

В.В.АДУШКИН, А.А.СПИВАК
Институт динамики геосфер РАН, Москва,
Россия

РАЗРУШАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННОЙ СРЕДЕ

Введение

Несмотря на продолжающиеся попытки создать новые технологии разрушения на основе нетрадиционных для горного дела подходов (терморазрушение, воздействие потоками излучения и частицами высокой энергии и т.п.) взрыв химического ВВ остается основным способом дробления горных пород в массиве. Представляется, что и в ближайшие десятилетия взрывная технология останется доминирующей в промышленных масштабах.

В связи с этим совершенствование взрывной технологии (повышение КПД разрушающего действия взрыва, а также качества дробления породы) следует рассматривать как одну из наиболее важных задач горного дела.

Одним из путей совершенствования взрывной технологии дробления горных пород является использование геомеханических свойств массива, в частности его напряженно-деформированного состояния. Действительно, в реальных условиях разрушение горных пород происходит в присутствии действующих напряжений, обусловленных как гравитационной пригрузкой со стороны вышележащих слоев породы, так и наличием значительных напряжений тектонического происхождения [6,8]. Даже в случае отбойки породы на уступах с помощью взрывов в скважинах глубиной порядка 10 м напряжения на забое скважины достигают 0,3 МПа, что уже следует рассматривать как один из факторов, регулирующих процесс разрушения породы. По мере увеличения глубины разработки значимость этого фактора существенно возрастает. Здесь следует отметить, что разрушение происходит преимущественно по поверхностям нарушений массива, прочность которых заметно ниже прочности собственно горной породы [1].

Действующие в массиве напряжения определяют не только размер запасенной упругой энергии горных пород, которую, в принципе, можно использовать для регулирования параметров дробления породы, но также условия разрушения. Последнее связано как с изменением физико-механических свойств горных пород и массивов по мере роста напряжений [7], так и с неравномерной концентрацией напряжений на дефектах структуры среды и породы, что значительно увеличивает вероятность возникновения локальных разрушений в результате снижения разрушающей нагрузки и возникновения более густой сети первичных очагов разрушения.

Учитывая, что глубина горных работ постоянно растет, становится понятной значимость проблемы влияния начального напряженного состояния на разрушающее действие взрыва.

В настоящей работе на основе результатов лабораторных и укрупненно-лабораторных экспериментов выполнен анализ основных особенностей и закономерностей разрушения напряженной твердой среды взрывом.

Основные характеристики напряженного состояния массивов горных пород

Напряженно-деформированное состояние (НДС) геологической среды является одним из наиболее важных объектов геодинамических исследований. В масштабах Земли НДС литосферы есть результат глобальных экзогенных и эндогенных процессов [3,4,8]. При переходе на региональный масштаб (и ограничиваясь рассмотрением верхних слоев твердых геосфер) следует говорить о первичности напряженного состояния, которое в значительной мере определяет всю динамику геологической среды и является движущей силой практически всех механических процессов.

Анализ большого количества данных по измерению напряженного состояния горных пород [4,5,12 и др.], позволяет сделать ряд обобщений фундаментального характера, среди которых особо следует отметить следующие:

- в целом горизонтальные напряжения в земной коре заметно превышают геостатические;
- отмечается сильная пространственная изменчивость величины и направлений главных напряжений;
- существуют области с выделенной генеральной направленностью главного сжимающего-растягивающего напряжения на границах крупных структурных образований;
- напряженное состояние отдельно взятых участков характеризуется заметной изменчивостью во времени;
- известны механизмы достижения высоких напряжений при их умеренных средних значениях (анвильность и другие механизмы).

Отдельного внимания заслуживают следующие экспериментальные факты:

1. Наблюдается значительная (около 45 %) дисперсия величины тектонических напряжений на всех глубинах, особенно по мере приближения к свободной поверхности (рис. 1). Это свидетельствует о крайне неравномерном распределении напряжений в верхней части земной

коры, представляющей наибольший интерес с точки зрения приложения результатов исследований.

2. Характерной особенностью напряженного состояния верхних слоев литосферы является сильная изменчивость отношения горизонтальных напряжений к вертикальной составляющей с глубиной. Этому может быть дано лишь одно объяснение: горизонтальные тектонические напряжения в верхнем слое литосферы – земной коре возникают в результате движения тектонических плит.

Отмеченные особенности напряженного состояния и характер зависимости горизонтального напряжения от глубины свидетельствуют о невозможности постановки вопроса о влиянии глубины как фактора, определяющего размер действующего напряжения, на процесс разрушения горных пород при динамическом воздействии. В условиях значительных вариаций действующих напряжений для каждой из глубин более правомерно говорить о влиянии напряженного состояния среды на характеристики разрушения.

Запасаемая в среде упругая энергия, размер которой определяется действующими напряжениями, вызванными предварительным нагружением, в принципе может принимать участие в механических процессах, протекающих при взрывном нагружении. Экспериментально установлено [1,9], что при значительных запасах упругой энергии твердая среда (в том числе и горные породы) способна к саморазрушению (так называемый процесс самоподдерживающегося разрушения). При этом с увеличением уровня предварительного нагружения материала среды объем V , который определяет размер высвобождающейся упругой энергии, расходуемой на разрушение, также увеличивается. В частности, для канифоли как среды, хорошо описывающей поведение хрупко разрушаемых реальных горных пород, установлено соотношение [9]

$$V/V_{50} \approx 5,33 \times 10^{-16} \sigma_0^2,$$

где σ_0 – предварительно созданные в среде напряжения, Па; V_{50} – объем при начальном напряжении 50 МПа (в этом случае форма зоны разрушенного материала близка к полусферической, характерной для взрыва накладного заряда).

Из приведенного соотношения следует, что если при $\sigma_0 < 50$ МПа при взрывном разрушении высвобождается дополнительная энергия (за счет предварительного сжатия) из объема, равного объему зоны разрушения, то при увеличении начальных напряжений (при 150 МПа) этот объем может достигать 12 объемов зоны разрушения.

Анализируя возможный вклад начального статического напряжения в разрушение твердой среды при взрыве, необходимо сравнивать энергию, накопленную в среде в результате предварительного нагружения, с той частью энергии взрыва, которая предположительно расходуется на разрушение. Размер этой энергии E_d можно оценить следующим образом [1]. Как известно, в продуктах взрыва (в полости) остается около 20 % энергии взрыва E_{TNT} . Около 70 % E_{TNT} расходуется на диссипативные процессы (разогрев среды в ближней зоне), 1-3 % E_{TNT} заключено в волне сжатия и сейсмическом сигнале. Таким образом, на собственно разрушение среды расходуется примерно 5 % E_{TNT} .

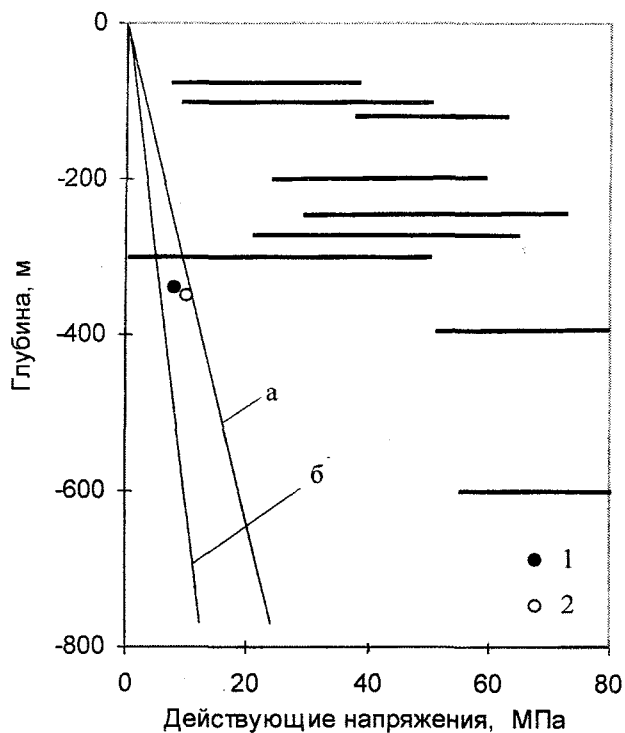


Рис.1. Значения горизонтальных напряжений для некоторых рудников Кольского региона [2]

1 – Каммикиви; 2 – Котсельваара; а – $S_z = \rho g H$; б – $S_x = \{v/(1-v)\} \rho g H$

Анализ амплитуд главных напряжений с глубиной свидетельствует, что, с точки зрения совершенствования технологии взрывного разрушения, нельзя рассчитывать на то, что можно заметно увеличить объем разрушаемой породы при единичном взрыве. Ориентировочные значения главного сжимающего напряжения на разной глубине S_h , удельная упругая энергия массива E_e совместно с относительной величиной упругой энергии сжатия E_s в объеме V (зона разрушения взрыва заряда TNT энергией E_{TNT} определялась согласно экспериментально установленным зависимостям [1]) следующие:

Глубина h , м	10	100	250	500	1000	1500	2000
S_h , Па	$2,8 \times 10^5$	$2,8 \times 10^6$	7×10^6	$1,4 \times 10^7$	$2,8 \times 10^7$	$4,2 \times 10^7$	$5,6 \times 10^7$
E_e , Дж/м ³	0,78	78	490	$1,96 \times 10^3$	$7,8 \times 10^3$	$1,76 \times 10^4$	$5,2 \times 10^4$
E_s/E_{TNT} , %	10^{-5}	10^{-3}	6×10^{-3}	$2,4 \times 10^{-2}$	0,097	0,22	0,64
E_s/E_d , %	2×10^{-4}	0,02	0,12	0,48	1,94	4,4	12,8

Из приведенных данных видно, что возможный вклад упругой энергии, изначально запасенной в массиве горных пород в результате предварительной нагрузки, мал по сравнению с энергией взрыва (условие $V = V_{50}$ реализуется при $h = 1780$ м).

Следовательно, используя предварительно запасенную упругую энергию, нельзя заметно увеличить объем разрушаемой при взрыве горной породы. Учитывая, однако, что энергия, расходуемая на образование новых свободных поверхностей, является достаточно малой величиной, можно ожидать улучшения качества дробления горных пород взрывом при умелом использовании запасов упругой энергии.

Экспериментальные данные

В настоящей работе при анализе влияния напряженного состояния на характеристики разрушения горных пород взрывом использовались следующие экспериментальные данные, полученные при взрывном нагружении образцов твердой среды в широком диапазоне размеров.

Лабораторные эксперименты. Характер разрушения среды изучался на образцах из оргстекла размером $30 \times 30 \times 30$; $100 \times 140 \times 140$ мм разной конфигурации. В качестве источника взрывного воздействия в первом случае использовалась энергия лазерного излучения (1 Дж, длительность импульса 30 нс), во втором случае – сферические заряды из ТЭНа плотностью 1500 кг/м^3 массой 0,2; 0,4 и 0,8 г. На фотографиях представлено развитие зоны разрушения при взрыве сферического заряда у свободной поверхности ненагруженного образца (рис.2, а), а также в центре образца при наличии внешних сжимающих напряжений, обеспечивающих разные виды напряженно-деформированного состояния (рис.2, б-г). Схема нагружения образцов приведена слева от соответствующих фотографий.

Характер разрушения и размер выделяющейся предварительно запасенной упругой энергии изучались на образцах из тиосульфата натрия и канифоли размером $100 \times 100 \times 100$ мм (взрывное и самопроизвольное разрушение материала среды при взрыве сферических зарядов 0,2 г в условиях действующего статического напряжения разного уровня).

Качество разрушения материала среды (оценки среднего размера отдельностей в зоне дробления), а также значения массовых скоростей изучались на образцах из канифоли размером $100 \times 100 \times 100$ мм при взрывном и самопроизвольном разрушении.

Предварительное нагружение образцов осуществлялось с помощью винтового или гидравлического прессов. При изучении самопроизвольного разрушения и взрывного разрушения твердой среды в условиях действующей статической нагрузки применялись специально изготовленные матрицы.

Укрупненный лабораторный эксперимент. Характер взрывного разрушения твердой среды, находящейся под нагрузкой, и значения массовых скоростей изучались при взрывах сферических зарядов массой 0,4 г в блоках из гранита (кубическая форма с размером грани 1 м)

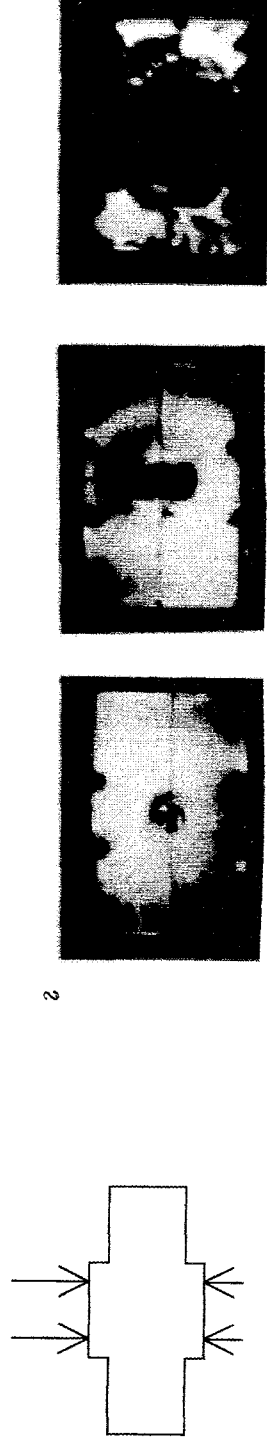
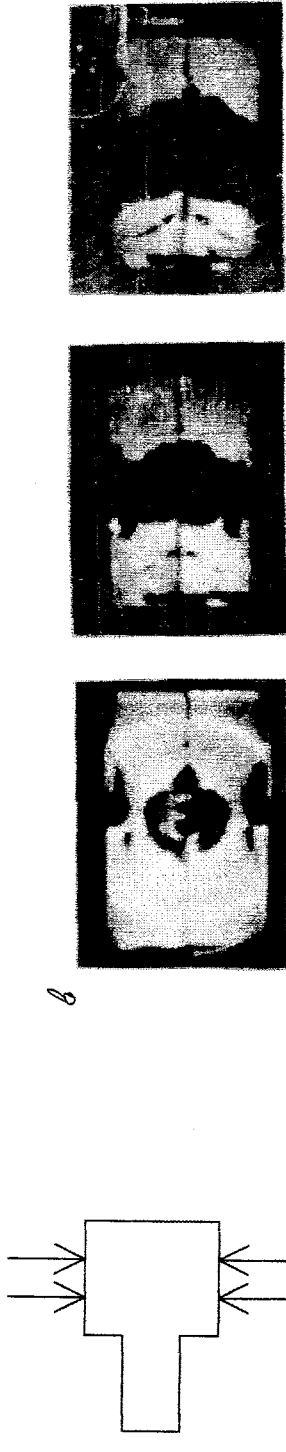
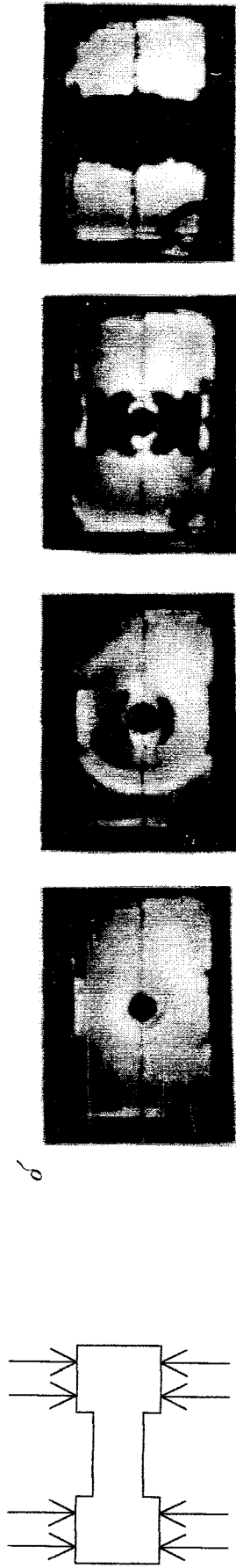
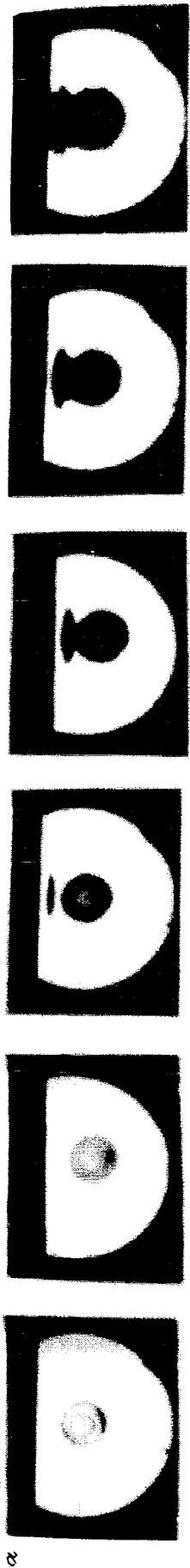


Рис.2. Развитие зоны разрушения при взрыве заряда ТЭНа в оргстекле ($\alpha - \sigma_0 = 0$; $\delta - \sigma_0 = 50$ МПа; $\theta - \sigma_0 = 45$ МПа; $\varepsilon - \sigma_0 = 70$ МПа)

и из бетона марки 500 размером $0,55 \times 0,55 \times 0,65$ м. Нагружение блоков осуществлялось с помощью гидравлического прессы НКМЗ-500, развивающего усилие до 50000 т.

С целью установления масштабного эффекта разрушения использовались образцы из этого же бетона размером $4 \times 4 \times 4$ см.

Таблица 1

Характеристика модельных сред

Модельная среда	Плотность, кг/м ³	Продольная скорость звука, м/с	Прочность на сжатие, МПа	Модуль Юнга, МПа
Бетон-500	2390	-	40	$3,8 \times 10^5$
Гранит (ярцевский)	2610	5150	150	$5,6 \times 10^5$
Оргстекло	1180	2670	65	$5,35 \times 10^3$
Канифоль	1080	2370	20	$3,2 \times 10^3$
Тиосульфат натрия	1650	3000	30	$1,65 \times 10^4$

Некоторые характеристики используемых модельных сред приведены в табл.1.

Самоподдерживающееся разрушение твердой среды

Из практики известно, что в случае накопления в твердой среде значительной по размеру упругой энергии (например, в результате предварительного сжатия) часто фиксируется самопроизвольное разрушение материала среды (яркий пример: горные удары). К самопроизвольному разрушению склонны более хрупкие породы, характеризующиеся меньшей нарушенностью и более простым строением. Быстрое, взрывоподобное выделение упругой энергии с разрушением материала среды и разлетом осколков возможно при быстром изменении напряженно-деформированного состояния.

Исследования, выполненные на модельных средах [9], показали, что для каждого материала существует пороговое значение начального напряжения, начиная с которого возможен процесс самопроизвольного разрушения (потеря механической устойчивости системы с быстрым выделением энергии). Размер этого напряжения превышает предел прочности материала.

Инструментальные наблюдения показали, что разрушение материала среды происходит в виде волны разрушения, распространяющейся от свободной поверхности вглубь вещества. При этом скорости разлета осколков невелики (рис.3).

Самоподдерживающееся разрушение происходит при скоростях деформирования материала около $(0,1-3)10^2 \text{ с}^{-1}$.

Простые оценки с использованием результатов регистрации разлета осколков (кинетическая энергия) и остаточной температуры среды (диссипативные потери) позволяют определить энергию, расходуемую на собственно разрушение среды при самоподдерживающемся разрушении. Размер этой энергии составляет около 50 % от статически запасенной упругой энергии (кинетическая энергия составляет 1-2 %, тепловая – 35-45%).

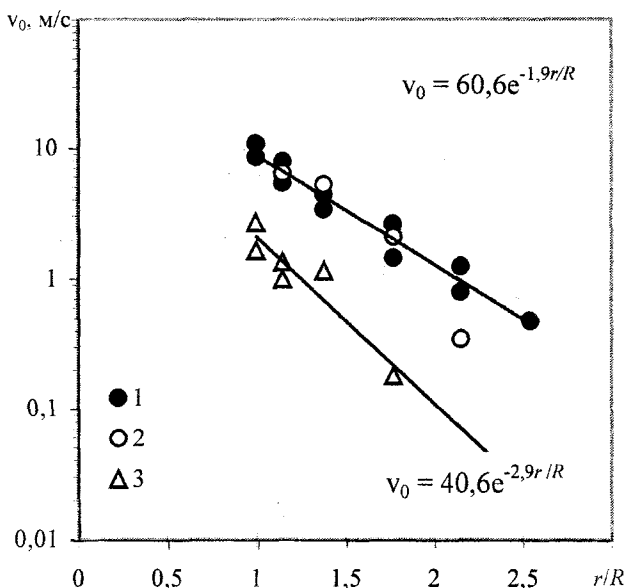


Рис.3. Максимальная массовая скорость разлета осколков среды при самоподдерживающемся разрушении (начальное напряжение 50 МПа)

1,3 – принудительное инициирование (1 – канифоль; 3 – тиосульфат натрия); 2 – самопроизвольное разрушение (канифоль); R – радиус начальной цилиндрической полости

Основные характеристики разрушения твердой среды при взрыве

Разрушение твердой среды при взрыве происходит в волне сжатия, формирующейся в результате расширения продуктов взрыва в камуфлетной полости [1,10]. Не останавливаясь на деталях развития зоны разрушения материала среды при действии взрыва, рассмотрим некоторые характеристики конечного состояния среды.

В результате действия взрыва изначально квазиоднородная твердая среда превращается в конгломерат отдельностей, характеризующихся широким спектром линейных размеров. Для практических целей характер распределения отдельностей по размерам удобно описывать с помощью закона Розина – Раммлера

$$m_+(x)/M_0 = \exp\{-x/x_0\}^n, \quad (1)$$

где $m_+(x)$ – масса отдельностей, характерный линейный размер которых превышает x ; M_0 – общая масса исследуемой пробы разрушенного материала; x_0 и n – параметры распределения, причем x_0 характеризует степень дробления среды, а n – равномерность дробления.

В случае распределения Розина – Раммлера средний размер отдельности $\langle x \rangle$ вычисляется аналитически и определяется зависимостью

$$\langle x \rangle = x_0 \Gamma\{1 + 1/n\},$$

где $\Gamma\{1 + 1/n\}$ – гамма-функция соответствующего аргумента.

В спрямляющих координатах, характерных для распределения (1), распределение осколков по размерам имеет вид прямой линии, удобной для анализа. Из рис.4 хорошо видно, что с увеличением расстояния от заряда средний размер осколков увеличивается. Это полностью соответствует падению амплитуды взрывного воздействия с расстоянием, которое определяется геометрическим расхождением взрывной волны сжатия, а также поглощением энергии по мере распространения волны в среде.

Результаты многочисленных лабораторных экспериментов показывают, что параметры взрывного разрушения твердых сред геометрически самоподобны и описываются едиными аналитическими зависимостями $\langle x \rangle\{r\}$, если в качестве аргумента использовать относительную величину $r/q^{1/3}$ или r/R_0 (где q и R_0 – соответственно масса заряда ВВ и его радиус). В частности, средний размер отдельности в канифоли, разрушенной взрывами сферических зарядов различной массы, хорошо описывается с расстоянием зависимостью (рис.5)

$$\langle x \rangle = 0,0012 (r/R_0)^{1,84}. \quad (2)$$

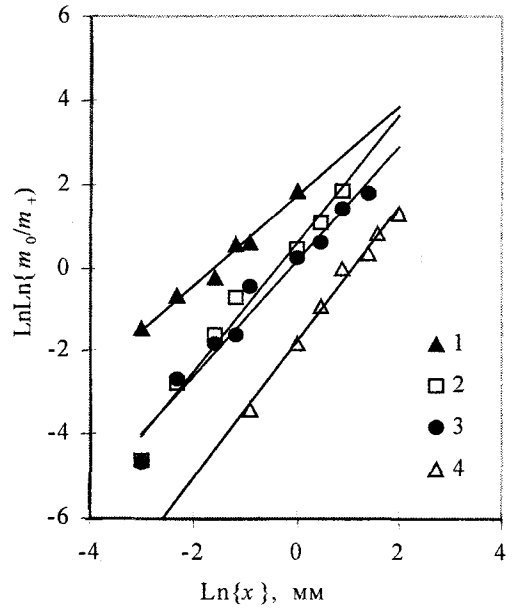


Рис.4. Гранулометрический состав канифоли в зоне разрушения взрыва; расстояния от центра взрыва, см (r/R_0): 1 – 2 (5); 2 – 3 (7,5); 3 – 5 (12,5); 4 – 7 (17,5)

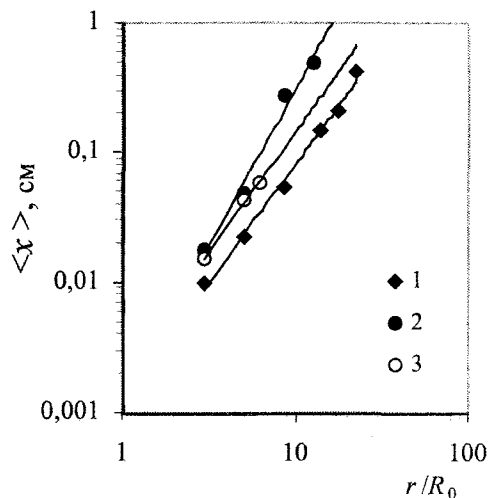


Рис.5. Средний размер отдельности в канифоли, разрушенной взрывом заряда $q = 0,4$ г 1 – камуфлетный взрыв; 2 – взрыв на поверхности; 3 – взрыв заряда на поверхности при начальном напряжении $S_z = 150$ МПа

Важным параметром, характеризующим разрушение твердых материалов, является скорость деформации, при которой осуществляется внешняя нагрузка. Для взрывного разрушения скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ заметно изменяется с расстоянием r и значительно превосходит скорость деформирования среды при самоподдерживающемся разрушении:

r/R_0	2,5	5	8,75	13,75
$\dot{\epsilon}, \text{с}^{-1}$	5×10^4	8×10^3	2×10^3	6×10^2

Условия проведения взрыва существенным образом влияют на характеристики разрушения среды. Это не удивительно, так как разрушение твердых сред существенно зависит от параметров процесса. В частности, в работе [11] установлено, что степень дробления твердой среды (канифоль) увеличивается с возрастанием деформации, достигаемой в момент разрушения материала.

Дополнительное дробление среды происходит в этом случае при дополнительном деформировании за пределом упругости материала.

При взрыве на параметры разрушения среды оказывают заметное влияние условия проведения взрыва. Например, при расположении заряда ВВ вблизи свободной поверхности приходящая от нее волна разгрузки снижает эффективность дробления среды, в результате чего средний размер осколков увеличивается (рис.5).

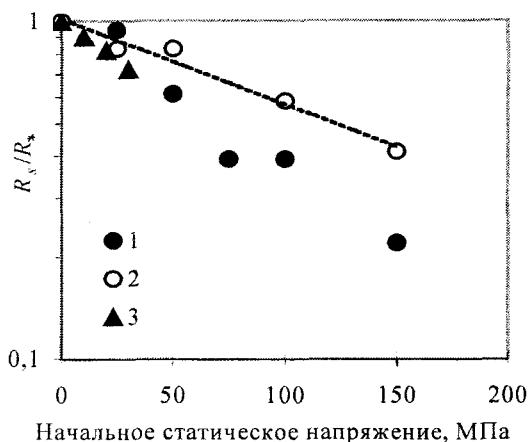


Рис.6. Отношение радиуса зоны дробления материала среды при взрыве с начальной статической нагрузкой R , к радиусу зоны разрушения при взрыве в ненагруженной среде R^*
1,2 – взрыв заряда-камуфлета в условиях, близких к гидростатическому сжатию (1 – канифоль; 2 – оргстекло); 3 – взрыв сферического заряда на поверхности среды (канифоль) с искусственной преградой

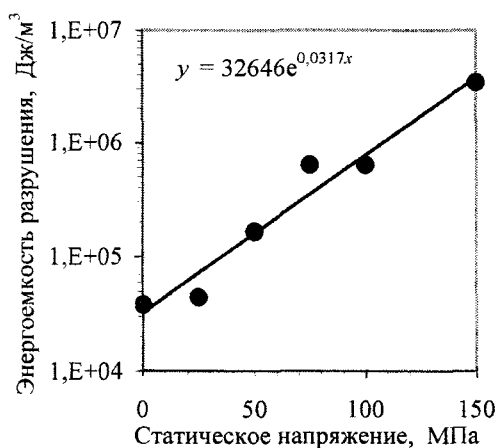


Рис.7. Энергоемкость разрушения канифоли взрывом при увеличении статической нагрузки (случай всестороннего сжатия)

Характеристики взрывного разрушения предварительно-напряженной среды

Разрушение твердой среды в волне сжатия происходит при достижении определенного соотношения между главными напряжениями, которые формируются в среде в результате действия взрывной нагрузки. В зависимости от условий взрывания и свойств горных пород в качестве такого соотношения может выступать условие Кулона (случай разрушения сдвигом), условие достижения максимальным по модулю растягивающим напряжением прочности среды на разрыв либо другие условия, выполнение которых определяет потерю механической целостности материала.

Естественно предполагать, что наличие начального напряженного состояния твердой среды изменяет соотношения между главными напряжениями, вызываемыми взрывом, что ведет к изменению характера разрушения среды.

Например, в условиях, близких к гидростатическому сжатию (значения горизонтальных напряжений и вертикального близки между собой), начальная нагрузка заметно уменьшает объем зоны разрушения твердой среды при взрыве [1] (рис.6). Для случая взрыва заряда-камуфлета зависимость $R_d(P)$ (где P – начальное статическое напряжение, вызванное всесторонним сжатием образца) имеет вид

$$R_s/R_* = 1,01 \exp\{-0,0058P\}.$$

Уменьшение объема разрушенного материала при увеличении начальной гидростатической нагрузки означает увеличение энергоемкости разрушения среды E_0 . В частности, для модельной среды (канифоль) зависимость между E_0 и P (рис.7) имеет вид

$$E_0 = 3,3 \times 10^4 \exp\{0,03P\}.$$

Отметим интересную деталь: отношение удельной энергии статического сжатия к энергоемкости разрушения твердой среды взрывом ведет себя немонотонно с увеличением внешней нагрузки (рис.8).

В случаях сложного напряженно-деформированного состояния, что достигается, например,

при взрыве в присутствии одной или нескольких свободных поверхностей, характер разрушения среды иной. Фотографии процесса разрушения твердой среды при взрыве на рис.2, б-г отчетливо демонстрируют, что в случае квазиоднородного нагружения зона разрушения «вытягивается» вдоль направления максимального сжимающего напряжения. Несимметричность зоны разрушения сказывается на форме воронки выброса, которая повторяет форму зоны разрушения.

Сравнение результатов гранулометрического анализа разрушенной среды для случаев ненагруженного образца и образца, находящегося в сложном напряженно-деформированном состоянии, показывает, что в последнем случае условия для разрушения твердой среды являются более благоприятными. Действительно, как это видно из рис.5, средний размер осколков в зоне разрушения начально напряженной среды заметно меньше, чем при взрыве в ненапряженной среде. Эта разница увеличивается с расстоянием от взрыва (по мере приближения к границе зоны разрушения), поэтому можно предположить что вблизи границы $r = R_s$ формируются условия, способствующие инициированию процесса самоподдерживающегося разрушения.

Аналитически зависимость среднего радиуса зоны разрушения при взрыве в сложнапряженной твердой среде представима в виде (рис.6, канифоль)

$$R_s/R_* = 1,02 \exp\{-0,01\sigma_0\}.$$

Повышение качества дробления твердой среды за счет использования энергии предварительного нагружения

Проще всего анализировать процесс взрывного разрушения в хрупких средах, в которых разрушение материала среды происходит в результате образования и распространения трещин.

Характер распространения трещин определяется как наличием дефектов в материале среды, так и условиями нагружения. На этапе зарождения трещин основную роль играет строение среды (наличие зародышей-концентраторов) и ее прочность. На этапе ускоренного роста трещин основную роль играют условия нагружения.

Как известно, процесс образования и распространения трещины можно считать регулярным, если энергия, высвобождающаяся при распространении трещины, равна энергии, расходуемой на образование новой свободной поверхности. Наличие достаточно высоких начальных напряжений приводит к тому, что режим регулярного распространения трещин в среде при взрывном нагружении перестает реализовываться (режим распространения трещин становится неустойчивым). Вследствие «избыточной» энергии трещинообразования (освобождающаяся

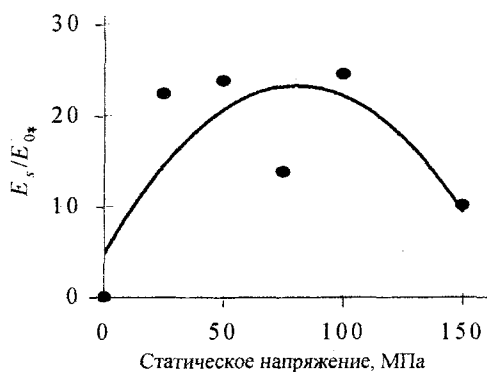


Рис.8. Отношение удельной энергии статического сжатия к энергоемкости разрушения твердой среды (канифоль) взрывом в условиях, близких к гидростатическому сжатию

энергия упругой деформации E_e при развитии трещины превышает необходимую поверхностную энергию E_s , затрачиваемую на образование новых поверхностей растущей трещины) и реализуется режим самопроизвольного разрушения, характеризующийся ветвлением трещин на дефектах. При этом, чем выше отношение E_e/E_s , тем больше вероятность самопроизвольного разрушения (тем больше ветвление на дефектах и, следовательно, меньше размер отдельности).

Запишем это в виде следующих соотношений. Дополнительное напряжение, возникающее при статическом нагружении среды, на дефектах определим как

$$\Delta\sigma = k\sigma_0,$$

где k – коэффициент концентрации напряжений ($k \approx 2-10$ в зависимости от свойств материала среды).

Дополнительная энергия в единице объема среды

$$E_e \approx (\Delta\sigma)^2 N,$$

где N – среднее количество дефектов в единице объема.

Согласно экспериментальным данным, средний размер отдельности при взрыве заряда-камуфлета в ненагруженной среде (канифоль)

$$\langle x_0 \rangle = 4,6 \times 10^{-3} \{r/R_0\}^{2,2}.$$

Поскольку $v_0(r) = 1,33 \times 10^3 \{r/R_0\}^{-1,6}$ м/с и $\sigma_f = \rho c v_0$,

$$\langle x_0 \rangle = 90 \{\rho c\}^{1,375} \sigma_f^{-1,375}.$$

В случае предварительного нагружения

$$\langle x_0 \rangle_f \sim 90 \{\rho c\}^{1,375} \{\sigma_f + k\sigma_0\}^{-1,375}.$$

Таким образом,

$$K = \langle x_0 \rangle / \langle x_0 \rangle_f = \{[\sigma_f + k\sigma_0] / \sigma_f\}^{1,375}.$$

Последнее соотношение можно определить как коэффициент улучшения «качества» дробления при предварительном нагружении среды.

Рассмотрим значения параметра K для взрыва в канифоли и сравним с параметром K_e , полученным в результате анализа экспериментальных данных (табл.2). Из табл.2 следует, что с учетом разброса экспериментальных данных, лучшее согласие с экспериментом наблюдается при $k < 1$, т.е. на разрушение среды расходуется только часть упругой энергии, запасенной в результате предварительного нагружения. Это представляется правдоподобным. Действительно, в результате действия взрыва в среде формируется поле остаточных напряжений, которые препятствуют полному выделению запасенной энергии.

Таблица 2

Коэффициент улучшения качества дробления при взрыве в предварительно-напряженной среде ($\sigma_0 = 150$ МПа)

r, см	r/R ₀	v ₀ , м/с	σ _f , Па	k			K _e
				1	0,5	0,4	
1	2,5	307	7,86 × 10 ⁸	1,27	1,13	1,1	~1
2	5	101	2,58 × 10 ⁸	1,88	1,42	1,3	~1
3,5	8,75	41,5	1,06 × 10 ⁸	3,36	2,08	1,85	~2

Более полного высвобождения энергии предварительного нагружения можно добиться только при условиях, способствующих инициированию самоподдерживающегося разрушения [9]. Действительно, при определенных условиях возникают предпосылки для самопроизвольно-

го выделения запасенной энергии. В этом случае разрушение твердой среды может происходить и без взрывного воздействия. Таким образом, когда в результате взрыва резко изменяется вид напряженного состояния в среде (например, резко удаляется одна из «подпорок»), можно ожидать полезной работы, идущей на образование новых поверхностей.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что наряду с негативным влиянием начальной нагрузки на процесс разрушения (уменьшение количества разрушаемого материала) при определенных условиях отмечается повышение качества дробления твердой среды взрывом. Как уже отмечалось, это объясняется дополнительным дроблением вещества в результате высвобождения предварительно-запасенной в среде упругой энергии.

Можно предполагать, что дробление статически напряженной твердой среды взрывом при наличии условий разгрузки осуществляется в две стадии. На первой происходит динамическое разрушение материала во взрывной волне сжатия. Сформировавшийся при этом объем дробленого материала, характеризующегося низкими несущими способностями, обуславливает специфические условия для разгрузки части объема предварительно-нагруженной среды.

Вторая стадия разрушения – дополнительное дробление (доразрушение) диспергированного волной сжатия материала за счет его дополнительного деформирования вследствие высвобождения части изначально запасенной упругой энергии. Вероятнее всего, основная дополнительная деформация происходит вблизи границы зоны взрывного разрушения среды, где реализуется возможность разгрузки неразрушенного материала.

Оценим дополнительную деформацию, которую испытывает разрушенная волной сжатия среда за счет высвобождения упругой энергии предварительного нагружения. Для этого воспользуемся результатами работы [11], в которой определен размер дополнительного дробления твердой среды (канифоль) за счет деформирования за пределом прочностных характеристик материала. Средний размер осколков после «доразрушения» L описывается зависимостью

$$L/L_0 = \exp\{-14E_a\},$$

где L_0 – средний размер отдельностей в момент разрушения среды; E_a – дополнительная деформация, которую испытывает разрушенная среда.

Дополнительная деформация диспергированного в волне сжатия материала в результате высвобождения упругой энергии предварительного нагружения (взрыв заряда $q = 0,4$ г на поверхности канифоли с преградой; $\sigma_0 = 150$ МПа) имеет следующие значения:

r/R_0	3	5	6,25
$\langle x \rangle_{150} / \langle x \rangle_0$	1,06	1,41	1,58
E_a	$4,4 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$

Примечание. $\langle x \rangle_{150}$ и $\langle x \rangle_0$ – средний размер осколков при взрыве в нагруженной и ненагруженной среде соответственно.

По величине E_a легко определить объем материала V_s , разгрузка которого определила дополнительное разрушение среды. С учетом того, что на собственно разрушение при самоподдерживающемся разрушении расходуется примерно 50 % высвобождающейся упругой энергии, получаем

$$V_s \approx (0,8 \div 1,0) V_*,$$

где V_* – объем зоны разрушения.

Заключение

1. Эффект разрушения взрывом предварительно-напряженной среды является неоднозначным:

– в условиях всестороннего сжатия (квазигидростатика) объем области дробления твердой среды уменьшается с увеличением нагрузки;

– при одноосном сжатии процесс разрушения развивается вдоль направления сжатия и объем разрушенного материала может быть значительным;

– при действии сжимающих напряжений, превосходящих предел прочности материала, после стадии взрывного дробления может развиваться дополнительное разрушение среды, вызываемое высвобождением предварительно запасенной упругой энергии в некотором объеме среды;

– в случае неоднородного поля статических напряжений можно управлять процессом взрывного разрушения путем соответствующего размещения скважинных зарядов и регулирования очередности их подрыва; в этом случае объем дробления твердой среды может быть увеличен.

2. При обеспечении условий высвобождения собственного запаса упругой энергии среды в процессе взрывного нагружения повышается качество дробления (выход более мелких фракций), что должно приводить, в частности, к уменьшению выхода негабарита.

3. Представляется более эффективным проводить взрывную отбойку горных пород в зонах повышенных напряжений, характеризующихся наличием начальных деформаций породы и условий для разгрузки. Можно, в частности, рекомендовать располагать шпур и скважины с ВВ вдоль поверхности наибольшего «выгиба» горных пород.

4. При разработке рекомендаций по оптимальному дроблению взрывом массивов горных пород, находящихся в поле высоких напряжений, необходимо дополнительно рассматривать ряд факторов, среди которых особенно важно выделить количественное влияние соотношения между главными статическими сжимающими напряжениями и скорости деформирования на средний размер осколков.

5. При проведении работ, связанных с оценкой взрываемости горных пород на конкретном участке массива, необходимо определять вид напряженного состояния массива горных пород для выбора схем короткозамедленного взрывания (расположение скважин, конфигурация их групп).

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В. Геомеханика крупномасштабных взрывов / В.В.Адушкин, А.А.Спивак. М.: Недра, 1993. 319 с.
2. Айтматов И.Т. Методы и результаты изучения напряженного состояния скальных массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением / И.Т.Айтматов, В.И.Ахматов, В.И.Борщ-Компонец и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1987, № 4. С. 3-21.
3. Анохин И.Н. Зависимость частоты землетрясений от изменения напряженного состояния литосферы, вызываемого сезонными вариациями ротационного режима Земли / И.Н.Анохин, В.М.Бонгаренко // Изв. вузов. Геология и разведка. 1995. № 4. С. 89-97.
4. Варга А.А. Современные проблемы изучения естественных напряжений в скальных массивах // Геоэкология. 1994. № 1. С. 3-15.
5. Кропоткин П.Н. Напряженное состояние земной коры и геодинамика / П.Н.Кропоткин, В.Н.Ефремов, В.М.Макеев // Геотектоника. 1987. № 1. С. 3-24.
6. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре // Геотектоника. 1996, № 2. С. 3-15.
7. Кулиев Г.Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах // ДАН. 2000. Т. 370. С. 534-537.
8. Леонов Ю.Г. Напряжения в литосфере и внутриплитная тектоника // Геотектоника. 1996. № 2. С. 3-15.
9. Спивак А.А. Поведение среды при самопроизвольном разрушении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1982. № 4. С. 51-56.
10. Цветков В.М. О поведении хрупко разрушаемой среды при камуфлетном взрыве / В.М.Цветков, И.А.Сизов, А.Д.Поликарпов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1977. № 4. С. 36-42.
11. Цветков В.М. Формирование осколков при дроблении хрупкой среды в условиях всестороннего сжатия / В.М.Цветков, Б.Г.Лукишов, Л.Д.Лившиц // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1979. № 3. С. 46-51.
12. Zoback M.L. et al. Global patterns of tectonic stress// Nature. Vol.341. P.291-298.