

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235

ВОЛНОВОЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВЕ

А. Н. Кочанов, В. Н. Одинцев

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: Odin-VN@yandex.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассмотрены особенности волнового предразрушения (микроразрушения) пород при взрывном воздействии. Предложен новый подход к исследованиям, в котором используются соотношения динамического упругого распределения напряжений в породе и теория трещин. Получено соотношение для оценки размера области предразрушения сравнительно монолитных горных пород при камуфлетном взрыве, которое включает давление газов во взрывной полости, горное давление в массиве пород, трещиностойкость породы, характерный размер природной нарушенности (дефектности) породы и ее деформационные параметры. Показано, что размеры области предразрушения породы зависят как от природных, так и технологических факторов. В зависимости от их параметров размеры области предразрушения породы могут различаться в несколько раз.

Горная порода, камуфлетный взрыв, упругая волна, растяжение породы, микротрещины, волновое предразрушение, скорость детонации

Взрывное разрушение горных пород является важным разделом исследований в горных науках [1], результаты которых обусловили существенный прогресс в совершенствовании технологии взрывных работ на карьерах и в шахтах. Это нашло отражение в ряде известных публикаций практической направленности [2–6]. Теоретические аспекты исследований, связанных с горной тематикой, освещены, например, в работах [7–14]. Вместе с тем некоторые вопросы взрывного разрушения остаются малоизученными, в частности роль волнового фактора в предразрушении (микроразрушении) пород.

Отметим характерные зоны разрушения пород при взрыве [15, 16]. При камуфлетном взрыве сосредоточенного заряда условно можно выделить четыре зоны (рис. 1). Непосредственно вблизи взрывной полости находится зона раздробленной несвязанной породы (зона 1). На границе этой зоны после активной фазы взрыва должно выполняться условие сдвигового разрушения. Далее от взрывной полости располагается зона 2, которая после взрывного воздействия является частично разрушенной, содержащей множество микротрещин и протяженные радиальные трещины отрыва. Радиальные трещины образуются при участии газообразных продуктов взрыва. Микротрещины развиваются без участия газа за счет действия взрывной волны. За границей зоны радиальных трещин находится зона 3, содержащая только наведенные микротрещины. Еще дальше от взрывной полости находится зона без наведенных трещин 4, которая определяется как область упругого деформирования или сейсмических колебаний.

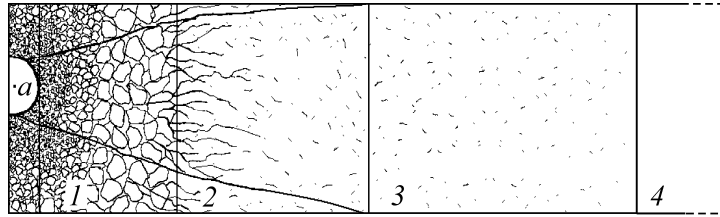


Рис. 1. Схема разрушения горной породы: 1 — зона раздавливания (дробления); 2 — зона радиальных трещин; 3 — зона предразрушения; 4 — область упругого деформирования

Наличие зон с разным характером разрушения пород предопределяет необходимость развития различных подходов в изучении механизма и следствий разрушения пород при взрывах. Интуитивные представления о зоне предразрушения пород, основанные на опыте исследований зон дробления и радиальных трещин, могут оказаться ошибочными, так как природа разрушения в этих случаях совершенно иная. Необходимо проведение специального исследования, которое следует начать с анализа предразрушения монолитной породы, поскольку учет трещинно-блочности породы существенно усложняет картину геомеханических процессов [17, 18].

В настоящей работе рассматриваются условия развития микротрещин в монолитной породе под действием взрывной волны. Наведенные микротрещины отчетливо представлены в зоне 3, которая получила название зоны волнового предразрушения породы [19–25]. Эта зона, в частности при камуфлетном взрыве, в условиях цилиндрической симметрии может простираться на расстояние до 100 и более радиусов заряда [26].

Волновое предразрушение пород играет важную роль, например в задачах сохранения драгоценных кристаллов при взрывном способе дезинтеграции горных пород или при прогнозе техногенного изменения фильтрационных характеристик массива горных пород. Оно облегчает формирование горной массы и ее дробление до кондиционного размера.

Существующие подходы в изучении взрывного предразрушения горных пород можно условно разделить на два вида: экспериментальный и аналитический. В первом оценка особенностей предразрушения (радиуса зоны и степени микроповреждений) проводится на основании анализа экспериментальных данных [23, 24], во втором — применяются феноменологические соотношения прочности и напряжений в породах [25]. Ниже рассматривается новый аналитический подход в исследовании особенностей предразрушения пород при взрывном воздействии, в котором, в отличие от [25], используются формулы упругого динамического распределения напряжений [10, 27] и теория развития трещин [28, 29].

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ВОЛНОВОМ ПРЕДРАЗРУШЕНИИ ПОРОДЫ

Приведем данные, полученные в ходе лабораторных и натуральных исследований волнового предразрушения пород при взрывах сосредоточенных зарядов в слабонарушенном песчанике, мраморе, граните, известняке. В лабораторных экспериментах размеры образцов составляли 50×25×12 см. В камуфлетных микровзрывах использовались заряды тэна диаметром 2.4 или 4.2 мм. Исследовалось изменение скоростей волн в образцах до и после проведения взрывов, а также выполнялся микроструктурный анализ состояния породы. Полученные в экспериментах данные можно обобщить в следующих положениях.

Волновое предразрушение проявляется как снижение упругих и прочностных свойств пород в области, расположенной вдали от центра взрыва. В образцах песчаника в зоне предразрушения зарегистрировано снижение прочности на растяжение в несколько раз, причем между изменением скорости и прочностью существует взаимосвязь, которая хорошо описывается степенной функцией с показателем степени, равным четырем, т. е. малым изменениям скорости соответствует значительное снижение прочности.

Структура наведенных микротрещин практически одинакова для различных минеральных зерен. Множественные микротрещины, возникающие в горной породе в результате динамического волнового воздействия в основном имеют характер трещин отрыва. Преобладают внутрикристаллические трещины. Встречаются также микротрещины по границам раздела зерен, связанные или полностью совпадающие с границей раздела. В большинстве случаев длина наведенных микротрещин порядка 100 мкм, их раскрытие составляет около 10 мкм.

Степень волнового предразрушения горных пород зависит от их минерального состава и амплитуды действия волн напряжений. В табл. 1 приведены данные экспериментов по наведенной трещиноватости — процентное выражение нарушенных минеральных зерен в граните в зависимости от расстояния до центра взрыва.

ТАБЛИЦА 1. Распределение микротрещиноватости в различных минеральных компонентах при увеличении расстояния от заряда, %

Минеральный компонент	Расстояние от центра взрыва (ед. радиуса заряда)			
	5–10	15–20	30–40	50–60
Кварц	8–14	70–80	15–20	20–30
Плагиоклаз	6–11	40–50	18–20	15–27
Полевые шпаты	20–35	70–85	30–46	40–50

Микротрещиноватость в сформировавшейся области неупругого деформирования не описывается монотонно убывающей функцией при увеличении расстояния от заряда. Она достигает максимума в области, расположенной на расстоянии 15–20 радиусов заряда. В частности, при взрыве сферического заряда тэна массой 0.1 г и плотностью 1.6 г/см³ в граните до 80 % микронарушений наблюдаются в зернах кварца и калиево-натриевого полевого шпата и 50 % — в зернах плагиоклаза.

С течением времени скорость ультразвуковых волн и прочность породы в зоне предразрушения в большинстве случаев восстанавливаются, т. е. изменения в зоне предразрушения по данным долговременного ультразвукового контроля носят обратимый характер. Время восстановления исходного состояния образцов составляет 1–3 мес.

В натуральных экспериментах установлено, что протяженность зоны предразрушения в сжатых породах снижается. Так, при горном давлении примерно 12 МПа протяженность зоны почти 1.5 раза меньше, чем для разгруженной породы в образцах при прочих равных параметрах [23].

Сравнение разных технологий взрыва с помощью традиционного плотного заряда (~1.6 г/см³), который характеризуется относительно малым временем детонации, и с помощью малоплотных (~0.5 г/см³) зарядов, отличающихся относительно большим временем детонации, показывает, что радиус зоны микроразрушений в последнем случае в 5–6 раз меньше [24].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ ПОРОДЫ

С учетом экспериментальных результатов, а также теоретических исследований, связанных с распространением упругих волн и развитием трещин [10, 11, 27–30], разработана новая модель волнового предразрушения породы при камуфлетном взрыве. В модели приняты предположения и упрощения, позволяющие получить замкнутую систему уравнений и провести расчеты.

Взрывная волна при промышленных ВВ не является ударной, поэтому в однородной сплошной упругой среде рассматривается упругая волна, которая вызвана резким ростом давления на стенке зарядной полости. Принимаются условия сферической симметрии. Центр сферической системы координат r, α, θ отнесен к центру взрывной полости, при этом r — расстояние от начала координат до рассматриваемой точки; α, θ — азимутальный и полярный углы; $\sigma_r, \sigma_\alpha, \sigma_\theta$ — радиальное, азимутальное и полярное напряжения соответственно. Напряжения сжатия считаются отрицательными.

В исходной постановке задачи рост давления считается мгновенным, т. е. в момент времени $t = 0$ давление газообразных продуктов взрыва увеличивается до максимальной величины P . Граничное условие для радиального напряжения σ_r описывается функцией Хевисайда $\sigma_r(a) = PH(t)$ (рис. 2).

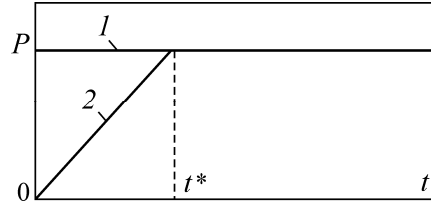


Рис. 2. Вид функций нарастания давления во взрывной полости: 1 — функция Хевисайда; 2 — функция с линейным участком роста давления

Максимальное давление газообразных продуктов взрыва во взрывной камере оценивается по формуле $P = 3\varepsilon(\lambda - 1)/(4\pi a^2)$, где a — радиус взрывной полости; ε — энергия взрыва; λ — показатель адиабаты газообразных продуктов взрыва [15].

Для случая сферической симметрии известны формулы для напряжений, порожденных упругой волной [10, 27]:

$$\sigma_r = -P \left[B_1 \frac{a}{r} + B_2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 + B_3 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right], \quad (1)$$

$$\sigma_\alpha = -P \left[\frac{\mu}{1-\mu} B_1 \frac{a}{r} - 0,5 B_2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 - 0,5 B_3 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right], \quad (2)$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_\theta. \quad (3)$$

Здесь $B_1 = (\cos \omega \tau - (k/\omega) \sin \omega \tau) e^{-k\tau}$, $B_2 = 2\sqrt{1-2\mu} \sin \omega \tau \cdot e^{-k\tau}$, $B_3 = 1 - (\sqrt{1-2\mu} \sin \omega \tau + \cos \omega \tau) e^{-k\tau}$, μ — коэффициент Пуассона; $k = (1-2\mu)c_1 / [(1-\mu)a]$, $\omega = \sqrt{1-2\mu} \cdot c_1 / [(1-\mu)a]$; $\tau = t - (r-a)/c_1$ — время, отсчитываемое от момента прихода волны сжатия в рассматриваемую точку; c_1 — скорость продольной волны.

В модели считается, что природные (“зародышевые”) дефекты существуют в породе еще до начала разрушения. Согласно [12], под воздействием начального импульса сильного сжатия в упругой волне они активизируются, а при последующем импульсе растяжения начинают развиваться. В анализе возможного развития микротрещин под действием динамической нагрузки использован подход теории трещин с оценкой коэффициента интенсивности напряжений в кончике трещины [30–32].

С помощью формул (1)–(3) исследуются закономерности напряженного состояния породы после прихода упругой волны. Из расчетов следует, что на фронте волны сначала радиальное и окружные напряжения являются сжимающими (отрицательными), однако затем они становятся растягивающими (положительными). Для примера на рис. 3а, б показаны изменения во времени радиального (сплошная линия) и азимутального (штриховая линия) напряжений σ_r/P , σ_α/P , а также напряжений $(\sigma_r - \sigma_\alpha)/P$ (пунктирная линия), характеризующих максимальные сдвиговые напряжения, в точках с координатами $r = 5a$ и $r = 20a$ после прихода упругой волны. Зависимости представлены в безразмерном виде, по оси абсцисс отложено приведенное время $\xi = \tau/\tau^*$, отсчитываемое от момента прихода волны сжатия в рассматриваемую точку; τ^* — параметр, равный 100 мкс.

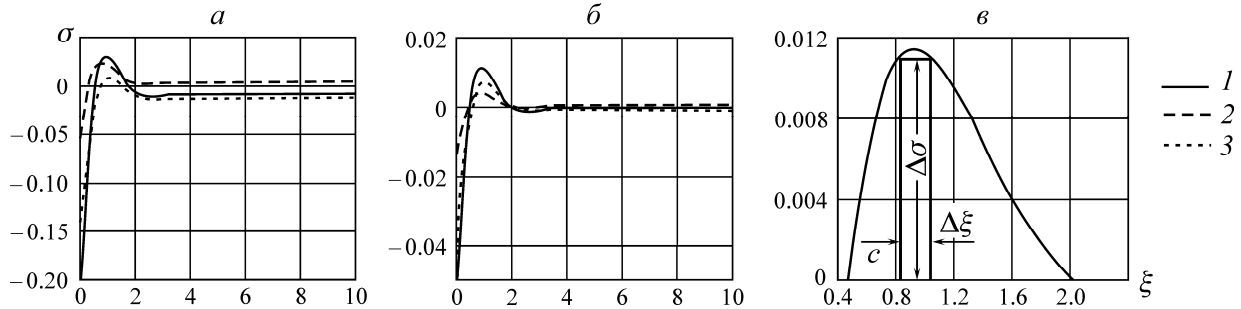


Рис. 3. Зависимости радиального (1), азимутального (2) напряжений и их разности (3) от приведенного времени ξ после прихода волны в точки: а — $r = 5a$; б — $r = 20a$; в — схема к определению параметров модельного импульса растяжения

Зависимости на рис. 3 построены для горной породы, имеющей скорость продольной волны 3200 м/с и коэффициент Пуассона 0.22 в случае, когда $a = 0.15$ м. Как следует из расчетов, в рассмотренном примере длительность фазы сжатия на фронте волны составляет примерно 50 мкс. Длительность последующей фазы растяжения около 150 мкс. По прошествии примерно 1000 мкс после прихода волны напряжения фактически соответствуют состоянию “квазистатического” распределения напряжений.

Для проведения последующей оценки предельного условия развития микротрещины вместо всей кривой растягивающих радиальных напряжений целесообразно исследовать только ее пиковую часть, реально определяющую это предельное условие. Пиковая часть рассматривается в виде модельного импульса наибольшего растяжения (рис. 3в). Величина “прямоугольного” импульса $\Delta\sigma$ для точек, расположенных на достаточном удалении от взрывной полости ($r/a > 7$), находится из приближенного соотношения, которое можно получить из формулы (1):

$$\Delta\sigma \approx 0.9(\sqrt{1-2\mu} \sin \alpha - \cos \alpha) \exp(-\alpha\sqrt{1-2\mu}) a/r, \tag{4}$$

где $\alpha = \text{arctg}(-2k\omega/(\omega^2 - k^2))$. Временной интервал действия этого модельного импульса $\Delta\xi$ можно оценить из соотношения

$$\Delta\xi \approx \frac{0.2a(1-\mu)}{c_1 \tau^* \sqrt{1-2\mu}}. \tag{5}$$

Далее в микромасштабе рассматривается состояние природной “зародышевой” микротрещины при воздействии на нее модельного импульса растяжения $\Delta\sigma$ и продолжительности $\Delta\xi$. Считается, что в момент времени $\tau = \tau_i$ микротрещина оказывается в поле импульсного растягивающего нормального напряжения, которое для указанного масштаба действует “на бесконечности” в течение времени $\tau^* \Delta\xi$, т. е. нагрузка в задаче описывается формулой $P\Delta\sigma[H(\tau - \tau_i) - H(\tau - \tau_i - \tau^* \Delta\xi)]$. Затем исследуется микротрещина, ориентированная нормально радиальному направлению, в анализе условий ее роста используются соотношения для трещины отрыва.

Возможность развития трещины определяется энергетическим условием — скорость освобождения энергии упругой деформации должна превосходить прирост поверхностной энергии трещины. В случае хрупкого разрушения материала это энергетическое условие можно привести к “силовому” виду, содержащему параметры нагрузки и трещиностойкости. Следуя [31], для нагрузки в виде модельного импульса растяжения (рис. 3в) условие развития исходной трещины-дефекта длиной $2l_0$ можно записать в виде $F(\tau/T) P\Delta\sigma\sqrt{\pi l_0} > K_{1C}$, где K_{1C} — трещиностойкость; $F(\tau/T)$ — нормировочная функция безразмерного времени, $T=2l_0/c_1$ — нормировочный параметр.

Графики функции $F(\tau/T)$ для импульсной нагрузки при различных значениях параметра $\Delta\xi$ построены на основе вычислений, описанных в [31], и принципа суперпозиции (рис. 4). В начальный момент $\tau = \tau_i$ значение функции равно нулю. С ростом τ функция растет. Если временной интервал действия импульса растяжения $\tau^* \Delta\xi$, определяемого волной, меньше значения $4l_0/c_1$, определяемого длиной микротрещины, то функция, достигнув некоторого максимума (точка B), начинает убывать (штриховая кривая BC). В противном случае, когда $\tau^* \Delta\xi > 4l_0/c_1$, функция $F(\tau/T)$ имеет временной интервал продолжительностью $\tau^* \Delta\xi$, на котором ее значения близки единице (сплошная линия). По прошествии времени $\tau^* \Delta\xi$ функция достаточно быстро убывает. В обоих случаях в асимптотике $F(\tau/T)$ стремится к нулю.

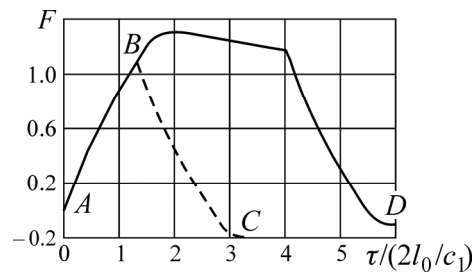


Рис. 4. Зависимость нормировочной функции F от приведенного времени

Начальный этап роста функции $F(\tau/T)$ отражает одно из проявлений инкубационного периода в динамическом развитии микротрещины, который связан с особенностью развития динамических напряжений вблизи трещины. Как следует из рис. 4, время инкубационного периода, обусловленного волновым фактором, оценивается параметром $4l_0/c_1$. Если исходить из абсолютных значений, то для “зародышевых” микротрещин длиной менее 1 мм это время не превышает 0.5 мкс. Поскольку при мгновенном скачке давления во взрывной полости длительность импульса напряжения растяжения для многих пород превышает 10 мкс, в оценках условий развития микротрещины инкубационным периодом, связанным с волновым фактором, можно пренебречь, т. е. считать $F(\tau/T) \approx 1$.

Наличие инкубационного периода в динамическом развитии трещины также обусловлено зависимостью от времени прочностного параметра — трещиностойкости (вязкости разрушения) материала. В работе [33] отмечается, что существует большой разброс экспериментальных данных по динамической вязкости разрушения. Как следствие, в инженерных расчетах нужно ориентироваться на минимальное значение динамической вязкости разрушения, которое примерно в половину меньше статического значения. Например, в [34] отмечается, что в течение первых 40 мкс значение динамической вязкости в 2–3 раза выше статического. Ввиду разброса экспериментальных данных и принимая во внимание продолжительность импульса растяжения, в оценках целесообразно использовать статические значения трещиностойкости, например приведенные в работе [35].

Для прогноза предразрушения породы в природных условиях необходимо учитывать горное давление, противодействующее развитию микротрещин отрыва. Для простоты горное давление пород можно описать одним параметром, который обозначим $Q = \gamma H$, где γ — усредненный удельный вес пород; H — глубина разработки. Параметр Q необходимо включить в критерий начала развития микротрещины, который в соответствии с [29] можно привести к виду

$$(P \Delta\sigma - Q) \sqrt{\pi l_0} \geq K_{IC}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что чем меньше длина микротрещины, тем более значительное напряжение растяжения $\Delta\sigma$ требуется для начала ее развития.

Для определения радиуса границы области предразрушения как предельного удаления точек, для которых выполняется условие роста микротрещин, в соотношении (6) следует использовать знак равенства. Полученное таким образом уравнение включает геомеханические параметры массива: горное давление Q , трещиностойкость K_{1C} породы и нарушенность, определяемую параметром длины характерных природных дефектов-микротрещин l_0 . Уравнение включает также параметры взрывного воздействия: давление газа во взрывной камере P , параметр максимального напряжения растяжения во взрывной волне $\Delta\sigma$ из соотношения (4).

Приращение длин микротрещин зависит от скорости роста трещин. Как следует из [36], скорость роста трещин отрыва c_{cr} изменяется с длиной трещины и описывается соотношением $c_{cr} \approx 0.38 c_2 (1 - l_0/l)$, где c_2 — скорость поперечной волны; l — полудлина трещины; l_0 — полудлина исходной трещины перед началом роста. В начальный момент скорость роста трещины близка к нулю, поскольку $l \cong l_0$. Из этой формулы следует, в частности, что при прочих равных условиях при кратковременной нагрузке из-за влияния начального этапа роста скорости маленькие трещины могут увеличить свою длину в процентном отношении больше, чем более длинные трещины.

Используя приведенную формулу для скорости роста трещин, сделана оценка приращения длин микротрещин за время действия модельного импульса растягивающих напряжений на границе зоны предразрушения пород. В рассмотренном примере, которому соответствует рис. 3, промежуток времени действия импульса растяжения составляет примерно 10 мкс. Оценка, основанная на последовательном учете приращений длины трещины, показывает, что в этом случае начальные микротрещины длиной 10 мкм и микротрещины длиной 1000 мкм могут увеличиться до длины нескольких миллиметров.

Далее исследовалось влияние фазы нарастания давления во взрывной полости на предразрушение породы. Фаза нарастания давления определяется скоростью детонации ВВ и радиусом заряда. Проведены расчеты напряжений растяжения в упругой волне при различных значениях параметра нарастания давления t^* , который характеризует время нарастания давления во взрывной полости до максимального значения P (см. рис. 2). В первом приближении параметр t^* определяется соотношением $t^* = a/V$, где V — скорость детонации ВВ. Таким образом, в этой задаче давление на стенку взрывной полости описывается линейными соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -Pt/t^*, & t \leq t^* \\ \sigma_r &= -PH(t-t^*), & t > t^*. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение задачи проводилось численно методом суперпозиции множества решений Шарпа при малых промежуточных скачках давления. На рис. 5 представлены некоторые результаты расчетов зависимости радиального напряжения σ_r/P от времени τ/t^* для точки с координатой $r = 20a$ при различных значениях параметра нарастания давления во взрывной полости t^* . Кривые построены при условиях и значениях параметров рассмотренного выше примера. Как видно из рис. 5, при малом времени нарастания давления $t^* < 10$ мкс, что типично для многих ВВ при радиусе заряда 0.15 м, фаза нарастания давления почти не влияет на особенности импульса растяжения. Влияние сказывается лишь в первом импульсе сжатия (кривые 1 и 2 на рис. 5).

При большом времени нарастания давления $t^* > 100$ мкс импульс растяжения в упругой волне существенно снижается (кривая 3), а при $t^* > 1000$ мкс растяжение фактически не проявляется (кривая 4). Подобные выводы можно сделать из анализа зависимости максимального радиального напряжения растяжения на пике волны σ_{\max} от параметра t^* . Согласно рис. 6, максимальное растягивающее напряжение резко убывает с ростом значения параметра t^* .

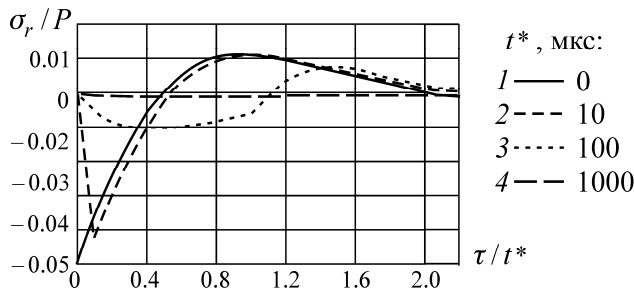


Рис. 5. Зависимости от времени τ радиальных напряжений в точке $r = 20a$ при различных значениях параметра нарастания давления во взрывной полости t^*

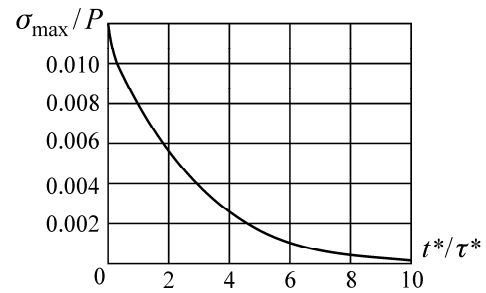


Рис. 6. Зависимость максимального растягивающего напряжения на пике волны от параметра нарастания давления во взрывной полости t^*

В табл. 2 представлены результаты расчетов возможных значений радиуса границы зоны предразрушения различных монолитных пород для радиуса заряда 0.15 м, выполненных с помощью уравнения (6). Приняты следующие значения параметров: $Q \approx 5$ МПа, давление газа в сферической взрывной полости 3 ГПа и рассмотрены породы: песчаник мелкозернистый, песчаник крупнозернистый, алевролит, базальт порфировый, гранит. В монолитной породе с зернистой микроструктурой характерный размер природной трещины (микродефекта) по порядку величины определяется размером структурного зерна d . Таким образом, по усредненному диаметру зерна оценивается длина $2l_0$ модельной начальной микротрещины.

ТАБЛИЦА 2. Приведенные радиусы внешней границы зоны предразрушения пород при различных значениях параметра времени нарастания давления во взрывной полости t^*

Порода	Диаметр зерна d , мм	Трещиностойкость K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	Радиус зоны предразрушения R/a , мкс		
			$t^* = 10$	$t^* = 10$	$t^* = 10^2$
Песчаник мелкозернистый	0.1–0.3	1.30–1.61	2.1–9.1	1.4–7.8	0–4.4
Песчаник крупнозернистый	0.4–1.0	0.35–1.15	14.1–60.5	12.0–54.1	7.5–38.8
Алевролит	0.05–0.1	0.27–0.83	4.4–29.4	3.5–26.2	1.3–17.8
Базальт	1.4–1.7	2.05–2.50	10.7–15.4	9.1–13.4	5.4–8.5
Гранит	2.5–5.5	3.0–3.8	14.0–27.5	12.1–24.3	7.7–16.5

Из расчетов следует, что при $t^* = 1000$ мкс зона предразрушения пород отсутствует. Заметим также, что значения радиусов $R/a < 5$ надо принимать условно, т. е. лишь в аспекте сравнения, поскольку зона предразрушения пород в этом случае входит в зону радиальных трещин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная модель предразрушения породы под воздействием взрывной волны позволяет получать более правдоподобные оценки параметров зоны предразрушения по сравнению с известными ранее подходами, которые приводили к неоднозначным результатам, например чрезмерно заниженным размерам этой зоны [9], возможности образования достаточно протяженных трещин [25]. Эту модель можно использовать также для анализа волнового предразрушения породы в зоне радиальных трещин (см. рис. 1), поскольку протяженные радиальные трещины образуются чуть позже по времени за счет действия газообразных продуктов взрыва.

В работе приведены результаты исследований развития микротрещин отрыва, а также выполнены оценки развития сдвиговых микротрещин. Для обоих типов механизма разрушения получены практически одинаковые выводы в отношении размеров зоны предразрушения. Это можно объяснить тем, что радиальные и окружные напряжения на пике волны растяжения являются растягивающими и в этих условиях свободно могут развиваться трещины как одного, так и другого типа.

Вместе с тем эффект “самозалечивания” микротрещин с течением времени, выявленный в экспериментах, указывает, что при воздействии взрывной волны преимущественно развиваются микротрещины отрыва. Неровные берега микротрещин расходятся, а затем при исчезновении внешнего воздействия с течением времени плотно смыкаются. Расхождение берегов микротрещины составляет менее 0.05 от длины трещины, что соответствует данным лабораторных наблюдений. При сдвиговом характере разрушения вследствие неизбежного проскальзывания берегов по шероховатостям и дилатансии последующее схождение берегов не может привести к полному их смыканию и залечиванию микротрещин.

В рамках модели отрывных микротрещин можно также объяснить парадоксальный факт наличия максимума наведенной микротрещиноватости на расстоянии 15–20 радиусов заряда, а не 5–10 радиусов, как логично было бы ожидать. На расстоянии 5–10 радиусов пик растягивающих напряжений в волне, конечно, выше, чем на расстоянии 15–20 радиусов. Максимальное динамическое напряжение в волне снижается в этой зоне примерно пропорционально квадрату расстояния, а уровень квазистатических напряжений, связанных с остаточным давлением в полости, пропорционален R^3 , что может приводить к наличию экстремума в функции уровня остаточной поврежденности от расстояния. Это объясняется влиянием полости и действием в течение некоторого времени высокого остаточного давления газа в полости, что способствует закрытию части наведенных микротрещин.

При серии взрывных воздействий на массив возможен накопительный эффект в увеличении длины наведенных микротрещин. Следовательно, одновременно могут происходить два противоположных процесса в развитии микротрещин в породе. С одной стороны, это подрастание микротрещин при последовательных взрывах, с другой — залечивание микротрещин. Для реальных горно-геологических условий массива трудно сделать оценку преобладающей тенденции изменения предразрушения пород во времени, тем более что в реальных условиях на предразрушение пород оказывает влияние возможное увлажнение пород [23] и особенности проявления блочности массива [17, 18, 26].

На волновое предразрушение пород оказывает влияние скорость нарастания давления во взрывной полости. Проведенные оценки позволяют охватить диапазон изменения скоростей волн от 1 до 9 км/с. Установлено, что если скорость нарастания достаточно мала, как, например, в случае использования пороховых зарядов, то зона предразрушения пород может даже отсутствовать, хотя зоны дробления пород и радиальных трещин образуются.

Практическое значение модели состоит в том, что она позволяет выполнить количественную оценку протяженности зоны предразрушения в конкретных породах. В этой связи установлено, что размеры области предразрушения породы зависят как от природных, так и технологических факторов. В зависимости от параметров этих факторов размеры области предразрушения породы могут различаться в несколько раз.

Установленные особенности взрывного предразрушения пород учтены при решении некоторых практических задач. В частности, при передовом торпедировании труднообрушаемой кровли угольного пласта при замене аммонита Т-19 на более высокоплотное водонаполненное ВВ, создающее более протяженную зону предразрушения пород, удалось снизить затраты на трудо-

емкие буровые операции в результате уменьшения диаметра скважин для буровых работ со 120 до 76 мм. В другом случае за счет предварительного взрывного предразрушения и опережающего взрывания скважин при проведении горных выработок была увеличена скорость их проходки, а выход негабарита уменьшен на 15–25 %.

ВЫВОДЫ

Волновое предразрушение пород характеризует особое воздействие взрыва на породу — развитие множества природных микродефектов под действием волны в зоне упругого деформирования и обусловлено иным механизмом разрушения по сравнению с зонами дробления и радиальных трещин.

Представлены экспериментальные данные о предразрушении монолитных пород вследствие прохождения взрывной волны. К наиболее важным можно отнести оценку параметров наведенных микротрещин в области упругого деформирования для ряда поликристаллических пород — длина микротрещин составляет 100 мкм и более, раскрытие микротрещин около 10 мкм.

Предложен аналитический подход к исследованиям волнового предразрушения горных пород при взрывном воздействии и получены соотношения для оценки размера зоны предразрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горные науки.** Освоение и сохранение недр Земли / под. ред. акад. К. Н. Трубецкого. — М.: Изд-во АГН, 1997. — 478 с.
2. **Викторов С. Д., Галченко Ю. П., Закалинский В. М., Рубцов С. К.** Разрушение горных пород сближенными зарядами. — М.: Научтехлитиздат, 2006. — 276 с.
3. **Викторов С. Д., Еременко А. А., Машуков И. В.** Технология крупномасштабной взрывной отбойки на удароопасных рудных месторождениях Сибири. — Новосибирск: Наука, 2005. — 211 с.
4. **Ганопольский М. И., Барон В. Л., Белин В. А., Пупков В. В., Сивенков В. И.** Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы. — М.: МГГУ, 2007. — 568 с.
5. **Persson P.-A., Holmberg R., Lee J.** Rock blasting and explosives engineering, Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1994. — 560 p.
6. **Ghose A. K., Joshi A.** Blasting in mining – New Trends, CRC Press, 2012. — 150 p.
7. **Адушкин В. В., Спивак А. А.** Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М.: Недра, 1993. — 319 с.
8. **Шер Е. Н., Александрова Н. И.** Динамика развития зон разрушения при взрыве сосредоточенного заряда в хрупкой среде // ФТПРПИ. — 2000. — № 5. — С. 54–68.
9. **Шер Е. Н., Александрова Н. И.** Динамика микроразрушений в упругой зоне при взрыве сферического заряда в горной породе // ФТПРПИ. — 2001. — № 5. — С. 33–40.
10. **Крюков Г. М.** Физика и моменты разных видов разрушения горной породы при взрыве в ней удлиненного заряда ПВВ. — М.: МГГУ, 2009. — 48 с.
11. **Дугарцыренов А. В.** Динамика напряженно-деформированного состояния горных пород при камуфлетном взрыве сосредоточенного заряда // ГИАБ. — 2007. — № 4. — С. 166–179.
12. **Meyers M.** Dynamic failure: mechanical and microstructural aspects, Journal de Physique IV Colloque, 1994, 04(C8). — P. 597–621.
13. **Brian N. C., Gao H, Gross D., Rittel D.** Review – modern topics and challenges in dynamic fracture, J. Mech. and Physics Solids, 2005, Vol. 53. — P. 565–596.
14. **Dehghan Banadaki M. M.** Stress-wave induced fracture in rock due to explosive action. Ph.D. Thesis. University of Toronto, 2010. — 254 p.

15. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Ромашов А. Н., Цветков В. М. Механический эффект подземного взрыва. — М.: Недра, 1971. — 224 с.
16. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.
17. Кочарян Г. Г., Спивак А. А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. — 423 с.
18. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. — 2004. — № 6. — С. 49–57.
19. Шемякин Е. И., Кочанов А. Н., Деньгина Н. И. Параметры волн напряжений и предразрушение горных пород при взрыве // Разрушение взрывом и необратимые деформации горных пород. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1997. — С. 10–17.
20. Александров В. Е., Кочанов А. Н., Левин Б. В. О взаимосвязи акустических и прочностных свойств пород в зоне предразрушающего действия взрыва // ФТПРПИ. — 1987. — № 4. — С. 45–48.
21. Кочанов А. Н. Изучение параметров зон предразрушения массива как основа совершенствования технологии взрывных работ // ГИАБ. — 1996. — № 5. — С. 49–52.
22. Кочанов А. Н. Анализ структуры микро- и макротрещин при динамическом разрушении горных пород // Фундамент. и прикл. вопросы горных наук. — 2015. — № 2. — С. 317–321.
23. Силина О. В. Влияние зон предразрушения в увлажненных горных породах на параметры буровзрывных работ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1994. — 18 с.
24. Лексовский А. М., Боровиков В. А., Бозоров Н. С., Абдуманонов А. А., Синани А. Б., Пилецки С. А. Зона поврежденности высококомодульных материалов при взрывном нагружении гранита // Письма в ЖТФ. — 2002. — Вып. 16. — С. 90–94.
25. Менжулин М. Г., Юровских А. В. Влияние естественной и наведенной трещиноватости на взрывное разрушение и предразрушение горных пород // ГИАБ. — 2004. — № 1. — С. 90–94.
26. Садовский М. А., Адушкин В. В., Спивак А. А. О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде // Физика Земли. — 1989. — № 9. — С. 9–15.
27. Sharp J. A. The program of elastic waves by explosive pressure, Geophysics, 1942, Vol. 7. — P. 144–154.
28. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
29. Одинцев В. Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. — М.: ИПКОН РАН, 1996. — 166 с.
30. Одинцев В. Н. Моделирование разупрочнения геоматериалов при импульсно-волновом воздействии // Взрывное дело. — 2011. — № 105–62. — С. 34–45.
31. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / под ред. Ю. Мураками. Т. 2. — М.: Мир, 1990. — 1016 с.
32. Li J., Huang Q., Ren X. D. Dynamic initiation and propagation of multiple cracks in brittle materials, Materials, 2013, Vol. 6. — P. 3241–3253.
33. Смирнов В. И. О неустойчивости поведения динамической вязкости разрушения // ЖТФ. — 2006. — Т. 76. — Вып. 11. — С. 134–136.
34. Петров Ю. В., Ситникова Е. В. Прогнозирование динамической трещиностойкости конструкционных материалов на примере авиационного сплава при ударном воздействии // ЖТФ. — 2004. — Т. 74. — Вып. 1. — С. 58–61.
35. Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. — М.: Недра, 1988. — 271 с.
36. Roberts D. K., Wells F. F. The velocity of brittle fracture, Engineering, 1954, Vol. 178. — 820 p.

Поступила в редакцию 11/1 2016