

ЛИТЕРАТУРА

1. F. W. Neilson. Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, 1957, 2, 302.
2. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов. УФН, 1976, 119, 75.
3. G. W. Anderson, F. W. Neilson. Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, 1957, 2, 302.
4. R. I. Eichelberger, G. E. Hauver.— In: Les ondes de detonation, 1961.
5. L. C. Chhabidas, J. R. Asay. J. Appl. Phys., 1979, 50, 4, 2749.
6. В. В. Новиков, В. Н. Минеев. ЖЭТФ, 1974, 67, 1441.
7. B. W. Kulterman, F. W. Neilson, W. B. Benedick. J. Appl. Phys., 1958, 29, 500.
8. J. H. Johnson. J. Appl. Phys., 1959, 30, 2415.
9. D. Bancroft, E. L. Peterson, F. S. Minshall. J. Appl. Phys., 1956, 27, 291.
10. A. A. Balchan, H. G. Drickamer. Rev. Sci. Instrum., 1961, 32, 308.
11. P. C. Johnson, B. A. Stein, R. S. Davis. J. Appl. Phys., 1962, 33, 557.
12. I. S. Rinehart, J. Pearson. Behaviour of Metals under Impulsiv Coods. Cleveland, ASM, 1954.
13. G. E. Duvall, R. A. Graham. Rev. Mod. Phys., 1977, 49, 523.
14. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 197.
15. R. N. Keeler, A. C. Mitchell. Solid State Commun., 1969, 7, 271.
16. D. N. Pipkorn, C. K. Edge e. a. Phys. Rev., 1964, 135, 1604.
17. E. B. Royce.— In: Proc. Symp. High Dynamic Pressure. Paris, 1967.
18. L. M. Barker. J. Appl. Phys., 1975, 46, 2544.
19. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ЖЭТФ, 1964, 47, 814.
20. L. M. Barker, R. E. Hollenbach. J. Appl. Phys., 1974, 45, 4872.
21. В. Н. Герман, М. П. Сперанская, Л. В. Альтшулер и др. ФММ, 1970, 30, 1018.
22. E. B. Royce. J. Appl. Phys., 1966, 37, 4066.
23. R. C. Wayne. J. Appl. Phys., 1969, 40, 15.
24. В. А. Злобин, Т. С. Муромкина, П. В. Поспелов. Изделия из ферритов и магнито-диэлектриков. Справочник. М.: Советское радио, 1972.
25. Р. Килер, Е. Ройс.— В кн.: Физика высоких плотностей энергии/Ред. П. Кальдиrola и Г. Кнопфель. М.: Мир, 1974.
26. R. A. Graham. J. Appl. Phys., 1968, 39, 437.
27. R. A. Graham, D. A. Anderson, J. R. Holland. J. Appl. Phys., 1967, 38, 223.
28. В. В. Новиков, В. Н. Минеев.— В кн.: Физика импульсных давлений. Вып. 44 (74). М., 1979.

О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ВЫБРОСА ГРУНТА ВЗРЫВОМ

*О. А. Арутюнов, С. С. Григорян, Р. З. Камалян
(Москва)*

Взрыв на выброс представляет собой сложное явление, определяемое рядом взаимодействующих факторов. С одной стороны, значительную роль в развитии процесса играют такие параметры, как интенсивность и длина волны сжатия, а также величина давления и состав газообразных продуктов в полости взрыва. Эти параметры определяют запас энергии, сообщаемой выбрасываемому грунту. С другой стороны, значительное влияние оказывают свойства среды, поскольку окончательный запас кинетической энергии грунта, который и является определяющим выброс, зависит еще от того, сколько переданной грунту энергии израсходуется необратимо на разрушение и преодоление сил связи и трения в самом грунте [1]. Несмотря на то, что указанные факторы неразрывно связаны между собой, в настоящее время еще не представляется возможным отобразить эту связь простыми количественными соотношениями, необходимыми для прогноза показателей выброса. Результаты современных исследований прояснили отдельные стороны этого сложного явления; благодаря им стала возможной схематизация процесса выброса грунта, уточнение влияния и вклада отдельных стадий на результат выброса в целом и т. д. [2—4].

Основным аспектом использования энергии взрыва в практических целях является ее механическое действие. Вместе с тем, как отмечается многими исследователями [4, 5], коэффициент полезного использования энергии взрыва для совершения механической работы довольно низок и составляет величину порядка 10—15%. Причина столь низкого КПД обу-

словлена высокой концентрацией энергии взрыва и большими скоростями ее выделения, в результате чего в среде происходят сильные необратимые деформации [4].

На основании многочисленных исследований процессов передачи энергии продуктов детонации в среду и ее диссипации там разработаны различные способы управления энергией взрыва [4, 5].

В настоящей работе рассматривается один из возможных эффективных способов увеличения полезного использования энергии взрыва по выбросу грунта с применением горизонтально удлинненных (цилиндрических) зарядов.

О влиянии углового распределения энергии ВВ в среде на размеры выемки

Согласно современным представлениям, в породах с малой акустической жесткостью ρc (ρ — плотность среды, c — скорость звука в среде), характерной для грунтов [6], разрушение и выброс происходят в основном под действием давления расширяющихся продуктов детонации, а волновые процессы играют второстепенную роль. Однако выброс начинается там, где фронт взрывной волны раньше достигнет свободной поверхности. После этого обратно к расширяющейся взрывной полости движется волна разгрузки с местной скоростью звука, а частицы грунта приобретают дополнительную скорость, примерно равную массовой скорости в прямой волне, т. е. скорость движения частиц грунта практически удваивается при достижении свободной поверхности [1]. Следовательно, если с плоской обнаженной поверхности в направлении линии наименьшего сопротивления (ЛНС) фактически происходит метание грунта, в остальных направлениях еще только движется прямая взрывная волна.

После достижения волной разгрузки зарядной полости, расширяющейся при взрыве, начинается интенсивное движение массы грунта по нормали к волновому фронту (в направлении линии наименьшего сопротивления). Зарядная полость вытягивается и принимает в сечении овальную форму [7]. Такое преимущественное направление деформации взрывной полости ускоряет процесс выброса грунта по ЛНС с последующим прорывом газов в атмосферу. Очевидно, что при этом полезная работа давления продуктов детонации по метанию грунта (кинетическая энергия) в остальных направлениях значительно уменьшается. Отсюда следует, что при одинаковых взрывах, но с различным угловым распределением энергии ВВ (вторая стадия выброса), размеры образующихся выемок будут различными.

Для пояснения изложенного полезно рассмотреть принципиальную схему расчета радиуса выемки выброса [2]. На рис. 1 схематически показан разрез купола в момент завершения развития второй стадии. Верхняя часть купола уже разрушена, и давление в продуктах взрыва равно атмосферному. Выясним, при каких условиях может оторваться некоторый элемент грунта, измеряемый разностью радиусов $r_2 - r_1$. Как уже отмечалось, необходимым условием является наличие достаточного (для совершения работы отрыва) запаса кинетической энергии. Очевидно, что отделение очень тонкого элемента грунта невозможно, так как с уменьшением $r_2 - r_1$ величина кинетической энергии стремится к нулю, а работа отрыва слоя остается конечной. С увеличением $r_2 - r_1$ растет запас энергии, но растет и величина работы против внутренних связей, поскольку увеличивается мощность слоя. Если r_1 выбрано так, что, начиная с некоторого значения, кинетическая энергия превзойдет работу деформации и отрыва, элемент грунта $r_2 - r_1$ будет отделен от массива и, возможно, выброшен. Если же r_1 выбран таким, что ни при

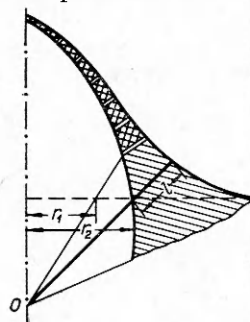


Рис. 1. Схема определения влияния углового распределения энергии взрыва на размеры выемки.

каком значении r_2 кинетическая энергия не будет больше величины, необходимой для отрыва, никакого отделения кусков грунта за пределами $r > r_2$ не произойдет.

Таким образом, размеры выемки будут определяться радиусом r_1 , начиная с которого накопленная грунтом кинетическая энергия не в состоянии произвести работу деформации и отрыва следующего элемента. Из рассмотренной схемы следует, что в число определяющих факторов процесса разрушения купола входит не только величина кинетической энергии движения, но и ее распределение по углу раскрытия выемки выброса и связанная с ним форма поднимающегося купола. Это означает, что в разных грунтах при одной и той же работе отрыва размеры выемок могут сильно различаться из-за разного распределения энергии по углу. Отсюда следует, что для увеличения, при прочих равных условиях, полезного выброса грунта необходимо добиться более равномерного углового распределения энергии взрыва. Этого, в частности, можно достичь, применив искусственные приемы по созданию не линии, а целой поверхности равных сопротивлений (создание свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента для горизонтально удлиненного заряда).

О влиянии формы свободной поверхности на распределение энергии ВВ в среде

Рассмотрим, как влияет дополнительная поверхность обнажения на распределение энергии в грунте. Опишем в сечении массива дугу AA радиусом OB с центром на оси заряда (рис. 2). После детонации заряда цилиндрическая поверхность фронта ударной волны (волны сжатия) достигнет участка дуги BE в один и тот же момент времени. Поскольку давление продуктов детонации в зарядной полости одинаково во всех точках поверхности полости, то метательная сила давления по нормальям к дуге одинакова в пределах грунта.

При наличии свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента с радиусом в сечении R , имеющем центр на оси заряда, выброс грунта благодаря равномерному угловому распределению энергии будет происходить одновременно по всей поверхности. Известно [4], что на параметры выемки прямое влияние оказывают размеры взрывной полости, образующейся на камуфлетной стадии (стадии симметричного развития полости). Согласно схеме, приведенной на рис. 3, время t симметричного развития полости в случае плоской свободной поверхности и при условии мгновенной детонации заряда равно

$$t = \frac{h_0 - r_0}{D} + \frac{h_0 - r_1}{c}, \quad (4)$$

где r_0 — радиус зарядной полости; r_1 — радиус полости к моменту истечения времени симметричного развития; c — скорость распространения

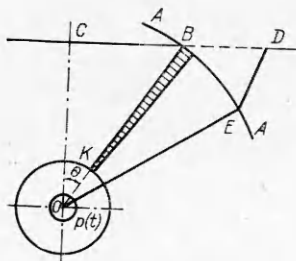


Рис. 2. Схема определения влияния дополнительной поверхности обнажения на распределение энергии взрыва в среде.

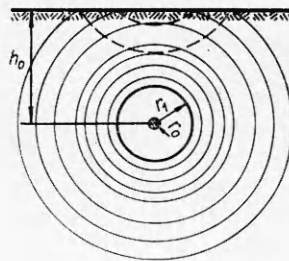


Рис. 3. Схема определения времени симметричного развития полости при плоской свободной поверхности (сплошные линии — ударная волна (волна сжатия), штриховые — волна разгрузки).

волны разгрузки; D — средняя скорость распространения ударной волны:

$$D = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} D(t) dt,$$

где τ_0 — время выхода ударной волны (волны сжатия) на свободную поверхность.

Из (4) следует, что время t связано с глубиной заложения заряда и скоростями распространения волн сжатия и разгрузки в массиве. Чем больше глубина и меньше скорости волн, тем больше отрезок времени, разделяющий первую и вторую стадии взрыва. Таким образом, создавая над горизонтальным цилиндрическим зарядом поверхность в форме цилиндрического сегмента с радиусом в сечении $R > h_0$, отсчитываемым от оси заряда, можно продлить стадию симметричного развития полости и при прочих равных условиях повысить полезную работу взрыва. Отметим, что полезной работой взрыва на этой стадии считается работа по расширению полости сжатыми продуктами детонации.

Сравнительную оценку полезной работы, производимой продуктами детонации на стадии симметричного развития полости при плоской свободной поверхности и поверхности в форме цилиндрического сегмента, можно произвести следующим образом.

Полезная работа, согласно [9], находится из выражения

$$dA = p dV,$$

где dV — приращение объема полости. Связь давления со степенью расширения полости определяется свойствами продуктов детонации и может быть представлена в виде [9]

$$\begin{aligned} pV^n = C_1 & \quad \text{при} \quad \begin{cases} p_n > p > p^*, \\ V_n < V < V^*, \end{cases} \\ pV^\gamma = C_2 & \quad \text{при} \quad \begin{cases} p^* > p > p_i \\ V^* < V < V_i \end{cases} \quad (i = 1, 2). \end{aligned}$$

Увеличение объема продуктов детонации происходит за счет расширения цилиндрической зарядной полости. Пренебрегая концевыми эффектами, запишем

$$dV = \pi [r_0 + dr(t)]^2 l - \pi r_0^2 l,$$

где $dr(t)$ — увеличение радиуса цилиндрической полости; l — длина заряда.

Пусть стадия симметричного расширения цилиндрической взрывной полости при плоской свободной поверхности и поверхности в форме цилиндрического сегмента заканчивается соответственно в моменты времени t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$). Тогда при мгновенной детонации увеличение объема зарядной полости за время t_1 будет

$$\Delta V_1 = \pi \int_0^{t_1} 2l r dr.$$

Полезная работа продуктов детонации при плоской поверхности

$$A_1 = C_1 \int_{V_n}^{V^*} V^{-n} dV + C_2 \int_{V^*}^{V_1} V^{-\gamma} dV.$$

В случае свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента увеличение объема зарядной полости выражается формулой

$$\Delta V_2 = \Delta V_1 + \pi \int_{t_1}^{t_2} 2l r dr.$$

Соответственно полезная работа

$$A_2 = C_1 \int_{V_H}^{V^*} V^{-n} dV + C_2 \int_{V^*}^{V_1} V^{-\gamma} dV + C_2 \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV = A_1 + C_2 \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV. \quad (2)$$

Таким образом, полезная работа, совершаемая продуктами детонации в случае свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента, превышает работу при плоской поверхности на величину, равную второму слагаемому в (2). Необходимо отметить, что при продлении камуфлетной стадии соответственно с увеличением полезной работы будет увеличиваться и доля необратимых потерь, а следовательно, будет уменьшаться и доля энергии, сообщаемой продуктами детонации среде на стадии газового ускорения.

Представим процесс передачи энергии взрыва в среду некоторой кривой (рис. 4). Начало координат соответствует моменту окончания детонации и вся энергия взрыва сосредоточена в продуктах детонации.

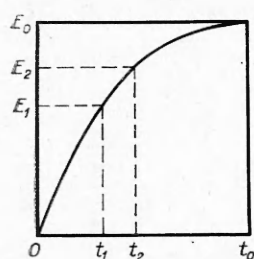


Рис. 4. Качественная зависимость передачи энергии среде от времени.

Величина E есть энергия, которая передается в среду к моменту времени t . При полном времени расширения полости t_0 , соответствующем камуфлетному взрыву, в среду будет передано максимальное количество энергии E_0 , которое близко к полной энергии взрыва. В случае взрыва на выброс энергии, переданные в среду на стадии симметричного развития при плоской и цилиндрической поверхностях, будут равны соответственно E_1 и E_2 . Разности $E_0 - E_1$ и $E_0 - E_2$ составляют те доли энергии, которые передаются на стадии газового ускорения, причем, как следует из рис. 4, $(E_0 - E_1) > (E_0 - E_2)$.

Однако, несмотря на это, общий эффект взрыва по выбросу грунта увеличивается за счет существенного уменьшения потерь энергии продуктов детонации в среде на стадии выброса. Забегая вперед, отметим, что данные выводы были подтверждены результатами экспериментальных взрывов. Действительно, нетрудно видеть, что в случае поверхности в форме цилиндрического сегмента затраты энергии внутри среды идут в основном на растяжение материала, в то время как при взрыве около плоской свободной поверхности энергия расходуется на преодоление и растягивающих, и сдвигающих напряжений, а последнее намного больше растягивающих [10].

Об устойчивости откосов взрывных выемок

При крупных взрывах на выброс после образования видимой выемки часто центр размещения заряда в грунтах оказывается внутри разрушенной породы [4, 11]. Вместе с тем установлено, что в процессе развития взрыва на выброс на начальных стадиях образуется цилиндрическая полость, заполненная продуктами детонации, причем нижняя полуполость сохраняется в течение некоторого времени и после прорыва купола и выхода газов из полости. И тот факт, что окончательная глубина выемки оказывается меньше глубины заложения заряда, свидетельствует о наличии значительного объема обрушения бортов первоначальной выемки. Отсюда следует, что такие параметры выемки выброса, как видимая глубина, ширина по дну и по верху, существенным образом зависят от прочностных показателей грунта, характеризующих устойчивость откосов взрывных выемок и в конечном счете определяющих их качество.

Наиболее полно вопросы устойчивости откосов взрывных выемок, по-видимому, освещены в работах [12, 13]. Выполненные исследования позволили установить, что, используя теорию предельного напряженного состояния грунтового массива, можно не только качественно объяснить механизм выброса грунта на периферийных участках взрывных выемок,

по и рассчитать крутизну их откосов. Для этого используется следующая схематизация выброса грунта на периферийных участках. При взрыве под действием касательных напряжений в грунтовом массиве образуются площадки скольжения [12]. В момент достижения предельного напряженного состояния площадки характеризуются равенством сдвигающих и удерживающих сил. Затем происходит слияние их в два семейства поверхностей скольжения. Считается, что после выхода волны сжатия становится возможной реализация сдвига по одному из двух семейств поверхностей скольжения. Уравнения обоих семейств поверхностей скольжения в полярной системе координат r и ρ имеют вид

$$r = K \exp(\pm \rho \operatorname{ctg} \psi),$$

где ψ — постоянный угол наклона площадок скольжения к радиальным направлениям. Уравнение для последней (от оси симметрии) реализуемой поверхности скольжения, образующей границу взрывной выемки и позволяющей рассчитать крутизну ее откосов, имеет вид

$$r_b = h_0 \sqrt{1 + n^2} \exp(-\rho \operatorname{ctg} \psi),$$

где n — показатель действия взрыва.

Непосредственно у земной поверхности угол наклона откоса

$$\alpha = \operatorname{arctg} n + \psi.$$

Ниже откос выполаживается, и на глубине h_0 угол его наклона становится равным ψ . На более отдаленных расстояниях от выемки (за зоной разрушения) изменений прочностных показателей не наблюдается, т. е. на этих расстояниях грунтовой массив является областью более высоких прочностных показателей. Эта область и определяет повышенную устойчивость откосов взрывных выемок.

При такой схематизации оказывается возможным рассчитать устойчивость откоса при скольжении по круглоцилиндрической поверхности. Для этого строится поверхность скольжения, а на отсекаемой части массива по экспериментальным данным наносятся изолинии плотности, сцепления и угла внутреннего трения. Затем определяются средние показатели по участкам поверхности скольжения, в том числе с учетом деформационной анизотропии массива [12]. Отсекаемая поверхностью скольжения MN призма делится вертикальными плоскостями (рис. 5) на ряд столбов, измеряются высота каждого (i -го) столба H_i и длина наклонного основания (длина участка поверхности скольжения под столбом) L_i .

Формула для расчета коэффициента устойчивости имеет вид

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^k p_i \operatorname{tg} \varphi_i \cos \beta_i + \sum_{i=1}^k c_{0i} \Delta L_i}{\sum_{i=1}^k p_i \sin \beta_i}, \quad (3)$$

где p_i — вес i -й расчетной полосы; c_{0i} , φ_i — средние в пределах отсекаемого участка величины сцепления и угла внутреннего трения; β_i — угол наклона к горизонту расчетного участка поверхности скольжения.

Величина p_i определяется для каждой полосы путем разбивки каждой i -й полосы по высоте на k отдельных участков и расчета среднего объемного веса γ_i по формуле

$$\gamma_i = \frac{1}{H_i} \sum_{j=1}^k \gamma_{ji} \Delta h_{ji},$$

где Δh_{ji} — высота j -го элемента i -й полосы; γ_{ji} — объемный вес грунта в пределах этого элемента.

Таким образом, приведенные соотношения позволяют определить границы зоны разрушения грунтов, примыкающих к верхним частям откосов. Установлено, что в пределах этих зон происходит неполная реа-

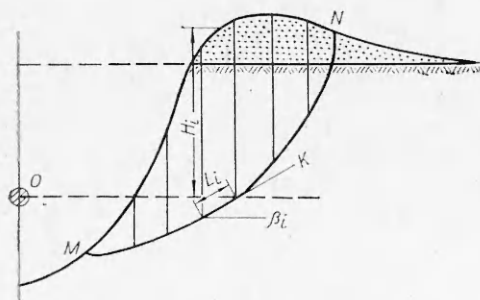


Рис. 5. Схема расчета устойчивости откосов взрывной выемки.

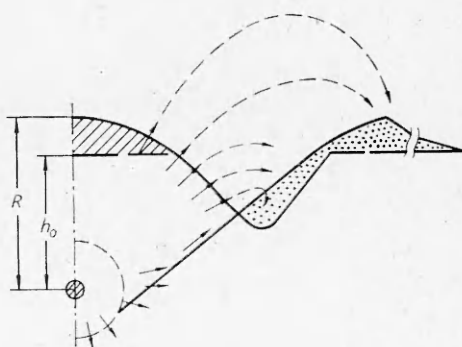


Рис. 6. Схема определения перемещений грунта из контура взрывной выемки в навалы и окружающий массив в случае свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента.

лизация поверхностей скольжения, поскольку, как следует из [12, 13], движущиеся частицы не обладают достаточной энергией для обеспечения возможности выброса. Грунт в этой зоне, приобретающий анизотропное строение, есть основная причина неустойчивости откосов в верхней части выемки, следствием которой является ее обрушение и заполнение дна выемки.

Наличие свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента способствует (благодаря равномерному распределению и уменьшению потерь энергии ВВ в среде) увеличению запаса кинетической энергии движущихся частиц грунта. Это приводит к тому, что происходит более полная реализация поверхностей скольжения на периферийных участках взрывной выемки, поскольку, как показали результаты опытных взрывов, энергия движущихся частиц оказывается достаточной для обеспечения возможности выброса и, соответственно, уменьшения обрушения и оползания бортов на дно выемки. Схема движения грунта при наличии такой поверхности показана на рис. 6. Характерно в данном случае, что борта образующейся выемки имеют более пологую форму, что, как следует из (3), способствует повышению устойчивости откосов.

Некоторые результаты экспериментальных взрывов

Экспериментальные взрывы проводились в полевых условиях. Цилиндрическая поверхность над основным зарядом создавалась с помощью вспомогательных зарядов [14]. Схема расположения зарядов в массиве (вспомогательных и основного) показана на рис. 7. Взрывы проводились в грунтах с невысокой естественной влажностью. Тип грунтов — лессовидные суглинки, уровень грунтовых вод 16—17 м. Выбор участка обусловлен тем, чтобы исключить влияние уровня грунтовых вод на результат выброса [15] и максимально обеспечить одинаковые условия для взрывов с разными поверхностями. После взрывов производился визуальный осмотр, затем осуществлялась маркшейдерская съемка поперечных сечений и продольных профилей выемок. Для сравнения в табл. 1 при-

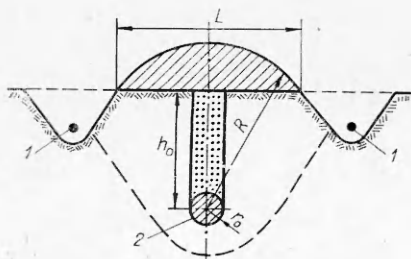


Рис. 7. Схема образования свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента.

1 — центры размещения вспомогательных зарядов; 2 — основной заряд.

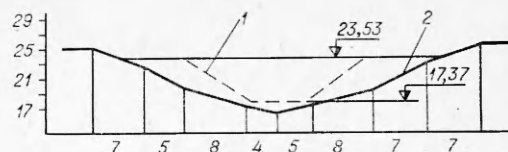


Рис. 8. Результат экспериментального взрыва (маркшейдерская съемка) по схеме с цилиндрической свободной поверхностью.

1 — проектный контур; 2 — фактический профиль.

Таблица 1

Форма поверхности	Ширина выемки по верху, м		Глубина выемки, м		Площадь поперечного сечения, м ²		Фактический удельный расход ВВ, кг/м ³
	1	2	1	2	1	2	
Плоская	56	40	6,5	6,5	234	156	4,02
Цилиндрический сегмент	50	47	5,8	7,5	192	218	2,11
Плоская	21,2	20,2	6,0	6,0	66,0	60,6	4,62
Цилиндрический сегмент	21,2	21,2	6,0	6,4	66,0	73,4	2,83

Примечание. 1 — проектные параметры, 2 — фактические (то же в табл. 2).

Таблица 2

Глубина выемки, м		Ширина выемки по верху, м		Ширина выемки по дну, м		Площадь поперечного сечения, м ²		Фактический удельный расход ВВ, кг/м ³
1	2	1	2	1	2	1	2	
6,5	6,8	30,0	40,0	6,0	7,0	111,5	159,8	2,85
7,5	7,6	30,0	41,2	6,0	9,2	135,0	191,5	2,38
5,0	7,2	23,5	36,2	6,0	6,4	73,0	155,9	2,53
6,5	7,2	27,5	52,4	6,0	8,4	111,5	220,3	2,07
7,0	7,4	28,0	35,8	6,5	9,0	125,0	165,8	2,75
4,8	5,8	25,5	32,4	6,0	6,2	76,0	141,0	2,38
6,0	7,2	23,5	38,4	6,0	7,4	92,0	173,4	2,28
6,5	6,72	26,0	34,0	6,5	6,0	107,7	134,4	2,94

ведены результаты взрывов по схеме с плоской свободной поверхностью и с поверхностью в форме цилиндрического сегмента. Как видно из таблицы, параметры выемок, полученных по второй схеме, находятся в лучшем соответствии с проектными. Причем как в первом, так и во втором случае фактический удельный расход ВВ при цилиндрической свободной поверхности значительно уменьшился.

Этот факт подтверждает, что при использовании свободной поверхности над зарядом в форме цилиндрического сегмента потери энергии продуктов детонации в среде на стадии газового ускорения значительно уменьшаются. В дальнейшем опытные взрывы проводились только по схеме, показанной на рис. 7. Однако для косвенного сравнения расход ВВ на единицу длины принимался равным расходу ВВ при плоской поверхности. Результаты взрывов приведены в табл. 2, где видно, что фактические размеры выемок (глубина, ширина по верху и по низу, площадь поперечного сечения) существенно превышают проектные. Характерный поперечный профиль выемки, полученный по схеме с цилиндрической поверхностью, показан на рис. 8.

Выводы

1. Образование поверхности равных сопротивлений способствует задержанию процесса выброса грунта в направлении ЛНС, что приводит к увеличению времени действия взрыва в среде и повышению эффективности выброса.

2. В случае свободной поверхности в форме цилиндрического сегмента уменьшаются потери энергии взрыва на стадии газового ускорения, что приводит к уменьшению фактического удельного расхода ВВ.

3. Профили поперечных сечений выемок, образованных по схеме с цилиндрической свободной поверхностью, близки к параболической с более пологими бортами, что является существенным для обеспечения устойчивости откосов взрывных выемок.

Поступила в редакцию 29/VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Ромашов, Н. Н. Симонов. Взрывное дело, № 64/21. М.: Недра, 1968.
2. М. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. И. Ромашов. Взрыв на выброс. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
3. Механический эффект подземного взрыва/Под ред. М. А. Садовского. М.: Недра, 1971.
4. А. Н. Ромашов. Особенности действия крупных подземных взрывов. М.: Недра, 1980.
5. Л. С. Марченко. Увеличение эффективности взрыва при добывании полезных ископаемых. М.: Наука, 1965.
6. А. Н. Ханукаев. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра, 1974.
7. Г. И. Покровский. Взрывное дело, № 51/8. М.: Госгортехиздат, 1963.
8. О. А. Арутюнов, А. Я. Жуков, Р. С. Крысин и др. Возможности увеличения времени действия взрыва горизонтального заряда в грунтах. Деп. ЦБНТИ Минводхоза СССР, № 323—78.
9. В. Н. Родионов. К вопросу о повышении эффективности взрыва в твердой среде. М.: изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1962.
10. А. И. Ромашов. Взрывное дело, № 64/21. М.: Недра, 1978.
11. В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко, В. П. Николаевский и др.— В кн.: Механика деформируемых твердых тел. Т. 7. М.: изд. ВИНТИ, 1974.
12. Г. И. Черный. Изменения физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. Киев: Наукова думка, 1979.
13. Г. И. Черный. Устойчивость отколов взрывных выемок. Киев: Наукова думка, 1980.
14. О. А. Арутюнов, Р. З. Камалян, А. Г. Пьянков.— В кн.: Энергия взрыва на строительстве гидромелиоративных объектов в Средней Азии. Ташкент, 1980.
15. О. А. Арутюнов, С. С. Григорян, Р. З. Камалян. Изв. АН АрмССР. Механика, 1981, 6.

ПАРОВОЙ ВЗРЫВ В СМЕСИ ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ

Г. Б. Усынин, Н. И. Храмов

(Горький)

Контакт между двумя жидкостями с существенно различными температурами может привести к быстрому росту паросодержания в более холодной жидкости и принять форму парового взрыва. Вопросам теплового взаимодействия расплавленного топлива и теплоносителя ядерного реактора посвящено довольно много работ, обзор которых приведен в [1]. Тем не менее причины возникновения парового взрыва остаются до конца не выясненными.

Одним из наиболее важных остается вопрос о доле тепловой энергии, переходящей в механическую на последней стадии дробления горячей жидкости. Авторы работы [2] определяют эту долю в предположении, что тепловое взаимодействие на этой стадии проходит две фазы. Первая фаза — тепловое расширение охладителя и вторая — пленочное кипение. Максимальное давление, согласно [2], получается во время второй фазы.

Вывод о существовании первой фазы сделан в [3] на основе экспериментов по теплоотдаче от движущегося разогретого танталового шара к натрию. При этом предполагается, что температура свободной поверхности натрия вблизи шара значительно превышает температуру насыщения. Такое утверждение, по нашему мнению, нуждается в дополнительных доказательствах. Однако, если положить, в соответствии с [4], температуру свободной поверхности равной температуре насыщения, а коэффициент теплоотдачи подсчитывать по обычной формуле для движущейся сферы

$$Nu = 2 + 0,55Re^{0,55}Pr^{0,33},$$

где $Pr = a_l/v_l$; $Re = 2r_f v/v_l$; $Nu = 2r_f \alpha/\lambda_l$; a , v , α — коэффициенты температуропроводности, вязкости и теплоотдачи; r_f , v — радиус и скорость движения горячей частицы; λ — теплопроводность; индексы f и l отно-