

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗРЫВЕ

Е. В. Зенченко, В. М. Цветков

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, zench@idg.chph.ras.ru

Приведены результаты оптической регистрации процесса разрушения при взрыве на поверхности образцов из канифоли. Показано, что наличие свободной поверхности приводит к возникновению конического фронта разрушения, что существенно увеличивает объем зоны динамического разрушения. С другой стороны, влияние свободной поверхности вызывает откольные явления в поверхностном слое. Простая оценка толщины откольного слоя, основанная на измеренных параметрах взрывной волны, хорошо совпадает с наблюдаемыми величинами. Сравнение результатов экспериментов с данными по строению метеоритных кратеров показало сходство в строении зон разрушения.

Ключевые слова: взрыв, взрывное разрушение, оптическая методика, гранулометрический состав, откольные явления, метеоритный удар, кратер.

ВВЕДЕНИЕ

Задача о разрушении горного массива при взрыве на поверхности не теряет своей актуальности. Диапазон масштабов рассматриваемых взрывных явлений очень широк: от взрывов зарядов массой несколько сот граммов ТНТ до гигантских взрывов, вызванных падением крупных метеоритов и имеющих глобальные катастрофические последствия. Построение теоретических моделей процесса разрушения среды во всем полупространстве при взрыве на поверхности представляет собой сложную трехмерную задачу. Эффективным методом исследования процесса разрушения массива горных пород при взрывном воздействии является лабораторное моделирование. На основе результатов лабораторных экспериментов были построены физические модели, адекватно описывающие процесс разрушения массива при камуфлетном взрыве [1–3].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования процесса разрушения в массиве при контактном взрыве в качестве модельной среды была использована сосновая канифоль. Литая канифоль характеризуется следующими механическими свойствами: плот-

ность $1,08 \text{ г/см}^3$, скорость продольных упругих волн 2470 м/с , скорость поперечных волн 1040 м/с , предел прочности на сжатие для цилиндрического образца с отношением высоты к диаметру $3 : 1$ приблизительно 20 МПа . Ввиду относительной прозрачности канифоли для исследования процесса разрушения можно использовать оптическую методику, примененную ранее для изучения процессов при камуфлетном взрыве [1]. Важным моментом, обуславливающим применение этой методики, является выбор таких размеров образца, чтобы волны, отраженные от свободных поверхностей, не влияли на процесс разрушения в течение всего времени регистрации. Это достигалось путем соответствующего выбора материалов и технологии изготовления образцов. Образцы отливались в формы, изготовленные из оргстекла (полиметилметакрилата). После охлаждения блок канифоли из формы не вынимался. Сама форма при этом являлась акустическим продолжением образца, поскольку акустические жесткости канифоли и оргстекла имеют близкие значения. Кроме того, образец своим дном наклеивался эпоксидной смолой на пластину из оргстекла. Для дополнительного увеличения размеров образца к его боковым граням механически присоединялись пластины из оргстекла толщиной 50 мм , а остающиеся при этом воздушные промежутки заполнялись глицерином для создания акустического контакта. Толщина блока канифоли на про-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 03-05-64525).

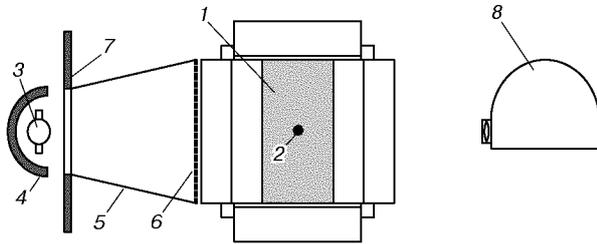


Рис. 1. Схема эксперимента по оптической регистрации процесса разрушения (вид сверху):

1 — экспериментальная сборка, 2 — заряд, 3 — импульсная лампа, 4 — отражатель, 5 — отражающий тубус, 6 — матовый экран, 7 — защитный корпус, 8 — камера СФР

свет составляла 120 мм при высоте 150 мм и ширине 200 мм. Такая конфигурация экспериментальной сборки обеспечивала необходимую длительность регистрации процесса разрушения во всем объеме образца.

В качестве источника взрыва использовались сферические заряды тэна массой 0,38 г и радиусом $R_0 = 4$ мм. Исследовался случай полузаглубленного заряда (центр расположен на уровне свободной поверхности), когда заряд помещался в полусферическое углубление, высверленное на поверхности образца. Регистрация процесса разрушения велась установкой СФР, синхронизированной с устройством подрыва заряда и источником импульсной подсветки. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Камера скоростного фоторегистратора СФР работала в варианте лупы времени, т. е. покадровой съемки, что позволило получить детальную картину процесса разрушения во всем полупространстве. Частота съемки составляла $5 \cdot 10^5$ кадр/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны последовательные кадры развития процесса разрушения при взрыве на поверхности образца из канифоли. Полученные кадры проецировались на экран, где отмечались последовательные положения фронта разрушения (рис. 3). В пространственной картине развития процесса разрушения можно выделить три области. В центральной области А форма фронта разрушения близка к сферической. К ней примыкает область В, где форма фронта коническая, причем угол наклона образующих этого конуса к свободной поверхности

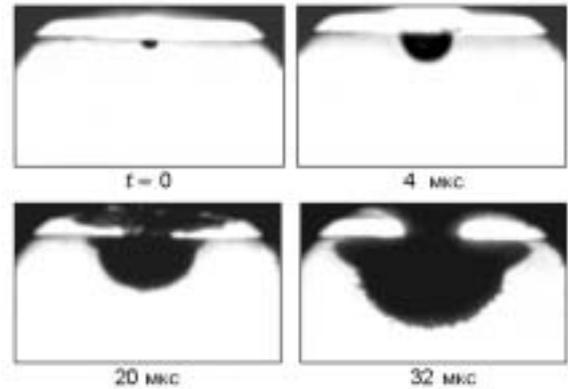


Рис. 2. Развитие во времени процесса разрушения в блоке канифоли при взрыве на его поверхности:

под кадрами указано время после момента детонации, ширина кадра 18 см

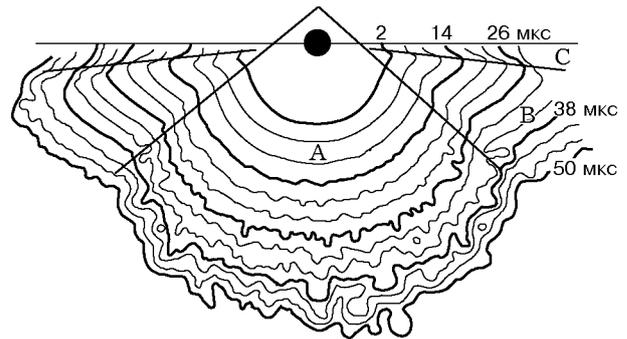


Рис. 3. Последовательные положения фронта разрушения в канифоли через равные промежутки времени

постоянен и близок к 30° . Образующие конического фронта разрушения не выходят на свободную поверхность, а обрываются на границе области С.

Скорость распространения сферического фронта разрушения изменяется от 1 200 м/с во внутренней области зоны разрушения (приблизительно до 10 радиусов заряда R_0) до 960 м/с в ее периферической части, вплоть до остановки фронта разрушения на расстоянии $15R_0$. Таким образом, процесс распространения фронта разрушения в его сферической части качественно соответствует случаю камуфлетного взрыва, рассмотренному в работах [1, 2], где остановка фронта разрушения происходила на расстоянии $25R_0$. Конический фронт разрушения распространяется со скоростью 960 м/с во всей области своего существования. В рабо-

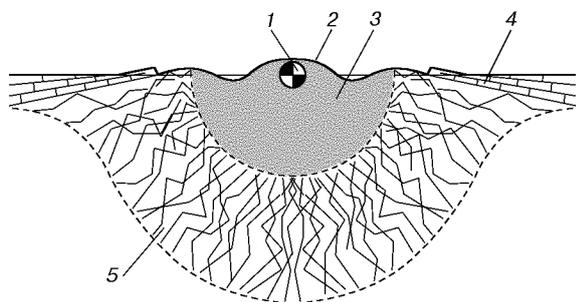


Рис. 4. Схематический разрез блока канифоли после взрыва:

1 — заряд ВВ, 2 — воронка с центральной горкой, 3 — рыхлая сыпучая среда, 4 — зона приповерхностного откольного разрушения, 5 — зона динамического разрушения

тах [1, 2] показано, что скорость фронта разрушения 960 м/с является предельной скоростью распространения трещин отрыва, соответствующей скорости волн Рэлея в канифоли. На основании этого можно сделать вывод, что конический фронт разрушения также представляет собой фронт трещин отрыва, распространяющихся с предельной скоростью.

Существование конического фронта разрушения обуславливает и окончательную форму зоны разрушения, наблюдаемую после взрыва на разломе образца, схематически показанную на рис. 4. В зоне разрушения можно выделить центральную сферическую часть и коническую периферическую, глубина которой уменьшается по мере удаления от центра взрыва. При этом радиус периферической части зоны разрушения вдвое превышает глубину ее сферической части. Простые геометрические оценки показывают, что объем конической зоны разрушения приблизительно такой же, как и объем полусферы, соответствующей центральной части зоны разрушения. Таким образом, наличие свободной поверхности вдвое повышает эффективность действия взрыва с точки зрения разрушения массива.

Следует отметить, что наблюдаемое увеличение эффективности не связано с откольными явлениями, характерными для взрывов заглубленных зарядов или при взрывании на уступах. В проведенных экспериментах откольное разрушение реализовывалось в приповерхностном слое С (см. рис. 3), объем которого существенно меньше объема конической зоны разрушения.

Рассмотрим подробнее процесс образова-

ния откольного слоя. Согласно рис. 3 его толщина s медленно растет с расстоянием от центра взрыва как $s = (-3 \pm 0,5) + (0,14 \pm 0,01) \times R$ [мм]. Очевидно, что возникновение откольного слоя обусловлено взаимодействием взрывной волны со свободной поверхностью. Рассмотрим механизм этого взаимодействия, сделав предварительно некоторые упрощающие предположения. При распространении полусферической взрывной волны в полупространстве возникает волна разрежения, фронт которой совпадает с фронтом прямой волны и возникновение которой обусловлено требованием равенства нулю нормальных напряжений на свободной поверхности. Это означает, что на свободной поверхности должно выполняться равенство нулю азимутальных напряжений, нормальных напряжений. Для простоты предположим, что эпюра этих напряжений в массиве треугольная, с нулевым временем нарастания, длительностью положительной фазы T и максимальной амплитудой σ_{\max} . Такое предположение вполне обосновано, поскольку время нарастания меньше длительности положительной фазы более чем на порядок [4]. Заметим, что в данном случае речь идет о волнах напряжений при камуфлетном взрыве, однако, как показано в [4], амплитуды волн при полузаглубленном и камуфлетном взрывах различаются незначительно (амплитуда волны от взрыва полузаглубленного заряда составляет около 0,7 от амплитуды для случая камуфлетного взрыва), а длительность положительной фазы волны примерно вдвое меньше. Такая замена позволяет существенно упростить дальнейшее рассмотрение, не затрагивая при этом сути исследуемого процесса. Будем также считать, что затухание волны происходит по упругому закону ($\sigma_{\max} \sim 1/R$), так же как и в случае камуфлетного взрыва для расстояний, больших $8R_0$ [1, 2], что незначительно отличается от закона затухания скорости смещения среды во взрывной волне $v \sim 1/R^{1,15}$ при взрыве полузаглубленного заряда для измерений на поверхности [4]. Согласно [5] при такой постановке задачи толщина откольного слоя определяется по формуле $s = \sigma_t T c_l / 2 \sigma_{\max}$, где σ_t — динамическая прочность на отрыв, c_l — скорость продольных упругих волн. На основании данных по камуфлетному взрыву оценим толщину откольного слоя на расстоянии $22R_0$. Принимая согласно [3] $\sigma_t = 10$ МПа, $T = 10$ мкс и $\sigma_{\max} = 10$ МПа, получим $s = 12,5$ мм, что

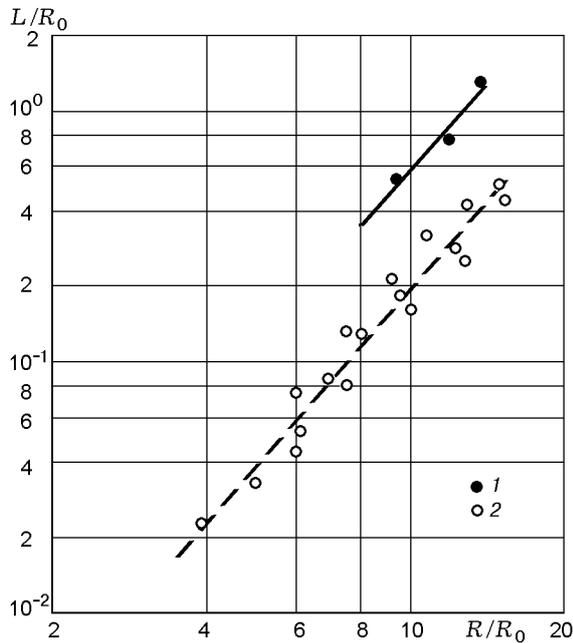


Рис. 5. Изменение среднего по массе размера куска L с расстоянием от центра взрыва для полузаглубленного заряда:

1 — измерения в откольной зоне С, 2 — в массиве (области А и В); R_0 — радиус заряда

близко к наблюдаемой величине. Поскольку максимальное напряжение σ_{max} практически обратно пропорционально расстоянию до центра взрыва, то толщина откольного слоя С будет линейно возрастать с расстоянием и обращаться в нуль в центре. Такое несоответствие наблюдаемой картине приповерхностного разрушения связано, очевидно, с тем, что модель не учитывает других возможных механизмов разрушения на близких расстояниях, а также с тем, что модельная эпюра напряжений существенно отличается от реальной, которая характеризуется конечным временем нарастания и небольшим изменением длительности положительной фазы волны по мере ее распространения [1, 2]. Несмотря на эти недостатки, приведенное рассмотрение позволяет верно описать процесс разрушения в приповерхностном слое и получить оценки, не противоречащие наблюдаемым результатам.

Исследование гранулометрического состава разрушенной среды из областей А и В показало, что закон изменения среднего по массе размера куска с расстоянием практически одинаков для каждой области. Что касается области откольного разрушения С, то, как видно из

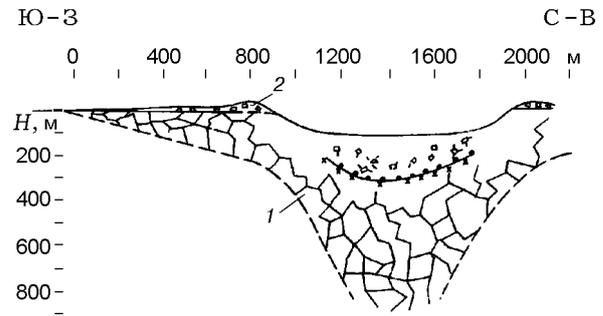


Рис. 6. Геологический разрез кратера Метеор (США, Аризона) [7]:

1 — трещиноватые породы, 2 — обломочный материал

рис. 5, в этом случае средний по массе размер куска на одинаковых расстояниях в три раза больше, чем в областях А и В.

Особенности разрушения массива, которые исследовались в экспериментах, наблюдаются также и в таких природных объектах, как метеоритные кратеры. Геофизические исследования ряда метеоритных кратеров размером порядка 1 км [6, 7] показывают наличие приблизительно сферической зоны разрушения под дном кратера и уплощенной зоны разрушения за его пределами (рис. 6). Горизонтальный размер зоны разрушения при этом вдвое превосходит ее глубину, как наблюдалось и в лабораторных экспериментах. Что касается зоны откольного разрушения, то в земных метеоритных кратерах она не обнаруживается вследствие эрозионных процессов, приводящих к ее деградации. В работе [8] подчеркивается важная роль откольных явлений как процессов, ответственных за происхождение метеоритов определенных типов. Отмечается, что откольные явления в приповерхностном слое при ударе метеорита могут служить причиной выброса сравнительно слабо сжатого вещества с поверхностей планет в процессе кратерообразования со скоростью, достаточной для покидания планеты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что, помимо ожидаемого уменьшения размера зоны разрушения по сравнению с взрывом в безграничной среде, картина разрушения при взрыве на поверхности полупространства характеризуется рядом важных особенностей. Прежде всего, это наличие развитой приповерхностной

зоны разрушения, связанной с образованием конического фронта разрушения. Другая особенность — образование слоя откольного разрушения, толщина которого растёт по мере удаления от центра взрыва. Простая оценка толщины откольного слоя, основанная на измеренных ранее параметрах взрывной волны, показала хорошее соответствие наблюдаемым величинам. Особенности приповерхностного разрушения в лабораторных экспериментах характерны также и для таких крупномасштабных взрывных процессов, как метеоритные удары.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Цветков В. М., Сизов И. А., Поликарпов А. Д.** О поведении хрупкоразрушаемой среды при камуфлетном взрыве // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. 1977. № 4. С. 36–42.
2. **Цветков В. М., Сизов И. А., Сырников Н. М.** О механизме разрушения хрупкой среды при камуфлетном взрыве // Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых. 1977. № 6. С. 48–56.
3. **Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.** Основы геомеханики. М.: Наука, 1986.
4. **Зенченко Е. В., Цветков В. М.** Некоторые особенности механического действия малоуглубленного взрыва // Взрывное дело. № 90/47. М.: Недра, 1990. С. 69–80.
5. **Никифоровский В. С., Шемякин Е. И.** Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.
6. **Аалоз А., Дабижа А., Карнаух Б., Стародубцев В.** Геофизические исследования на главном кратере Каали // Изв. АН ЭССР. Химия, геология. 1976. Т. 25, № 1. С. 58–65.
7. **Ackermann H. D., Godson R. H., Watkins J. S.** A seismic refraction technique used for subsurface investigations at Meteor crater, Arizona // J. Geophys. Res. 1975. V. 80, N 5. P. 765–775.
8. **Melosh H. J.** Impact ejection, spallation and the origin of meteorites // Icarus. 1984. N 59. P. 234–260.

Поступила в редакцию 16/VI 2004 г.