\sigma$ и нескольких значений x/ℓ (10, 10^2, 10^3, 10^4). Для каждого σ, зная x_m и $\bar{I}_m$, можно затем найти $\lambda = 4/x_m$ и $\alpha = I/8{,}4$ [8] и для тех же x оценить трещиноватость по формуле (20). Общий результат такого расчета заключается в том, что для каждого σ относительное отличие трещиноватости, рассчитанной с помощью рассматриваемой модели, от рассчитанной согласно формуле (20) не превышает 0,2–0,3. Учитывая модельный и оценочный характер расчета, этот результат дает дополнительное теоретическое обоснование приемлемости выражения (20) для оценки трещиноватости.

Выводы

1. Предложен способ оценки трещиноватости скальной породы при взрыве с учетом напряженного состояния, величины и времени действия напряжений.

2. Предложено теоретическое объяснение экспериментально наблюдаемого среднего расстояния между микротрещинами в сливающемся скоплении.

3. Предложен подход к описанию многократного дробления на основе условия дробления растресканного объема в терминах трещиноватости.

4. С помощью теоретической оценки трещиноватости дано обоснование менее общей, но более простой и имеющей практические применения полуэмпирической оценки трещиноватости при взрыве [3-5].

Автор благодаре В.В.Шлимаку за помощь в проведении вычислений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел / С.Н.Журков, В.С.Куксенко, В.А.Петров и др. // Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980.

2. Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов: Автореф. докт. дис. / ИВС АН СССР. Л., 1977.

3. Реферат пакета прикладных программ SHAPE / В.Я.Чертков, В.В.Шлимак // ФТПРПИ. 1989. № 2.

4. Чертков В.Я. О влиянии анизотропии естественной трещиноватости на осколкообразование при взрыве в хрупкой горной породе // ФТПРПИ. 1987. № 5.

5. Чертков В.Я. Об относительных прочностных характеристиках осколков взорванной горной массы и отдельностей скального массива // ФТПРПИ. 1988. № 1.

6. Чертков В.Я. О формировании осколков при множественном трещинообразовании в горной породе // ФТПРПИ. 1985. № 6.

7. Чертков В.Я. О взаимосвязи предварительной и наведенной взрывом трещиноватости с характеристиками дробления хрупкой горной породы // ФТПРПИ, 1986. № 5.

8. Чертков В.Я. Модель осколкообразования при короткозамедленном взрывании серии удлиненных зарядов в трещиноватой породе // ФТПРПИ. 1986. № 6.

9. Чертков В.Я. К обоснованию локально-вероятностной оценки гранулометрического состава осколков при взрыве в хрупкой среде // ФТПРПИ. 1989. № 6.

10. Чертков В.Я. О росте средней концентрации микротрещин в скальной породе при взрывных нагрузках // ФТПРПИ. 1988. № 5.