

Таблица 2

r	Температура термообработки, °С	Содержание свинца на поверхности соединения, %	Прочность соединения, кг/мм ²	
			расчетная	реальная
1,5	—	72	8,5	Соединение разрушилось при механической обработке
2,5	—	63	11,0	
4,0	—	10	27,0	3—6
2,5	480	58	12,5	10—11
2,5	620	21	23,5	9—10
2,5	780	19	24,0	13—15
2,5	920	12	26,5	13—15
				20—22

При проведении тщательного микрорентгено-спектрального анализа на наличие свинца по поверхности соединения образцов сталь — бронза, сваренных при $r=1,5$; 2,5 и 4, установлено, что рост r приводит к уменьшению количества свинца на поверхности раздела непосредственно после сварки взрывом (табл. 2).

Проведенные исследования позволяют пред-

положить следующий механизм поведения свинца в процессе сварки взрывом: с ростом r на контактной границе увеличивается тепловыделение, что приводит, с одной стороны, к частичной коагуляции свинца на границе раздела и в приграничных зонах рекристаллизации, а с другой — к переводу некоторого количества свинца в паробразную фазу, что увеличивает возможность его выноса из зоны соединения.

Поступила в редакцию
19/VIII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. Е. Н. Росалукo, С. Р. Williams. Welding J., 1964, 43.
3. Дж. С. Райнхарт, Дж. Пирсон. Взрывная обработка металлов. М., «Мир», 1966.
4. А. М. Ставер, А. Н. Киселев и др. Сварка разнородных цветных металлов с черными металлами и сплавами. Докл. III Всес. совещ. 3—5 апреля 1967 г. Киев, Ин-т электросварки им. Потона, 1968.
5. И. В. Яковлев. Сварка взрывом свинца с некоторыми металлами и сплавами. ФГВ, 1972, 8, 4.
6. Г. И. Бердичевский, Т. М. Соболенко, Т. С. Тесленко. В сб. «Аппаратура и методы рентгеновского анализа». Вып. 5. Л., СКБРА, 1969, с. 226—232.

УДК 662.215.25+534.222.2

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ В СРЕДУ ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ

В. И. Куликов, А. Н. Ромашов, В. М. Чубаров

(Москва)

При камуфлетном взрыве в окружающей среде в результате детонации заряда возникает движение, распространяющееся в виде волны сжатия. Движение среды происходит не только во время передачи энергии от продуктов детонации в среду, но, очевидно, может сохраняться и некоторое время спустя в виде инерционного движения. Именно этим инерционным движением, по-видимому, можно объяснить возвратное движение стенок камуфлетной полости, которое наблюдается

при взрыве в прочных средах [1]. Более известно это явление в воде, где инерционное движение проявляется столь сильно, что давление в полости снижается до величины, меньшей гидростатического давления.

В настоящей работе исследуется процесс передачи энергии от продуктов детонации в среду при взрывах в грунтах. При этом рассматривается эффективность передачи энергии на различных стадиях расширения продуктов и вопрос об инерционном движении среды. Оба вопроса важны как для понимания существа явления, так и для практических целей, например, при решении вопроса о роли забойки при взрывах.

Эксперименты были проведены в песчаном грунте. На различных стадиях расширения камуфлетной полости производилось сравнение давления продуктов детонации до атмосферного давления. При этом регистрировалась скорость движения грунта во взрывной волне, которая сопоставлялась с аналогичной скоростью при нормальном камуфлетном взрыве. Эксперименты были дополнены численным решением задачи о сравнении давления в полости.

Схема опытов представлена на рис. 1. Заряд 4 подрывался на массивной металлической плите 2, в которой на определенном расстоянии R^* от центра заряда имелось кольцевое отверстие 1. В момент времени, когда стенка камуфлетной полости 3 достигает кольцевого отверстия, продукты взрыва начинают выходить из полости в атмосферу. Чем больше расстояние от заряда до края отверстия, тем позже начинается выход продуктов взрыва из камуфлетной полости. В том случае, когда это расстояние больше максимального радиуса камуфлетной полости, выход газов через отверстие не наблюдается. Этот случай соответствует взрыву около цельной плиты без отверстия. Если же выпуск газов через отверстие имеет место, это означает, что процесс передачи энергии газов в грунт прерывается на определенной стадии, так как давление в продуктах взрыва быстро падает до атмосферного. В первом приближении можно считать, что дальнейшее движение среды определяется запасом энергии, переданной в грунт при расширении полости от объема заряда до объема полусферы радиуса R^* .

Опыты проводились в сухом песке насыпной плотности $1,58 \text{ г/см}^3$. В качестве ВВ использовались сферические прессованные заряды из тэна весом 0,8 г. Поскольку взрыв заряда около плиты соответствует взрыву заряда удвоенного веса, то при обработке экспериментального материала вес заряда принимался равным 1,6 г (радиус 6,5 мм).

В опытах регистрировались массовые скорости движения частиц грунта во времени с помощью индукционной методики, принцип которой заключается в регистрации ЭДС, наводимой в плоской катушке-датчике 5, движущейся вместе с грунтом в постоянном магнитном поле, созданном внешней катушкой 6, охватывающей бассейн с грунтом 7. Подробные сведения о методике и типичные осциллограммы записи массовых скоростей приведены в работе [2]. Для оценки эффекта взрыва в опытах использовались значения максимальных массовых скоростей на фронте взрывной волны и значения кинетических энергий грунта в различные моменты времени, вычисленные по осциллограммам скорости. Скорости движения частиц грунта регистрировались в диапазоне расстояний от 55 до 300 мм от центра заряда ($8,5 \div 46$ радиусов заряда).

Были проведены взрывы на плите с внутренним радиусом кольцевого отверстия $R^* = 10, 18, 24$ и 30 мм и взрывы на сплошной плите

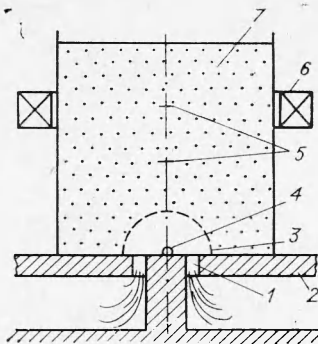


Рис. 1.

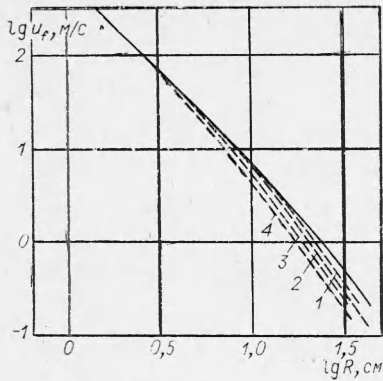


Рис. 2.

Параметры	Номер кривой на рис. 2			
	1	2	3	4
R^* , мм	30	24	18	10
p , атм	40,7	98	305	3000
A , %	88,2	85	80	62,5

(нормальный камуфлетный взрыв). Кольцевая щель во всех случаях имеет площадь 9 см^2 . Оценки времени выхода газов из полости в атмосферу делались в квазистационарном приближении и в предположении критического режима истечения газов из полост

ти через кольцевую щель, так как во всех рассматриваемых случаях давление продуктов взрыва в полости более чем вдвое превышает атмосферное. Например, для $R^* = 18 \text{ мм}$ за $0,25 \text{ мс}$ давление газов в камуфлетной полости падает за счет выхода газов через кольцевую щель с 305 до 3 атм, в то время как при обычном камуфлетном взрыве без стравливания газа это изменение происходит в течение более 2 мс. На основании этих оценок и результатов опытов, изложенных в [3], можно в первом приближении считать, что после того, как радиус полости достигнет значения R^* , прекращается передача энергии от продуктов взрыва в грунт.

На рис. 2 приведена зависимость максимальной массовой скорости u_r во взрывной волне от расстояния до центра взрыва R . Сплошная кривая соответствует нормальному камуфлетному взрыву, а штриховые — взрывам на плите с кольцевой щелью (условия опытов приведены в таблице). Разброс экспериментальных точек не превышал 7%. В таблице приведены также значения давления продуктов детонации, при которых начинается выпуск газов и работа, совершенная продуктами детонации при расширении полости до границы кольцевой щели R^* . Эта работа выражена в процентах к энергии взрыва.

Из рис. 2 видно, что значения максимальных массовых скоростей уменьшаются при приближении кольцевого отверстия к центру заряда, причем эффект выпуска газов с увеличением расстояния до центра заряда нарастает. Проявление эффекта выпуска продуктов детонации в атмосферу отчетливо видно на эпюрах массовых скоростей, приведенных на рис. 3. Здесь представлены массовые скорости частиц грунта, расположенных на расстоянии 55 (кривая 1) и 300 мм (кривая 2) от центра взрыва, для нормального камуфлетного взрыва. Кривые 1' и 2' — массовые скорости на тех же расстояниях, полученные при взрыве с кольцевым отверстием с внутренним радиусом $R^* = 10 \text{ мм}$. Время на этом рисунке отсчитывается от момента детонации заряда; масштаб скорости для расстояния 55 мм указан на рисунке слева, а для расстояния 300 мм — справа. Выпуск газов при взрыве с кольцевой щелью в этих опытах начинается через 18 мкс после детонации заряда.

Из рассмотрения этих эпюр следует, что в ближней зоне взрыва выпуск газов из камуфлетной полости приводит лишь к уменьшению скорости за фронтом

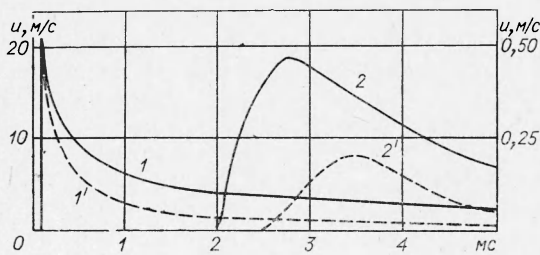


Рис. 3.

волны, в то время как в дальней зоне он влечет за собой уменьшение скорости как на фронте волны, так и за ее фронтом. Вид эпюр в ближней зоне указывает также на существенное уменьшение смещений слоев грунта при взрыве с выпуском газа, а значит и на уменьшение размеров котловой полости.

Еще более существенно выпуск газов сказывается на кинетической энергии грунта, вычисление которой было проведено по экспериментальным осциллограммам скорости для различных моментов времени (различных значений радиуса взрывной волны). На рис. 4 приведены зависимости кинетической энергии грунта (в процентах к энергии взрыва E_0) от радиуса фронта волны для обычного камуфлетного взрыва (сплошная кривая) и для взрывов с выпуском газов для указанных в таблице значений R^* (штриховые кривые). Из рисунка видно, что при выпуске газов затухание энергии грунта становится более интенсивным, чем при обычном камуфлетном взрыве. Штриховые кривые на этом рисунке демонстрируют также диссипацию энергии грунта при его инерционном движении, так как в этих случаях после достижения радиуса полости значения R^* подпитка энергии грунта за счет энергии продуктов взрыва прекращается.

На рис. 5 даны зависимости величины кинетической энергии сферического слоя грунта радиусом 300 мм, выраженной в процентах к энергии заряда, от работы, произведенной продуктами взрыва. При этом работа расширяющихся продуктов взрыва до 1 атм бралась равной 95% от полной энергии взрыва (работа вычислялась по адиабате гексогена [4]). Из рис. 5 следует, что на поздних стадиях развития взрыва энергия из полости передается более эффективно, нежели на ранних стадиях. Характерный излом кривой свидетельствует о возрастании КПД продуктов взрыва на поздней стадии примерно в 10 раз. Аналогичный эффект был отмечен в работе [3]: при взрыве на выброс на поздних стадиях расширения полости эффективность использования энергии продуктов взрыва возрастает в 20 раз по сравнению с эффективностью на ранней стадии развития взрыва. Более интенсивное использование энергии продуктов детонации при взрыве на выброс по сравнению с камуфлетным взрывом можно объяснить тем, что диссипативные процессы в среде дополнительно уменьшены за счет разгрузки среды свободной поверхностью.

Наряду с экспериментальными исследованиями, о которых говорилось выше, была поставлена и численно решена задача о камуфлетном взрыве в песчаном грунте с выпуском газа на определенной стадии расширения камуфлетной полости.

В неограниченном пространстве задана сферическая полость радиуса a_0 , внутри которой в момент времени $t=0$, возникает давление p_0 , которое затем адиабатически уменьшается за счет расширения полости. В среде будет распространяться сферическая волна, на фронте которой среда скачком уплотняется до некоторого значения. Величина уплотнения зависит от амплитуды волны и определяется по адиабате грунта, ко-

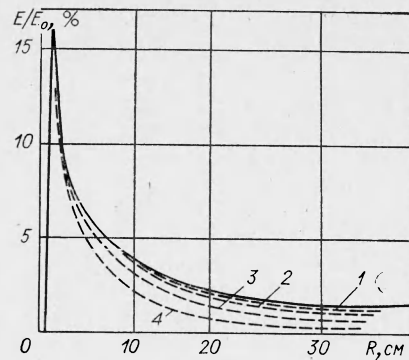


Рис. 4.

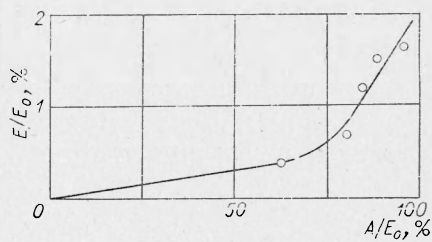


Рис. 5.

тору удобно взять в виде $v_f(u_f)$, где v_f — скорость распространения волны, u_f — массовая скорость среды на фронте. Течение среды за фронтом волны будем описывать законом сухого трения Кулона без сцепления и дилатансионным уравнением с постоянной скоростью дилатансии.

Следуя сделанным предположениям, закон Кулона в сферически симметричном случае запишем в виде

$$\frac{\sigma_\varphi}{\sigma_r} = \alpha, \quad (1)$$

где

$$\alpha = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi};$$

σ_φ , σ_r — компоненты тензора напряжений в среде; φ — угол внутреннего трения среды.

Используя соотношение (1), запишем уравнение движения

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(1-\alpha)\sigma_r}{r} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2)$$

и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2\rho u}{r} = 0. \quad (3)$$

Здесь u — скорость движения частиц среды, ρ — плотность грунта. Следуя [5], запишем дилатансионное уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{u}{r} = \dot{\Lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right], \quad (4)$$

где $\dot{\Lambda}$ — скорость дилатансии. Полагая ее постоянной, получим интеграл движения:

$$u = \frac{\lambda(t)}{r^n}, \quad (5)$$

где $n = \frac{2 - \dot{\Lambda}}{1 + \dot{\Lambda}}$. Экспериментальные исследования подтверждают дилатансионные свойства песчаных грунтов. В частности, при изучении камуфлетного взрыва [2] был экспериментально получен интеграл движения в форме (5) с $n = 1,6$. Близкое значение ($n = 1,5$) указано также в работе [6].

Перепишем интеграл движения (5) в виде

$$u = \dot{a} \left(\frac{a}{r} \right)^n, \quad (6)$$

где a и \dot{a} — радиус и скорость расширения полости. Подстановка (6) в уравнения (2) и (3) приводит к соотношениям

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(1-\alpha)\sigma_r}{r} = \rho \left[\ddot{a} \left(\frac{a}{r} \right)^n + \dot{a} \left(\frac{na^{n-1}}{r^n} - \frac{na^{2n}}{r^{2n+1}} \right) \right], \quad (7)$$

$$\frac{\partial \ln \rho}{\partial t} + \dot{a} \left(\frac{a}{r} \right)^n \frac{\partial \ln \rho}{\partial r} + \frac{\dot{a} a^n (2-n)}{r^{n+1}} = 0. \quad (8)$$

Используя очевидные граничные условия на фронте волны

$$-\sigma_r = \rho_0 u_f v_f = \rho_0 \dot{a} \left(\frac{a}{R} \right)^n \cdot v_f \quad (9)$$

и на границе с камуфлетной полостью

$$-\sigma_r = p(a), \quad (10)$$

проинтегрируем уравнения (7)

$$-\dot{a} \left(\frac{a}{R} \right)^n v_i R^m + \frac{p(a)}{\rho_0} a^n = \ddot{a} a^n l_1 + \dot{a}^2 (n a^{n-1} l_1 - n a^{2n} l_2), \quad (11)$$

где

$$l_1 = \int_a^R \rho r^{m-n} dr; \quad l_2 = \int_a^R \rho r^{m-2n-1} dr; \quad m = 2(n-\alpha); \quad (12)$$

ρ_0 — начальная плотность среды; R — текущий радиус фронта волны. После замены

$$\dot{a} = W, \quad \ddot{a} = \frac{dW}{dR} v_i \quad (13)$$

уравнение (11) превращается в обыкновенное дифференциальное для функции $W(R)$ при условии, что плотность среды $\rho(r)$ известна.

Для решения задачи, описываемой уравнениями (8) и (11), зададим адиабату сжатия грунта соотношением

$$v_i = 25 + 80,2 u_i^{0,535}, \quad (14)$$

которое интерполирует экспериментальные результаты по сжатию песчаного грунта на фронте ударной волны в диапазоне давлений $10^5 \div 10$ атм, приведенные в работах [3, 7].

В качестве адиабаты $p(a)$ бралась адиабата расширения продуктов детонации гексогена [4], состав которого близок к составу продуктов детонации тэна.

Решение задачи велось численно на БЭСМ. Задаваясь функциями ρ , a , W на j -м временном слое, из уравнения (8) с помощью явной четырехточечной схемы определялась плотность грунта на $j+1$ -м временном слое, после чего вычислялись интегралы (12) и методом Эйлера с последующей итерацией решалось уравнение (11). В результате получали скорость расширения полости на $j+1$ -м временном слое. Точность счета контролировалась по радиусу полости, определяемому интегрированием скорости ее расширения по времени и из условия сохранения массы по известным плотностям среды в узлах сетки.

Проведенные расчеты соответствовали взрывам заряда тэна весом 1,6 г, поэтому начальный радиус полости имел значение $a_0 = 6,5$ мм. Другие параметры, входящие в задачу: $\rho_0 = 1,58$ г/см³, $\varphi = 30^\circ$, $n = 1,6$.

Расчеты обычного камуфлетного взрыва дали результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными как по затуханию максимальной массовой скорости с расстоянием, так и по характеру расширения камуфлетной полости во времени. Зависимости $u_i(R)$ и $a(t)$ приведены на рис. 6 и 7, сплошные кривые соответствуют расчету камуфлетного взрыва, штрихпунктирные построены по экспериментальным данным, приведенным в работах [3, 8]. Такое совпадение неудивительно, поскольку расчет полуэмпирический (используются экспериментальные данные о сжимаемости грунта и о зафронтовом движении среды). По существу, расчетная схема как бы протарирована по результатам обычного камуфлетного взрыва с тем, чтобы затем использовать эту схему для расчета взрыва с выпуском газа из полости.

На рис. 6 и 7 штриховые кривые — расчетные зависимости $u_i(R)$ и $a(t)$ для взрывов с выпуском газа. Учет выпуска газов в расчете производился следующим образом: при достижении радиуса камуфлетной поло-

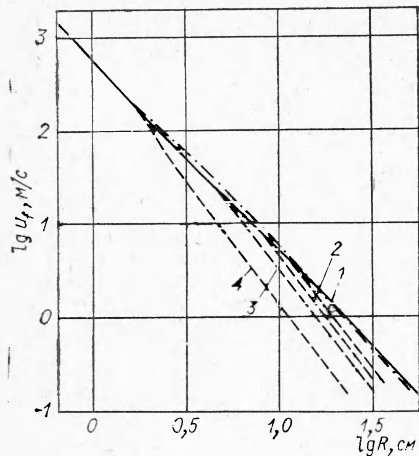


Рис. 6.

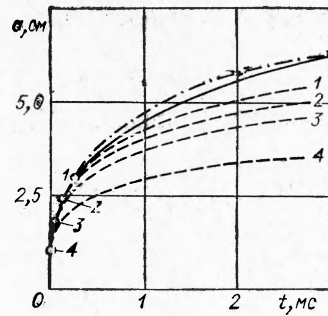


Рис. 7.

ция кривых на рис. 6 и 7 соответствует таблице).

Из рис. 6 видно, что результаты расчетов взрыва с выпуском газа подтверждают экспериментальные данные о затухании максимальной массовой скорости грунта с расстоянием при различных радиусах щели R^* . Имеющееся некоторое количественное расхождение экспериментальных и расчетных данных можно объяснить, в частности, тем, что в опытах не удается осуществить мгновенного выпуска газа из полости (выше говорилось об оценках времени выпуска газа). Кроме того, выпуск продуктов детонации через кольцевую щель нарушает сферическую симметрию опыта и грунт, по-видимому, получает некоторый дополнительный импульс за счет реакции вытекающей струи.

Расчеты взрыва с выпуском газа показали, что инерционное движение грунта значительно. Это особенно заметно проявляется при рассмотрении расширения полости (см. рис. 7), где моменты выпуска газов отмечены точками. Полость продолжает расширяться после того, как давление газов в ней падает до атмосферного за счет кинетической энергии грунта, накопленной в среде. Этот же факт иллюстрирует эпюра массовой скорости, полученная экспериментально на расстоянии 55 мм от центра заряда при взрыве с кольцевой щелью с $R^* = 10$ мм (см. рис. 3).

Рассмотренные в настоящей работе эффективность процесса передачи энергии от продуктов детонации в грунт на различных стадиях расширения полости и инерционное движение среды, несомненно, должны учитываться при решении практического вопроса о роли забойки при взрывах. Как правило, при промышленных взрывах через зарядную штолью происходит частичное стравливание продуктов детонации в атмосферу. При взрывах в мягких грунтах выход продуктов детонации через зарядную штолью обычно имеет место на начальной стадии расширения продуктов детонации, сразу после детонации заряда. Однако с течением времени за счет растягивающих тангенциальных напряжений зарядная штолья схлопывается и утечка газов через нее в атмосферу прекращается. В крепких породах выход газов имеет место и на заключительных стадиях расширения полости. В этой связи представляет интерес оценить влияние потерь энергии заряда из-за утечки газов на различных стадиях их расширения.

Были проведены и сопоставлены расчеты затухания волны в грунте в трех

сти соответствующего значения R^* давление продуктов детонации полагалось равным атмосферному. Значения R^* выбирались такими же, как внутренние радиусы кольцевых щелей (нумера-

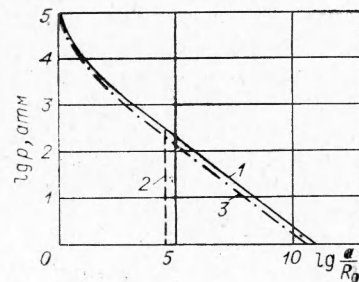


Рис. 8.

случаях: 1 — расширение продуктов детонации без какой-либо утечки по изэнтропе [4], которая приведена на рис. 8, 1; 2 — расширение продуктов детонации по той же изэнтропе до давления 305 атм, после чего давление скачком уменьшается до 1 атм, что соответствует потере 25% энергии заряда по сравнению с первым случаем (рис. 8, 2); 3 — расширение продуктов детонации по адиабате, приведенной на рис. 8, 3, параметры которой подобраны так, что показатель ее адиабаты при давлениях ниже 10^3 атм такой же, как у изэнтропы 1, а работа продуктов детонации при их расширении до 1 атм на 25% ниже соответствующей величины в первом случае. Таким образом, в случаях 2 и 3 продукты детонации совершают над грунтом работу на 25% меньшую, чем в первом случае, при этом второй случай можно интерпретировать, как утечку газов через зарядную штольню на поздней стадии взрыва, а третий случай — как утечку на начальной стадии расширения продуктов детонации.

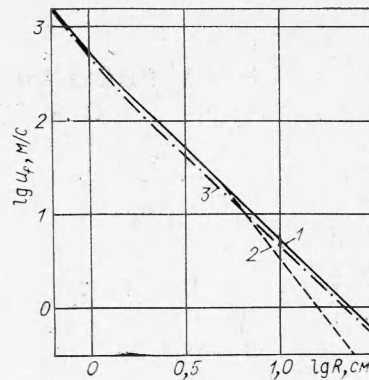


Рис. 9.

Результаты расчетов затухания максимальной массовой скорости грунта от расстояния до центра заряда для указанных трех вариантов и заряда весом 1,6 г приведены на рис. 9. Из приведенных кривых (обозначения на рис. 9 соответствуют рис. 8) видно, что потери энергии заряда на начальной стадии менее существенны, чем на конечной. Этот результат вполне согласуется с полученным выше выводом о наиболее эффективной передаче энергии заряда в грунт при низких давлениях продуктов детонации. Параллельность кривых $u_f(R)$ на рис. 9 для случаев 1 и 3 означает, что потеря 25% энергии на начальной стадии расширения полости сводится к тому, что движение грунта при таком взрыве соответствует движению грунта при взрыве заряда без потерь энергии с весом заряда на 25% ниже. Из сопоставления кривых $u_f(R)$ для случаев 1 и 2 видно, что потеря 25% энергии заряда на конечной стадии приводит к тому, что в дальней зоне параметры волн соответствуют взрыву заряда без потерь, но с массой в 4÷5 раз ниже, чем в первом случае.

Поступила в редакцию
17/IV 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Родионов, И. А. Сизов, В. М. Цветков. В сб. «Взрывное дело», № 64/21. М., «Недра», 1968.
2. И. Л. Зельманов, О. С. Колков и др. ФГВ, 1968, 3, 1.
3. А. Н. Ромашов, В. Ф. Евменов, В. А. Поддубный. ФГВ, 1970, 6, 4.
4. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
5. В. Н. Николаевский. Докл. АН СССР, 1967, 177, 3.
6. В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов, А. П. Сухотин. Докл. АН СССР, 1958, 124, 4.
7. В. А. Лагунов, В. А. Степанов. ПМТФ, 1963, 1.
8. О. С. Колков, А. М. Тихомиров, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1967, 3, 4.