

лезной оболочки различной толщины при взрыве на ее поверхности слоя тротила толщиной 3 и 6 мм. Исходные данные для расчетов принимались следующими [2—4]:  $c_0=3,8$  км/сек,  $n=5,32$ ,  $\rho_0=7,85$  г/см,  $\rho_{00}=1$  г/см<sup>3</sup>,  $D=4,7$  км/сек,  $\sigma_{кр}=61600$  кг/см<sup>2</sup>.

Результаты одного расчета приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 нанесены также экспериментальные точки, взятые из [1].

Некоторое отличие расчетных и экспериментальных значений можно объяснить как приближенностью полученного решения, так и отсутствием в [1] данных по веществу оболочки и параметрам ВВ.

В заключение считаем своим долгом указать, что подобный подход к решению задач данного класса, основанный на применении инвариантов Римана, был разработан Е. И. Забахиным, которому авторы выражают свою признательность.

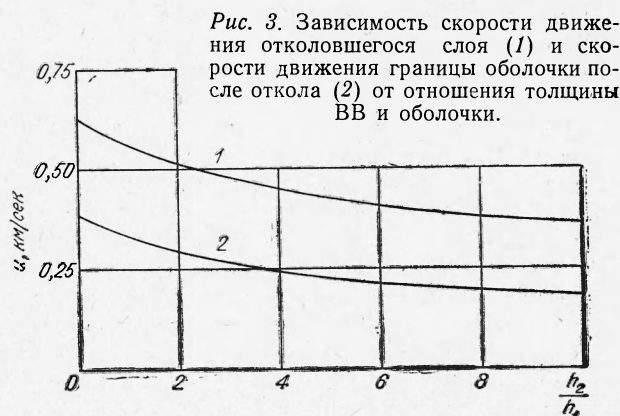


Рис. 3. Зависимость скорости движения отколовшегося слоя (1) и скорости движения границы оболочки после откола (2) от отношения толщины ВВ и оболочки.

Поступила в редакцию  
10/II 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Райнхарт, Д. Пирсон. Поведение металлов при импульсных нагрузках. М., ИЛ, 1958.
2. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников и др. ЖЭТФ, 1958, 34, 4.
3. Л. П. Орленко. Поведение материалов при интенсивных нагрузках. М., Машиностроение, 1964.
4. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1953.

УДК 662.215.25+534.222.2

### РАБОТА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ НА ВЫБРОС

А. Н. Ромашов, В. Ф. Евменов

(Москва)

Взрыв в безграничной среде обладает центральной симметрией. В окружающей среде в результате взрыва возникает движение, которое распространяется в виде волны сжатия и происходит в основном за счет некоторого импульса, сообщенного на начальных стадиях расширения продуктов детонации. В заключительных стадиях развития котловой полости продукты взрыва не играют существенной роли и среда движется

вследствие начального запаса энергии. В таких средах, как вода, например, это инерционное движение проявляется столь сильно, что давление в полости может снизиться до величины, меньшей гидростатического давления в воде.

В твердых средах движение прекращается прежде, чем давление в полости успеет снизиться до литостатического. Опыт показывает, что при взрывах в грунтах и горных породах движение вокруг полости прекращается в тот момент, когда давление в ней может достигать сотен атмосфер. Но и в этом случае имеет место инерционное движение среды на заключительных стадиях развития полости. На это, в частности, указывает тот факт, что практически всегда имеет место обратное движение стенок полости [1] и только после некоторого их колебания устанавливается равновесие между давлением в полости и напряжением в окружающей среде. При этом в полости остается часть энергии взрыва. При взрывах в горных породах и грунтах эта остаточная энергия может достигать 10—20% от полной энергии. Если учесть, что механический к. п. д. взрыва того же порядка, то долю остающейся в полости энергии следует считать значительной. В случае камуфлетного взрыва она не играет существенной роли. Давление в полости постепенно уменьшается за счет остывания продуктов и их просачивания по трещинам, в результате чего постепенно снимаются напряжения и в окружающей среде.

Таким образом, при камуфлетном взрыве механическое действие определяется запасом энергии, который сообщается среде на начальных стадиях расширения полости. По порядку величины это соответствует кинетической энергии движения среды в волне сжатия.

Развитие взрыва на выброс существенно отличается от описанной выше картины камуфлетного взрыва. Центральная симметрия явления имеет место лишь в самом начале, пока волна не достигает свободной поверхности. На этой стадии среде сообщается энергия такого же порядка, как и при камуфлетном взрыве, однако дальше центральная симметрия нарушается. После того, как волна разгрузки от свободной поверхности пройдет по среде и достигнет котловой полости, начинается преимущественное расширение продуктов взрыва в сторону этой поверхности. При этом они сообщают среде дополнительное количество движения в основном за счет той энергии, которая при камуфлетном взрыве оставалась в полости неиспользованной. Этот второй этап передачи энергии при взрыве на выброс принято называть стадией газового ускорения. В настоящее время имеется лишь самое общее, преимущественно качественное представление о механизме передачи энергии среде при взрыве на выброс. В данной работе предпринята попытка проследить этот процесс более детально.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача решалась экспериментально. Чтобы определить роль отдельных стадий передачи энергии при взрыве на выброс, необходимо было искусственно разделить. Это достигалось путем выпуска продуктов детонации из котловой полости на различных стадиях ее расширения. Схема опытов представлена на рис. 1.

Заряд 1 взрывался на массивной стальной плите 3. Действие взрыва развивалось в сторону среды 4, в качестве которой использовался мелкий речной песок. Толщина слоя среды над зарядом выбиралась с таким расчетом, чтобы в районе эпицентра наблюдалось интенсивное

вспучивание с последующим образованием воронки выброса. В плите на определенном расстоянии  $R$  от центра заряда имеется кольцевое отверстие 2. В момент времени, когда стенка полости взрыва достигает этого отверстия, продукты взрыва начинают выходить из полости в атмосферу. Чем больше расстояние от заряда до края отверстия, тем позже начинается выход продуктов взрыва из котловой полости. В том случае, когда это расстояние больше максимального радиуса полости, выход газов через отверстие вообще не наблюдается. Этот случай соответствует взрыву около цельной плиты без отверстия. Взрыв около цельной плиты развивается обычно, и энергия среде передается в два этапа. Выпуск газов через отверстие означает, что процесс передачи энергии прерывается на определенной стадии. До момента прорыва газов через отверстие взрыв развивается точно в таких же условиях, как и взрыв около цельной плиты. После прорыва давление в полости быстро падает до нуля и дальнейшая передача энергии прекращается. В первом приближении можно сказать, что энергия продуктов взрыва в полости с радиусом, равным расстоянию до середины отверстия, исключается из работы, а движение среды определяется запасом энергии, которая передалась в среду при расширении полости от объема заряда до объема полусферы радиуса  $R$ . Зная адиабаты расширения продуктов взрыва, можно вычислить энергии, перешедшие в среду при различных степенях развития полости [2].

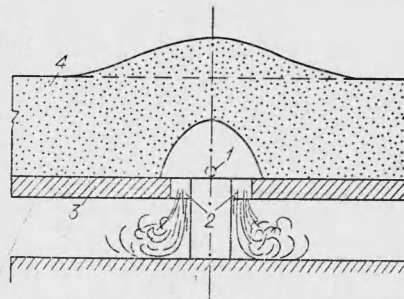


Рис. 1.

В опытах использовались заряды из тэна сферической формы радиусом 5 мм и весом 0,8 г. Взрыв заряда около массивной плиты соответствует взрыву заряда удвоенного веса в сплошном массиве песка. Движение среды регистрировалось с помощью ускоренной киносъемки. Поверхность песка в районе эпицентра взрыва, как правило, поднималось в виде гладкого купола. На рис. 2 приведена типичная зависимость высоты подъема вершины купола от времени, соответствующая взрыву около цельной плиты. На кривой отчетливо выделяется начальный участок движения примерно с постоянной скоростью. Через 0,5—0,6 мсек наблюдается резкий излом кривой, свидетельствующий об увеличении скорости. Движение вершины купола после этого момента происходит замедленно. В качестве характеристики эффекта взрыва в опытах использовалось значение максимальной скорости, так как она наиболее полно характеризует общую кинетическую энергию движения выбрасываемой среды.

Величина этой скорости определялась путем графического дифференцирования зависимости  $h(t)$  с точностью  $\pm 10\%$ .

При осуществлении выпуска продуктов взрыва из полости определенное значение имеет величина отверстия. Идеальной постановка была бы в том случае, если бы выпуск осуществлялся мгновенно в момент времени, когда радиус полости станет равным некоторому значению  $R$ . В действительности время истечения газов из полости конечно. Для выяснения размеров отверстия, которое позволяло бы наиболее быстро выпускать продукты из полости, была проведена специальная серия опытов, когда расстояние до внутренней границы отверстия оставалось неизменным, а ширина кольцевого зазора менялась. На рис. 3 приведена зависимость максимальной скорости движения вершины ку-

пола от площади кольцевого зазора ( $s$ ). Расстояние до внутренней границы отверстия при этом оставалось неизменным и равнялось 18 мм. Точка с  $s=0$  соответствует взрыву около цельной плиты. По мере увеличения площади отверстия наблюдается уменьшение максимальной скорости. При  $s=9 \text{ см}^2$  скорость снижается до значения, которое остается постоянным, несмотря на дальнейшее увеличение площади отверстия. Это значение площади и было принято во всех последующих опытах.

Рис. 3 позволяет также оценить минимальное время истечения продуктов взрыва из полости. Оно соответствует времени расширения стенки полости от внутренней до внешней границы отверстия при площади 9 см<sup>2</sup>.

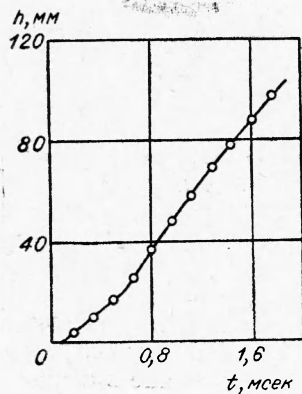


Рис. 2.

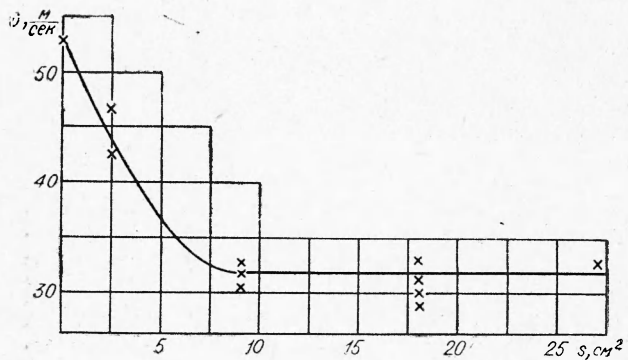


Рис. 3.

За это время продукты полностью удаляются из полости. Действительно, если бы это было не так, то при дальнейшем расширении выпускного отверстия наружу воздействие продуктов ослаблялось бы еще больше. В опыте, как видно из рис. 3, этого не наблюдается. Время расширения полости от 18 до 25 мм, как следует из работы [3], не превышает 0,1 мсек; время развития купола составляет 1,5—2 мсек. Из сравнения видно, что выпуск газов из полости осуществляется довольно быстро. В дальнейшем за момент выпуска продуктов взрыва будет приниматься момент достижения полостью середины кольцевого отверстия.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

В опытах исследовалось влияние расстояния от центра заряда до выпускного отверстия на эффект взрыва. На рис. 4 представлена зависимость максимальной скорости движения вершины купола от этого расстояния. Для каждого расстояния проводилось не менее двух опытов. Максимальное отклонение отдельных измерений от средних значений, как видно из рис. 4, не превышает 10%.

Кривые 1, 3 рис. 4 ограничивают положение основной кривой 2. Кривая 1 получена в предположении, что выпуск продуктов из полости происходит в момент достижения ею внутренней границы отверстия, кривая 3 — когда полость достигает наружного края отверстия.

Наибольшее значение скорости наблюдалось при взрыве около сплошной плиты без отверстия. И оказалось равным 51 м/сек. Из рис. 4 видно, что именно на это значение выходит зависимость  $v(R)$  примерно

при  $R=45-50$  мм. Скорость при  $R=0$  соответствует взрыву непосредственно над отверстием. Заряд в этом случае располагался над центром цилиндрического отверстия радиусом 15—20 мм на тонкой слюдяной пластинке.

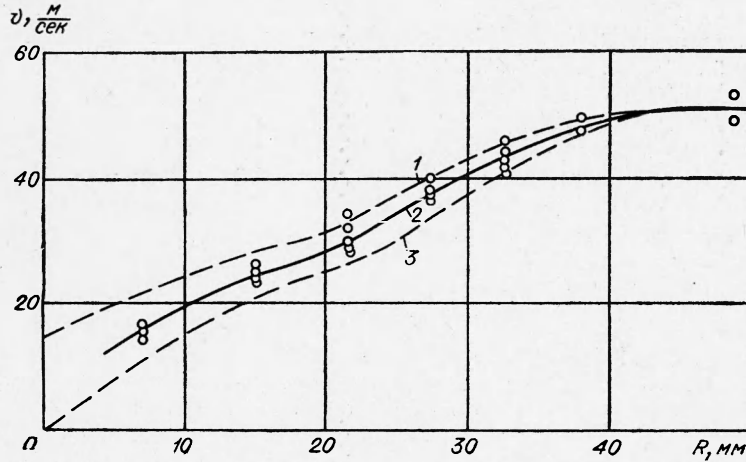


Рис. 4.

Для удобства понимания результатов приведен еще один график (рис. 5). По вертикальной оси на нем отложен квадрат максимальной скорости, который можно рассматривать как меру кинетической энергии выбрасываемой среды. По горизонтальной оси отложена разность  $1 - \frac{E_R}{E_0}$ , где  $E_0$  — значение полной энергии взрыва, а  $E_R$  — энергия продуктов взрыва при радиусе полости  $R$ , равном расстоянию заряда до середины выпускного отверстия. Значение энергии  $E_R$  определялось по адиабате, полученной в работе [2]. Таким образом, рис. 5 характеризует прирост кинетической энергии движения среды на различных стадиях расширения котловой полости.

Зависимость  $v^2 \left(1 - \frac{E_R}{E_0}\right)$  довольно хорошо может быть представлена в виде двух участков, сопрягающихся между собой при значении  $\frac{E_R}{E_0} = 0,1 \div 0,25$ . Излом на графике (см. рис. 5) означает резкое увеличение к. п. д. продуктов взрыва. Судя по наклонам кривых, эффективность использования энергии продуктов взрыва на втором участке возрастает примерно в 20 раз.

Резкое уменьшение потерь энергии в процессе преобразования ее в энергию движения наблюдается при  $\frac{E_R}{E_0} = 0,15 \div 0,25$ , что соответствует

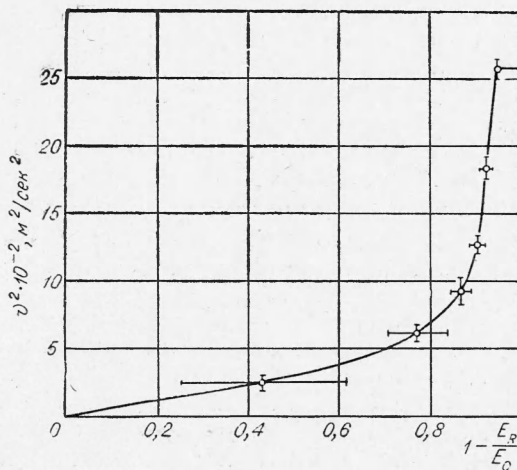


Рис. 5.

$\frac{R}{r_3} = 4-4,5$ . Сопоставление этого значения радиуса полости с радиусом распространения фронта волны для этого же момента времени показывает, что момент резкого уменьшения потерь энергии в среде примерно совпадает с моментом прихода волны разгрузки от свободной поверхности к полости. Физически это совпадение представляется вполне понятным. Резкое уменьшение потерь энергии в среде, по-видимому, связано с разгрузкой среды, вызванной свободной поверхностью. Следует заметить, что возрастание коэффициента преобразования энергии при переходе от первой стадии ко второй происходит не только за счет уменьшения потерь энергии в среде. Важное место здесь занимает и изменение геометрии распределения энергии. Если на первой стадии энергия распределяется равномерно по всем направлениям, то на стадии газового ускорения преимущественная передача идет вверх, в сторону выбрасываемой среды.

Перегиб на кривой (см. рис. 5) происходит примерно при  $v = 30$  м/сек, которая практически совпадает с величиной начальной скорости движения свободной поверхности в случае взрыва около цельной плиты без отверстий. Как говорилось выше (см. рис. 2), в этом случае имеется четко выраженный излом на кривой  $h(t)$ . Начальный участок кривой  $h(t)$  характеризует запас кинетической энергии в среде, обеспеченный волной сжатия. Излом означает начало действия газового ускорения.

Если выпуск газов осуществить точно в момент выхода фронта волны сжатия на свободную поверхность, то никакого газового ускорения не будет. Этот вывод следует из анализа кривых  $h(t)$ . При расстояниях от заряда до границы выпускного отверстия больше 20 мм зависимость  $h(t)$  аналогична приведенной на рис. 2, хотя степень увеличения скорости за счет газового ускорения уменьшается по мере сокращения расстояния до выпускного отверстия. При значениях  $R$  меньше 20 мм зависимость  $h(t)$  практически прямолинейна в течение 1,5—2,0 мсек и максимальная скорость совпадает с начальной скоростью.

Из приведенного выше анализа видно, что разделение процесса передачи энергии на две стадии при взрыве на выброс имеет физическое основание. Важным критерием при выделении стадий следует считать резко выраженные отличия в коэффициентах преобразования энергии газообразных продуктов в энергию движения. Границей между стадиями следует считать момент времени, когда волна разгрузки от свободной поверхности достигает котловой полости.

Интересным представляется вопрос о выделении верхней границы расширения продуктов взрыва, при которой практически прекращается передача энергии в среду. На рис. 5 видно, что увеличение максимальной скорости движения свободной поверхности фактически прекращается при  $\frac{E_R}{E_0} = 0,05$ , т. е. энергия взрыва порядка 5% остается в газообразных продуктах неизрасходованной. Как следует из работ [2, 4], максимальный к. п. д. взрыва при расширении продуктов детонации до атмосферного давления составляет около 90—95%. Остающиеся в продуктах ориентировочно 5—10% энергии обусловлены их температурой и для совершения механической работы не могут быть использованы. Отсюда можно заключить, что при взрыве на выброс в лабораторных условиях продукты совершают работу при снижении в них давления до 1 атм.

Данные о влиянии различных стадий расширения продуктов взрыва на эффект выброса позволяют по-новому подойти к вопросу учета силы тяжести. По существу, этот вопрос сводится к определению степени расширения продуктов взрыва, при которой еще возможна передача энергии

в окружающую среду. В качестве фактора, ограничивающего передачу, может быть литостатическое давление в среде. Продукты взрыва не могут совершать работу после того, как давление в них станет меньше литостатического давления.

При проведении опытов лабораторного масштаба влиянием силы тяжести можно пренебречь. В этом случае расширение продуктов происходит практически до атмосферного давления. Увеличение масштаба взрыва и связанное с этим повышение роли силы тяжести будут приводить к тому, что часть неиспользованной в конце расширения энергии продуктов взрыва будет возрастать. Если предельную степень активного расширения продуктов задать величиной литостатического давления, то снижение эффекта можно определить по графику на рис. 4.

Для того чтобы это снижение стало заметным, эффект взрыва должен уменьшаться, по крайней мере, на 10%. Это связано с наличием естественного разброса в условиях проведения взрывов. Чтобы заметить влияние нового фактора, необходимо получить от него эффект, соизмеримый с имеющейся неточностью определения эффекта взрывов при малых масштабах. На рис. 4 видно, что снижение на 10% величины  $v$  соответствует уменьшению параметра  $R$  до значения, при котором давление в полости равно 5—6 атм. Следовательно, заметное снижение эффекта выброса за счет силы тяжести можно ожидать при глубинах заложения заряда порядка 20—25 м.

В качестве примера рассмотрим результаты 1000-тонного взрыва на глубине 40 м [5]. Литостатическое давление на такой глубине равно  $8 \text{ кг/см}^2$ . Следовательно, продукты детонации при этом взрыве могли совершать работу при расширении до 8 атм. Если выпуск продуктов детонации из полости осуществить в момент, когда давление в них равно  $8 \text{ кг/см}^2$ , то наблюдаемое при этом снижение эффекта взрыва будет эквивалентно действию силы тяжести при взрыве на глубине 40 м. Из рис. 4 видно, что при выпуске продуктов из полости в указанный момент ( $R=34 \text{ мм}$ ) величина скорости уменьшается с 51 до 44 м/сек, что соответствует снижению кинетической энергии в 1,34 раза. Фактическое уменьшение кинетической энергии при взрыве заряда 1000 т по сравнению с зарядом 10 т произошло в 1,4 раза [5], что находится в удовлетворительном согласии с вычисленным значением.

Предлагаемый принцип определения влияния силы тяжести на эффект взрыва на выброс после соответствующей доработки может дать простую методику расчета крупных зарядов.

Поступила в редакцию  
20/11 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Родионов, И. А. Сизов, В. М. Цветков. Сб. «Взрывное дело», № 64/21. «Недра», 1968.
2. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
3. А. Ф. Шацкевич, О. С. Колков, А. М. Тихомиров. ФГВ, 1967, 3, 4.
4. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. Сб. «Физика взрыва», № 5, Изд-во АН СССР, 1956.
5. М. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. И. Ромашов. Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.