

ЛИТЕРАТУРА

1. W. A. Bone, R. P. Fraser, W. H. Wheeler. J. Chem. Society, 1935, A, 235, 29.
2. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Я. К. Трошин, К. И. Щелкин. Газодинамика горения. М., «Наука», 1963.
4. Ю. Н. Денисов. ФГВ, 1974, 10, 3, 186.
5. В. И. Манжалеи, В. В. Митрофанов. ФГВ, 1973, 9, 5, 703.
6. Б. В. Войцеховский. Докл. АН СССР, 1957, 114, 4, 717.

УДК 622.23.026.001.57

О ДРОБЛЕНИИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ

В. Н. Родионов, В. М. Цветков, И. А. Сизов, Б. Г. Лукишов

Дробление — это вид разрушения, при котором в некотором объеме образуется такое множество трещин, что материал может быть легко превращен в грудку кусков. В настоящей статье излагаются результаты лабораторных экспериментов, дающих представление о процессе дробления при взрыве камуфлетного заряда. В частности доказано совпадение фронта дробления, который при определенных условиях совпадает с фронтом ударной волны. Скорость распространения фронта дробления должна быть достаточно велика, чтобы не было сильного влияния трещин друг на друга. Другой механизм дробления — медленное, квазистатическое деформирование материала под нагрузкой. Процесс идет в объеме и не ограничен снизу по скорости. Второй процесс происходит за фронтом дробления и особенно велика эффективность в ближней к полости области. На периферии же роль второго механизма дробления, по-видимому, мала, так как характерный размер отдельности при одинаковых степенях деформации будет расти с масштабом взрыва [1] вследствие закона геометрического подобия.

Результаты лабораторных [2] и натуральных [3] исследований камуфлетного взрыва показывают, что на разных расстояниях от центра взрыва степень разрушения горной породы оказывается различной. Вблизи центра взрыва (на расстояниях до $5\div 6$ радиусов взрывной полости [2]) горная порода оказывается в сильно раздробленном состоянии, на больших расстояниях наблюдаются в основном единичные трещины, разделяющие массив на отдельные блоки. Будем исследовать процесс дробления твердой среды на множество кусков, происходящий на близких расстояниях от центра взрыва. В соответствии с этим под фронтом дробления будем понимать фронт распространения множества трещин, а не единичной трещины. Имеющиеся в настоящее время эмпирические данные описывают лишь конечный результат воздействия взрыва на горную породу — гранулометрический состав разрушенной среды [3, 4, 6]. Сведений о механизме дробления фактически нет.

Значительные трудности в исследовании механизма дробления горных пород взрывом связаны с тем, что все реальные горные породы непрозрачны, поэтому не применимы оптические методы исследования. Достаточно надежных методик, которые регистрировали бы динамику процесса дробления непрозрачных сред, не существует. Поэтому весьма важным оказывается метод лабораторного моделирования дробящего действия взрыва, когда, создавая определенные условия, можно рассчитать явление и попытаться выявить роль отдельных параметров, определяющих дробление взрывом.

Основная цель настоящей работы состояла в исследовании дробления, возникающего в твердой среде при прохождении по ней ударной волны, и не связанного с откольными явлениями, вызванными выходом ударной волны на свободную поверхность твердого тела. В качестве среды, подвергаемой воздействию взрывной нагрузки, использовалась канифоль. Достаточная прозрачность и малая прочность делают канифоль удобной для применения в лабораторных исследованиях. Низкая температура плавления ($T \approx 100^\circ\text{C}$) позволяет отливать из канифоли образцы нужных размеров и монтировать в них датчики для измерения параметров ударной волны, не нарушая сплошности образцов.

Отсутствие зернистой структуры, как у большинства горных пород, или какого-нибудь явного характерного параметра с размерностью длины, на начальном этапе исследования это является преимуществом канифоли, так как уменьшает число возможных параметров, влияющих на процесс дробления.

Физико-механические свойства канифоли следующие: плотность $\rho = 1,08 \text{ г/см}^3$, прочность на сжатие цилиндрических образцов с отношением высоты к диаметру 3:1 $\sigma_s = (200 \pm 20)$ бар, скорость распространения продольных волн $c_l = 2,37 \text{ км/с}$, скорость распространения поперечных волн $c_t = 1,04 \text{ км/с}$. Подсчитанное по этим скоростям значение коэффициента Пуассона $\nu = 0,381$.

Образцы канифоли, в которых исследовалось дробление, имели цилиндрическую или кубическую форму. Размеры образцов ($\sim 100 \text{ мм}$) подбирались такими, чтобы во время регистрации процесса (которое составляло $10 \div 20 \text{ мкс}$) исключить в зоне измерений влияние волн разгрузки, распространяющихся от свободных поверхностей образца. Исследуемые образцы подвергались воздействию сферических и плоских ударных волн.

В качестве источника сферических ударных волн использовались литые сферические заряды ТГ 50/50 весом 23, 83 и 135 г. Для создания волн нужной амплитуды, длительности и кривизны заряд ВВ и исследуемый образец располагались в воздухе или в воде на различных расстояниях друг от друга. Возникающая при взрыве заряда ударная волна падала нормально на поверхность образца. Были проведены также опыты, в которых сферический микрочаряд из тэна весом 0,17 г взрывался внутри блока канифоли. Эти опыты имитировали подземный камуфлетный взрыв и дали возможность получить картину развития явления в случае сферически-симметричного взрывного источника в безграничной среде.

Для получения плоских ударных волн использовались взрывные линзы диаметром 100 мм, состоящие из прессованного ТГ 50/50 и бензойной кислоты. Нужные параметры ударных волн в этом случае достигались с помощью прокладок из различных металлов и прессованной бензойной кислоты, помещаемых между линзой и исследуемым образцом.

Параметры ударных волн, распространяющихся в образцах, определялись с помощью электромагнитной методики Завойского [5], которая позволяет измерять скорость перемещения среды и скорость распространения фронта волны. Опыты производились в литых образцах канифоли. Канифоль заливалась в обойму из плексигласа, в которую на тонких натянутых растяжках были установлены датчики в виде П-образных рамок из медной проволоки диаметром 0,03—0,08 мм (рис. 1). Готовый блок помещался в магнитное поле, силовые линии которого были перпендикулярными плоскости датчиков. Электрические сигналы от датчиков регистрировались на осциллографах ОК-33. При измерении ударных волн, образованных взрывом сферического заряда, рабочая часть датчика располагалась по окружности, концентрической

с фронтом сферической ударной волны, а выводы располагались по радиусам, проведенным из центра взрыва.

Кроме электромагнитных измерений, производилось фотографирование образцов в проходящем пучке света с помощью прибора СФР, работающего в варианте фоторегистратора. В качестве источника света использовались лампы-вспышки типа ИФК, на которые разряжалась батарея конденсаторов, или мощная ударная волна в воздухе, возбуждаемая взрывом специального заряда подсветки. Аналогичная постановка опыта была и в случае сферических волн.

Момент дробления канифоли на фотохронограммах определяется по резкой и необратимой потере прозрачности, которая отличается от временной потери прозрачности во фронте ударной волны, вызванной изменением коэффициента преломления канифоли. Чтобы выяснить, где происходит дробление канифоли — внутри образца или на боковых поверхностях, находящихся в контакте с обоймой из оргстекла, производились опыты со сферическими ударными волнами. В этом случае фронт волны внутри канифоли опережает фронт волны, распространяющейся по боковым пластинам оргстекла. Контрольные эксперименты показали, что фронт волны дробления распространяется внутри образца канифоли и не связан с боковыми поверхностями.

Результаты экспериментов. Использование методики возбуждения взрывных волн (плоских и сферических) обеспечили возможность нагружения образцов канифоли ударными волнами амплитудой от нескольких сотен бар до нескольких десятков килобар. Измерения массовой скорости u среды во фронте волны и скорости фронта ударной волны D , выполненные электромагнитной методикой и съемкой на СФР, позволили установить ударную адиабату канифоли, которая для $u > 110$ м/с может быть описана зависимостью

$$D = 2,76 + 1,59u.$$

Здесь D и u выражены в километрах в секунду (рис. 2). На рис. 3 представлена характерная осциллограмма скорости перемещения за фронтом ударной волны амплитудой 6 кбар. Наблюдаемое в средней части осциллограммы вторичное увеличение массовой скорости связано с приходом волны разгрузки от тыльной поверхности образца.

Анализ полученных результатов позволяет выделить три характерные области напряжений, в которых поведение канифоли существ-

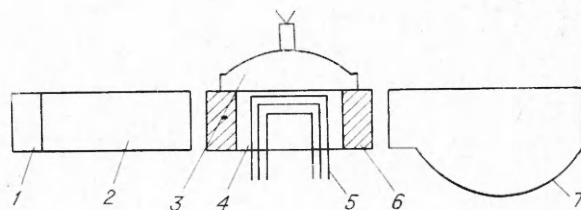


Рис. 1. Схема проведения опыта с плоскими ударными волнами.

1 — источник света; 2 — коллиматор; 3 — взрывная линза; 4 — образец канифоли; 5 — П-образные датчики; 6 — обойма из оргстекла; 7 — СФР.

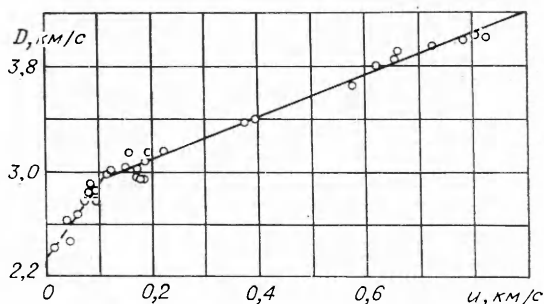


Рис. 2. Ударная адиабата канифоли.

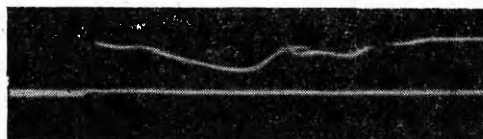


Рис. 3. Характерная осциллограмма скорости перемещения в плоской ударной волне. Длительность развертки 30 мкс.

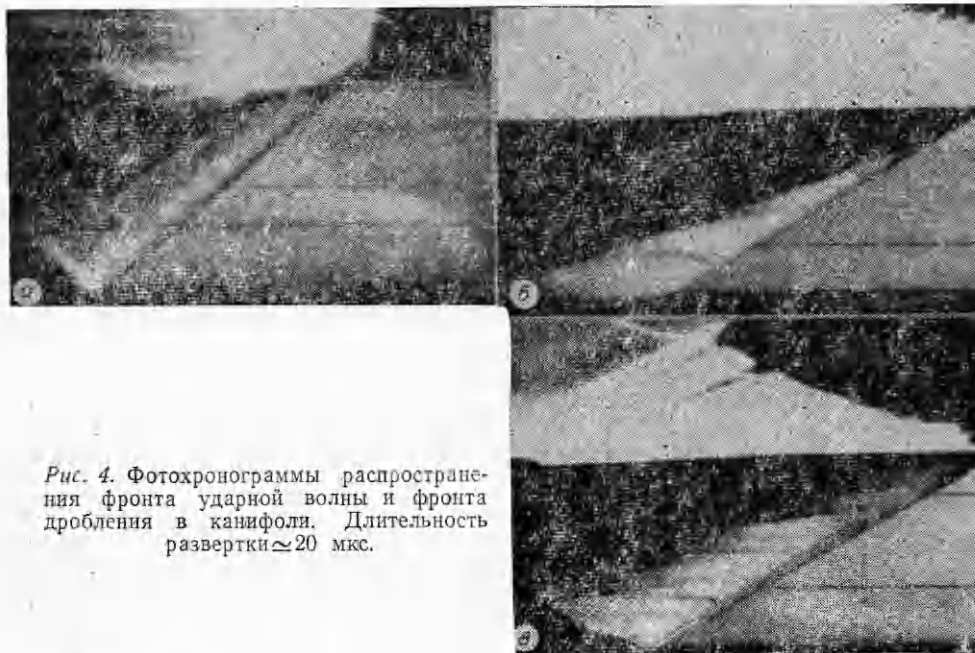


Рис. 4. Фотохронограммы распространения фронта ударной волны и фронта дробления в канифоли. Длительность развертки ≈ 20 мкс.

венно различается: а) $\sigma_n > 25$ кбар, б) 6 кбар $< \sigma_n < 25$ кбар, в) $\sigma_n < 2,5$ кбар.

В первой области за фронтом ударной волны среда вновь становится прозрачной (рис. 4, а). Это свидетельствует о том, что при таких напряжениях дробление среды во фронте не осуществляется. По-видимому, при таких больших напряжениях (близких по величине к упругим модулям среды) канифоль деформируется пластически.

В [7] имеются сведения о том, что характер деформирования твердой среды и ее прочность зависят от шаровой части тензора напряжений, т.е. от гидростатического давления. Во фронте ударной волны нормальные σ_n и тангенциальные σ_t напряжения связаны соотношением

$$\sigma_t = [\nu / (1 - \nu)] \sigma_n,$$

поэтому гидростатическое давление $p = -[(\sigma_n + 2\sigma_t) / 3]$ во фронте ударной волны возрастает с увеличением ее амплитуды σ_n . По данным работы [7], среды, которые при небольших гидростатических давлениях разрушаются хрупким образом, с повышением уровня гидростатического давления начинают деформироваться пластически, без образования трещин. По-видимому, этот эффект имеет место и в рассматриваемом случае.

Во второй области напряжений среда во фронте ударной волны полностью теряет прозрачность (рис. 4, б), которая затем не восстанавливается. Это позволяет считать, что дробление канифоли происходит во фронте ударной волны, т.е. фронт дробления совпадает с фронтом волны.

В третьей области дробление во фронте ударной волны не осуществляется (рис. 4, в). Если ударная волна сферическая, то фронт дробления возникает через некоторое время после прохождения ударной волны. Это задержка тем больше, чем меньше амплитуда ударной волны. Возникновение фронта дробления при сферической расходящейся ударной волне определяется, вероятно, тем, что за фронтом волны в связи с перемещением среды от центра взрыва тангенциальные напряжения снижаются быстрее радиальных и из сжимающих превра-

щаются в растягивающие. Это приводит к уменьшению гидростатического давления, а следовательно, и к уменьшению прочности [8], в результате чего происходит разрушение среды.

На рис. 4, б приведена хронограмма опыта со сферической ударной волной, амплитуда которой на поверхности образца достаточно велика, так что фронт дробления вначале совпадает с фронтом ударной волны. По мере распространения волны в образце ее интенсивность падает и на некоторой глубине фронт дробления начинает отставать от фронта волны. В момент их разделения скорость фронта дробления изменяется не плавно, а, как видно из хронограммы, скачком. Затем скорость фронта дробления остается практически постоянной при распространении на расстояние, сравнимое с длиной волны, которое в нашем случае составляет 30÷40 мм. На больших расстояниях начинает сказываться влияние волн разгрузки, приходящих от тыльной и боковой поверхностей образца и искажающих картину течения.

Скорость распространения фронта дробления оказывается устойчивой и в одинаковых экспериментах отличается незначительно. Это свидетельствует о том, что наблюдаемый фронт и есть фронт дробления. Если бы наблюдаемая на фотохронограммах область затемнения была обусловлена распространением единичной трещины, то скорость ее распространения, вероятно, была бы не столь устойчивой. Значения скоростей фронта ударной волны D и фронта дробления N при различных давлениях p на поверхности образца в сферической ударной волне приведены ниже.

p , кбар	2,8	3,7	5,0
D , км/с	2,82	2,96	3,02
N , км/с	1,54	1,70	2,06

Если давление в ударной волне меньше 2,5 кбар, фронт разрушения оказывается прерывистым и нечетким (см. рис. 4, в). Характеризовать его скоростью распространения не представляется возможным. Возникновение разрушения в этом случае может определяться не только напряженным состоянием, но и дефектами, которые, хотя и не видны, но, вероятно, существуют в твердой прозрачной канифоли. Об этом свидетельствует пилообразный вид фронта разрушения (см. рис. 4, в) и отсутствие повторяемости картины разрушения в одинаковых опытах при таких малых напряжениях во фронте ударной волны.

Таким образом, проведенные исследования показали, что дробление во фронте ударной волны происходит при напряжениях, значительно превышающих величину статической прочности $\sigma_* = 200$ бар, которая определяется сжатием цилиндрического образца. Если принять, что предел прочности определяется величиной максимального сдвигового напряжения

$$\tau_* = 1/2 \cdot (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}),$$

то для статического

$$\tau_{*ст} = 1/2 \cdot \sigma_* = 100 \text{ бар.}$$

Во фронте ударной волны, где нормальные σ_n и тангенциальные σ_t напряжения связаны приведенным выше соотношением,

$$\tau_{*уд} = (1 - 2\nu) / 2(1 - \nu) \cdot \sigma_n = 0,19\sigma_n.$$

Принимая на нижней границе области, где дробление еще происходит во фронте ударной волны, $\sigma_n = 4$ кбар, получаем $\tau_{*уд} = 0,8$ кбар, что на порядок превышает сдвиговое напряжение, соответствующее статической прочности. Такая разница связана в основном с влиянием вида напряженного состояния и, возможно, с динамикой процесса. В [9] показано, что прочность горных пород сильно зависит от вида напря-



Рис. 5. Фотохронограмма развития процесса взрыва сферического заряда, расположенного внутри блока канифоли.

женного состояния, определяемого отношением главных напряжений $C = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Эта зависимость описывается экспериментальной формулой

$$\tau = \tau_0 \exp AC,$$

где τ_0 — прочность при одноосном сжатии; A — константа среды, меняющаяся для разных горных пород в широком интервале ($A = 4 \div 8$). Для канифоли $A \approx 4$.

Для определения размеров зоны разрушения при камуфлетном взрыве были проведены опыты со взрывом сферических микрочарядов тэна радиусом $r_0 = 3$ мм, располагаемых в центре блока канифоли. Размеры блока выбирались такими, чтобы за время развития взрыва, волны, отраженные от боковых поверхностей блока, не искажали картины центрально-симметричного развития зоны разрушения, которая успевала за это время достигнуть максимальных размеров.

На рис. 5 приведена одна из фотохронограмм такого взрыва, указывающая на то, что при взрыве в канифоли существует устойчивый фронт дробления, который вначале совпадает с фронтом ударной волны. После разделения скорость фронта разрушения остается довольно высокой и почти вплоть до полной остановки составляет 0,4 от скорости распределения волны сжатия.

Анализ этих результатов показал, что дробление канифоли во фронте ударной волны наблюдается на расстоянии, не превышающем $4,5 r_0$, в то время как размер всей зоны дробления взрыва оказывается равным $25 r_0$. Это свидетельствует о том, что дробление среды при камуфлетном взрыве происходит в основном за фронтом ударной волны и определяется зафронтным течением. Следует отметить, что аналогичные результаты наблюдаются и в других средах. Так, при взрыве в оргстекле [10], которое деформируется пластически, разрушений во фронте ударной волны вообще не наблюдается. Они происходят лишь за фронтом волны.

В работе [11] показано, что при взрыве в граните разрушение во фронте ударной волны происходит при интенсивности волны превышающей 45 кбар. В случае взрыва сферического заряда такие напряжения во фронте ударной волны наблюдаются [12] на приведенном расстоянии, равном $12 \text{ м/кт}^{1/3}$. Эта величина оказывается значительно меньше, чем максимальный размер зоны разрушения при камуфлетном взрыве в граните — $(80 \div 90) \text{ м/кт}^{1/3}$ [1, 13].

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о существовании процесса разрушения, который распространяется в большом объеме как устойчивый фронт дробления. В зависимости от параметров ударной волны и свойств среды фронт дробления может совпадать с фронтом ударной волны или отставать от него. Впервые показано, что дробление среды при камуфлетном взрыве происходит в основном за фронтом ударной волны и определяется зафронтным течением. Установленные факты представляются важными для прогнозирования дробления горной породы при камуфлетных взрывах.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Родионов. — В сб.: Взрывное дело. № 73/30. М., «Недра», 1974.
2. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
3. В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др. Механика подземного взрыва. Серия «Механика твердых деформируемых тел», Т. 7. М., 1974.
4. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах. Под ред. Н. В. Мельникова. М., «Наука», 1973.
5. Л. В. Альтшулер. УФН, 1962, 85, 2.
6. Э. А. Кошелев, В. М. Кузнецов и др. ПМТФ, 1971, 2.
7. Б. И. Берсенев, Е. Д. Мартынов и др. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях. М., «Наука», 1969.
8. J. T. Cherry, F. L. Pettersen. Numerical simulation of stress wave propagation from underground nuclear explosions. Peaceful Nucl. Explosions. Vienna, 1970.
9. А. Н. Ставрогин. — В сб.: Некоторые прикладные задачи механики горных пород. Фрунзе, «Илим», 1971.
10. В. В. Адушкин, А. П. Сухотин. ПМТФ, 1961, 4.
11. R. N. Schock, H. C. Heard. J. Geoph. Res., 1974, 70, 11.
12. M. N. Toksöz, A. Ben-Menahem, D. G. Harkrider. J. Geoph. Res., 1961, 66, 9.
13. G. Higgins. Nuclear explosions data for underground engineering applications. Peaceful Nucl. Explosions, Vienna, 1970.

УДК 532.595.2

РАСШИРЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПУЗЫРЯ В ВОДЕ

И. В. Яковлев, А. А. Вергасов

Явления, сопровождающие расширение газового пузыря большого давления в воде, исследовались при взрывах в воде конденсированных взрывчатых веществ [1—4], при электрических разрядах [5], а также при фокусировке в воде лазерного луча [6].

В настоящей работе исследуется расширение в воде плазменного пузыря, создаваемого с помощью взрывного источника высокотемпературной плазмы большого давления. Параметры плазменного пузыря отличаются от параметров газового пузыря, получаемого при подводных взрывах зарядов конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Например, эффективный показатель адиабаты для плазмы $\gamma \approx 1,2$ [7], а для продуктов взрыва конденсированного ВВ $\gamma \approx 3$. При примерно одинаковых начальных давлениях температура плазмы $T \approx 2 \cdot 10^4 \text{ К}$, т. е. на порядок выше температуры продуктов взрыва.

Таким образом, изучение поведения плазменного пузыря при расширении его в воде может быть использовано при моделировании сильных взрывов.

Схема эксперимента. Экспериментальная установка для исследования расширения плазменного пузыря в воде включает в себя взрывную камеру, источник плазмы, бассейн с водой, устройство подсветки и скоростной фоторегистратор. Процесс фотографировался непосредственно в проходящем свете. Источником плазмы служил взрывной газовый компрессор [8], представленный на рис. 1, а.

При взрыве генератора плоской волны 1, пластина 2, ускоряясь сжимает воздух, находящийся в камере сжатия 3. Сжатый и нагретый несколькими ударными волнами воздух выходит через канал 4 в виде высокотемпературной, большой плотности и давления плазмы. В экспериментах использовался компрессор следующих размеров: $R=20$ мм, $d=4$ мм, $H=10$ мм, толщина пластин 2 изменялась от 1,5 до 2 мм.