

О МЕХАНИЗМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОСКОЛКОВ ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ

И. А. Сизов, В. М. Цветков

(Москва)

Применение взрыва в промышленности, связанное с разрушением горных пород, требует умения управлять процессом осколкообразования. Особенно существенной эта задача становится при больших масштабах врывов (порядка килотонн ВВ), когда дифференциация воздействия взрыва с расстоянием оказывается наиболее отчетливой. При этом появляется возможность использовать практически различия в проявлениях механического эффекта взрыва с расстоянием. С этой точки зрения необходимо знать, как меняется средний размер осколка и гранулометрический состав разрушенной среды по мере удаления от центра взрыва. Имеющиеся в литературе сведения [1—3] описывают лишь интегральный состав среды, усредненный по всему разрушенному объему. В настоящей работе изложены результаты исследования гранулометрического состава разрушенной среды на различных расстояниях от центра сосредоточенного камуфлетного взрыва.

Эксперименты проводились в монолитных блоках канифоли, размеры которых превышали размер динамической зоны разрушения, составляющей по данным оптических экспериментов [4] двадцать пять начальных радиусов заряда. Влияние откольных явлений, возникающих при выходе взрывной волны на границы блока, исключалось путем выбора достаточно больших размеров блока и помещения блока в специальную сдерживающую оболочку. В качестве взрывчатого вещества использовались сферические заряды тэна плотностью $1,5 \text{ г/см}^3$ и весом 0,4 г, располагаемые в центре блока. Для определения степени разрушения с расстоянием после взрыва блок вскрывался и брались пробы среды с различных расстояний затем пробы разбирались под микроскопом и производился их ситовой анализ.

В результате такой обработки получена зависимость среднего размера куска от расстояния до центра взрыва, представленная на рис. 1. В интервале расстояний $8a_0 < r < 25a_0$ эту зависимость можно описать выражением

$$\bar{L}/a_0 = 7 \cdot 10^{-4} (r/a_0)^{2,45},$$

где a_0 — радиус заряда ($a_0 = 4 \text{ мм}$); \bar{L} — средний по массе в пробе размер куска. На меньших расстояниях размер куска, как это видно из рис. 1, изменяется сильнее. Таким образом, вблизи поверхности с радиусом, равным восьми радиусам заряда, происходит изменение в процессе разрушения.

В [4, 5] получено, что разрушение при взрыве начинается на некоторой распространяющейся от центра сферической поверхности, названной фронтом дробления. Как показали многочисленные опыты с оптической регистрацией взрывов зарядов различного веса, фронт дробления оказывается достаточно устойчивым, и положение его в пространстве со временем мало меняется от опыта к опыту. Последнее свидетельствует о том, что на фронте дробления происходит расчленение среды множеством трещин, т. е. именно дробление. Однако механизм разрушения среды на динамическом фронте дробления не остается постоянным. Вблизи расстояний $r = (8 \div 10)a_0$ происходит смена механизма разрушения: на больших расстояниях материал разрушает-

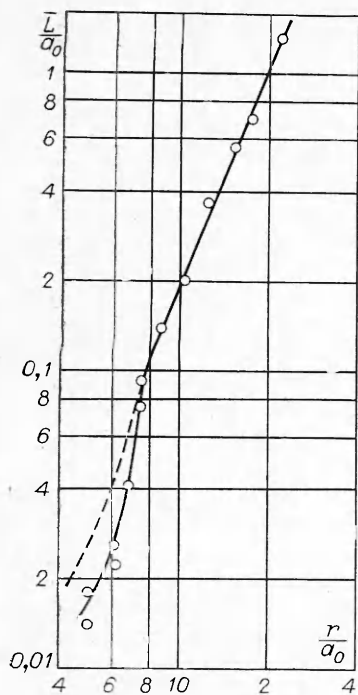


Рис. 1.

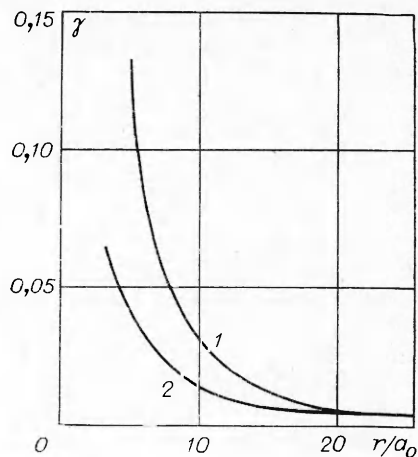


Рис. 2.

ся путем отрыва, на меньших — путем сдвига. Указанная граница практически совпадает с тем расстоянием, начиная с которого происходит изменение закона затухания среднего размера куска.

Кроме того, разрушение, имеющее место на динамическом фронте дробления, не является окончательным. За фронтом дробления среда не покоится, а продолжает двигаться от центра взрыва и деформироваться в течение некоторого времени. Относительное влияние этого дополнительного деформирования возрастает по мере приближения к центру взрыва. На рис. 2 приведен график максимальных сдвиговых деформаций (1) и деформаций на фронте дробления (2), действующих в канифоли на различных расстояниях от центра взрыва.

Это протекающее за фронтом дробления деформирование уже нарушенной среды происходит в условиях всестороннего сжатия и приводит к дополнительному вторичному разрушению. Таким образом, вторичное разрушение происходит одновременно во всем объеме движущейся среды, ограниченном фронтом дробления. Этот процесс не ограничен снизу по скорости деформирования и поэтому близок к квазистатическому процессу в том смысле, что волновыми процессами в разрушенной среде на этой стадии можно пренебречь.

Для оценки влияния вторичного объемного дробления была создана специальная установка, в которой образец канифоли цилиндрической формы, помещенный в свинцовую оболочку, подвергался продольному осевому деформированию при постоянной боковой нагрузке ($\delta_1 > \delta_2 = \delta_3$). Такая постановка эксперимента позволила осуществить объемное разрушение с образованием множества трещин, в отличие от случая одноосного сжатия, когда происходит образование и последующее развитие лишь единичных магистральных трещин.

Результаты проведенных экспериментов [6] на этой установке показали, что объемное деформирование сопровождается значительным измельчением среды, определяемым экспоненциальным законом

$$\frac{\bar{L}}{L_0} = e^{-\Delta \epsilon_{11}/\epsilon_x},$$

где L_0 , L — средние по массе размеры осколка, отвечающие соответственно началу разрушения и некоторой величине продольной деформации $\Delta \epsilon_{11}$ (%), которая отсчитывается от момента разрушения, а $\epsilon_* = 7\%$. Боковое напряжение, воздействующее на образец со стороны оболочки в каждом эксперименте, поддерживалось постоянным, хотя от опыта к опыту его можно было варьировать. Изменение бокового напряжения на порядок в различных экспериментах показало, что оно влияет лишь на начальный размер осколка L_0 , образующегося в момент первичного разрушения, но не сказывается на степени измельчения, определяемой лишь величиной запредельной деформации. Таким образом, наблюдаемый во взрывных экспериментах излом зависимости среднего размера куска от расстояния может быть обусловлен двумя причинами:

- 1) сменой механизма разрушения по мере удаления от центра взрыва (сдвиг — отрыв);
- 2) влиянием вторичного объемного дробления вблизи центра взрыва.

Если влияние вторичного объемного дробления на средний размер осколка, как показали эксперименты, определяется экспоненциальной зависимостью, то определить степень влияния сдвигового механизма разрушения на фронте дробления непосредственно в эксперименте не удастся. Для его оценки из общей зависимости размера осколка от расстояния исключалось влияние вторичного объемного разрушения и использовались приведенная выше формула и значения радиальных деформаций на фронте дробления [5]. Полученный результат представлен на графике рис. 1 штриховой линией, которая характеризует результат сдвигового разрушения на фронте дробления. Эта линия на расстоянии $8a_0$ переходит в общую зависимость. Таким образом, можно считать, что основная причина более сильного изменения размера осколка с расстоянием в ближней зоне кроется в механизме объемного дробления.

Вместе с размером осколков в экспериментах исследовался гранулометрический состав разрушенной среды. Обработка результатов проводилась подбором того или иного вида распределения, наиболее удачно описывающего экспериментальные результаты. Такая обработка показала, что наиболее подходящими являются распределения Вейбулла (или закон Розина — Рамлера) и логнормальное распределение.

Теоретическое построение распределения Вейбулла на основе вероятностных представлений сделано в [1], где при выводе распределения в качестве основного физического допущения принималось, что независимо от механизма разрушения в окрестности образовавшихся трещин материал разгружается. Это предположение равносильно утверждению об однократности процесса разрушения. Функция распределения Вейбулла имеет вид

$$\Phi(L) = m_-/m_0 = 1 - e^{-(L/L_{00})^n},$$

где m_- — масса осколков с размером, меньшим некоторого значения L ; m_0 — масса всех осколков; L_{00} , n — параметр размера и параметр формы соответственно. Часто используется другая форма этого распределения, называемая законом Розина — Рамлера:

$$\frac{m_+}{m_0} = e^{-(L/L_{00})^n},$$

которая удобна для графической проверки применимости этого закона. Здесь $m_+ = m_0 - m_-$.

Логнормальное распределение, впервые обоснованное в [7], описывается интегралом вероятности

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-y^2/2} dy.$$

где $y = (\ln L - \ln L_{50}) / \sigma_{\ln L}$; L_{50} , $\sigma_{\ln L}$ — параметры распределения.

Основное предположение, сделанное в [7] при выводе логнормального распределения, заключалось в многократности процесса разрушения всех частиц независимо от первоначального распределения. При этом предположении показано, что функция распределения частиц по размеру асимптотически стремится к логарифмически нормальному закону.

Экспериментальные результаты, обработанные в спрямляющих координатах, характерных для закона Розина—Рамлера и логнормального распределения, приведены на рис. 3, а, б.

Видно, что в периферийной части зоны разрушения опытные точки хорошо описываются законом Розина — Рамлера, но вблизи центра взрыва это распределение оказывается неподходящим. Здесь предпочтительным оказывается логнормальное распределение. Такая ситуация объясняется механизмом разрушения, который реализуется при взрыве. Действительно, на далеких расстояниях от центра взрыва разрушение происходит на динамическом фронте дробления путем образования радиальных трещин отрыва. Это разрушение однократно и соответствует предпосылкам, заложенным при выводе закона Розина — Рамлера. В ближней зоне взрыва на первичное разрушение, происходящее на фронте

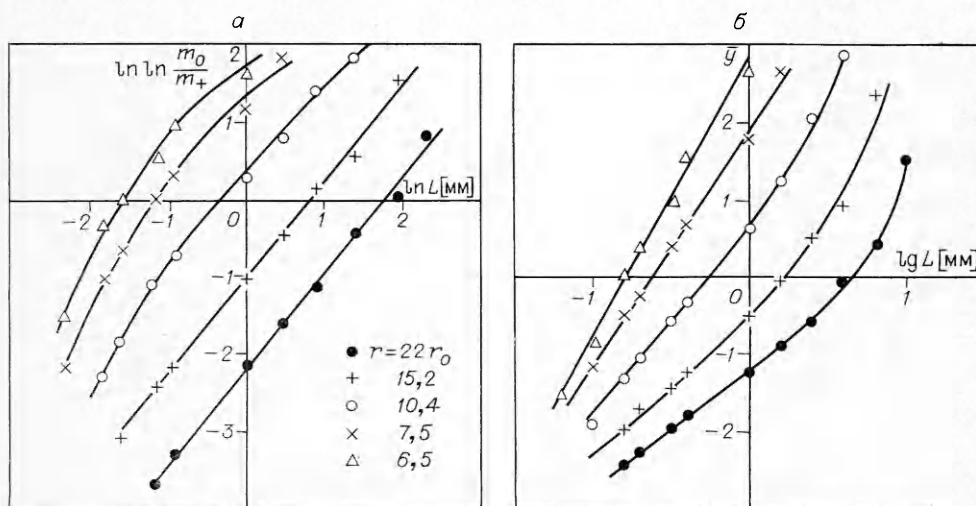


Рис. 3.

дробления, накладывается последующее вторичное дробление, которое по своему механизму многократно и поэтому соответствует предпосылкам логнормального распределения. Аналогичная ситуация наблюдалась и при проведении статических экспериментов с дроблением в условиях всестороннего сжатия [6].

Таким образом, с приближением к центру взрыва не только существенно уменьшается размер осколка, но также значительно изменяется гранулометрический состав разрушенной среды. Последнее

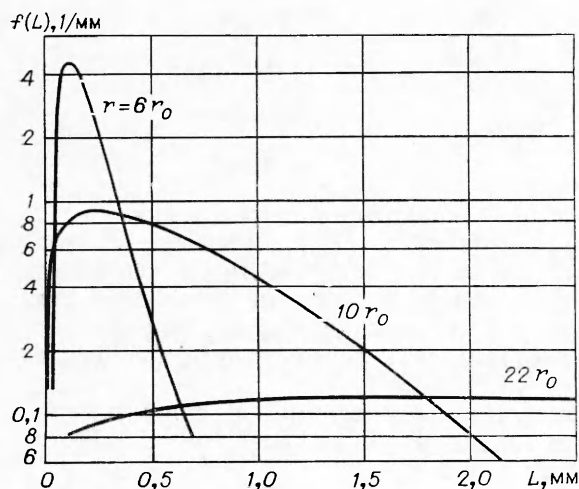


Рис. 4.

периферийной зоной, где сосредоточена преобладающая масса разрушенной породы. В случае взрыва в безграничной среде, когда периферийная зона разрушена путем отрыва на динамическом фронте дробления, интегральный гранулометрический состав будет описываться законом Розина — Рамлера. На практике это реализуется в случаях взрывов с относительно малым удельным расходом ВВ, например, при взрывах рыхления. Когда взрывы производятся в малых объемах породы при больших удельных расходах ВВ (интенсивное дробление), существенным становится влияние вторичного объемного дробления. В этих случаях интегральный гранулометрический состав будет описываться логнормальным распределением.

Механизм объемного дробления, наблюдаемый вблизи центра взрыва, является основной причиной переизмельчения среды и возникающих при этом тепловых потерь, вызванных большими сдвиговыми деформациями разрушенной сжатой среды. Предложенный в [8] метод взрывов с воздушными промежутками позволяет за счет уменьшения деформаций в ближней зоне ослабить переизмельчение и снизить тепловые потери.

Механизм вторичного объемного дробления в ряде случаев может быть использован и фактически используется в технологических схемах взрыва для увеличения массы разрушенной породы и степени ее измельчения. К таковым следует отнести взрывы на отбитую породу, короткозамедленные взрывы, взрывы с перемещением среды на отработанное пространство. В этих случаях возможность перемещения горной породы в некотором направлении, а поэтому и дополнительного деформирования и разрушения ее позволяет использовать энергию ВВ более целенаправленно. Таким образом, существование фазы вторичного объемного дробления дает возможность управлять состоянием разрушенной среды, регулируя ее гранулометрический состав и средний размер куска.

Поступила в редакцию
24/XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Кузнецов. Математические модели взрывного дела. Новосибирск, «Наука», 1977.
2. Б. Н. Кутузов. Взрывное и механическое разрушение горных пород. М., «Недра», 1973.

3. Н. Н. Фаддеенков. ФТПРПИ, 1974, 6, 40.
4. В. М. Цветков, И. А. Сизов, А. Д. Поликарпов. ФТПРПИ, 1977, 4.
5. В. М. Цветков, И. А. Сизов, Н. М. Сырников. ФТПРПИ, 1977, 6.
6. В. М. Цветков, Б. Г. Лукишов, Л. Д. Лившиц. ФТПРПИ, 1979 (в печати).
7. А. Н. Колмогоров. Докл. АН СССР, 1941, 31, 2.
8. Н. В. Мельников, Л. Н. Марченко.— В сб.: Взрывное дело № 45/2, М., Гостехиздат, 1960.

ТЕМПЕРАТУРА И ДАВЛЕНИЕ ГАЗОВ В ПОЛОСТИ ПОДЗЕМНОГО ВЗРЫВА

В. А. Егоров, В. М. Колобашкин, Н. А. Кудряшов
(Москва)

Исследование температуры и давления газообразных продуктов взрыва в полости взрыва после окончания гидродинамической фазы проводилось в работах [1, 2]. В [1] приведены данные эксперимента, полученные при измерении давления газов в полости, и предложена расчетная зависимость температуры продуктов взрыва, которая учитывает остывание газов из-за теплопередачи. Решение задачи о температуре и давлении продуктов взрыва в полости с учетом присоединения вещества расплава к газам полости и остывания их из-за излучения и теплообмена рассматривалось в [2].

В настоящей работе исследование температуры и давления газов в полости подземного взрыва проводится с учетом теплообмена продуктов взрыва с поверхностью расплава, теплопроводности породы, конденсации тугоплавкого компонента и утечки газов из полости под действием избыточного давления.

При подземном взрыве образуется ударная волна, которая при своем движении от точки взрыва последовательно испаряет, расплавляет и разрушает окружающую породу. Известно [3—5], что при сильном взрыве ударной волной испаряется ~ 70 т породы на 1 кт мощности. Используя результаты взрыва «Райниер» [6] (мощность 1,7 кт, туф), получаем из оценки зоны испарения ($\sim 2,3$ м) и зоны плавления ($\sim 3,3$ м), что ударной волной плавится приблизительно 150 т породы на 1 кт взрыва.

Аналогично [7] будем считать, что продукты взрыва в полости состоят из тугоплавкого компонента породы (SiO_2), паров воды и летучего компонента (CO_2). Радиус полости, образовавшейся при подземном взрыве, зависит от мощности заряда, глубины его заложения, содержания воды и летучих компонентов в породе [8, 9]

$$R_0 = c_0 q^h (\rho h)^{-1/4}. \quad (1)$$

Здесь R_0 — радиус полости; ρ — плотность породы; h — глубина заложения заряда; q — мощность взрыва. Значение постоянной c_0 определено для нескольких типов пород в [9].

Исследование давления продуктов взрыва на момент окончания расширения полости подземного взрыва проводилось в [5]. Численные расчеты показали, что давление газов в полости можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$p_0 = k \rho g h, \quad (2)$$

где g — ускорение свободного падения; множитель k зависит от свойств породы и изменяется от 1,3 до 2,3 [5].