

П. П. Бондарь, В. А. Плаксий, С. П. Губенко

О ПОДОБИИ И МОДЕЛИРОВАНИИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВОВ СФЕРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА В СЛАБОСВЯЗАННЫХ ГРУНТАХ

Методы физического моделирования действия взрывов в настоящее время развиваются по двум направлениям. Полное моделирование, под которым понимается предсказание параметров воронок, образующихся при натуральных подземных взрывах, по параметрам воронок, образующихся при взрывах, проводимых в уменьшенных масштабах и в облегченных для эксперимента условиях, является традиционным и довольно часто используется в практике взрывного дела. К числу модельных исследований этого направления можно отнести способ определения показателя подобия для ядерных взрывов по результатам химических взрывов [1], маломасштабные опыты с использованием центробежных машин или линейных ускорителей [2—5]. Второе направление, получившее наибольшее развитие, — это моделирование отдельных стадий процесса. Характерна для этого направления модель [6, 7], в которой волновые эффекты полностью исключены из рассмотрения, а все явление выброса целиком имитируется второй стадией развития взрыва на выброс — стадией газового ускорения. Результаты такого моделирования неплохо согласуются с результатами крупных подземных взрывов. Однако этот метод требует точных данных о размерах взрывной полости на момент окончания камуфлетной стадии развития взрыва на выброс и применения сложных лабораторных вакуумных установок.

Частичное моделирование позволяет выяснить наиболее важные особенности явлений, установить определяющие параметры и построить качественные представления о явлениях в целом. Количественных ответов этот метод не дает, что при необходимости прогнозирования результатов натуральных взрывов заставляет возвращаться к полному моделированию. Моделирование проводится в обычных условиях (лабораторных, полигонных) на маломасштабных моделях, использующих в качестве среды обычные грунты (чаще всего пески), а в качестве источника — заряды химических ВВ. При использовании песчаных грунтов и зарядов высокочувствительных ВВ (тэн, гексоген, азид свинца и др.) удается построить достаточно малые модели при относительно низких трудозатратах и высокой точности, что позволяет провести большое число опытов при их хорошей повторяемости.

Основная трудность состоит в переносе данных на натурные взрывы. Результаты взрывов на выброс в слабосвязанных грунтах зарядов массой M от 0,8 г до 100 кг показывают, что закон подобия

$$W\epsilon^{-m} = \text{const}, \quad (1)$$

установленный в процессе натуральных взрывов [8] и строго доказанный в [9] (W — глубина заложения заряда ВВ с энергией ϵ при $m = 1/3$), в таком широком диапазоне изменения масштаба взрывов не работает. Об этом свидетельствуют зависимости относительного радиуса воронки от относительной глубины заложения заряда $R/\epsilon^{1/3} = f(W/\epsilon^{1/3})$, представленные на рис. 1, а, где приняты следующие обозначения взрывов: 1 — заряды тэна, $M = 0,8$ г в сухом кварцевом песке [10]; 2 — аммонит 6ЖВ, $M = 20$ г в плотном влажном песке, 3 — ТГ 50/50, $M = 23 \div 135$ г в песчаном грунте [11]; 4—7 — тротил, $M = 116$ (4), 1160 (5), 18 200 (6) и 454 000 кг (7) в аллювии [8]; 8 — ядерные взрывы мощностью от 1,2 до 100 кт в аллювии [8]; 9 — взрывы зарядов тэна массой 1,34 г

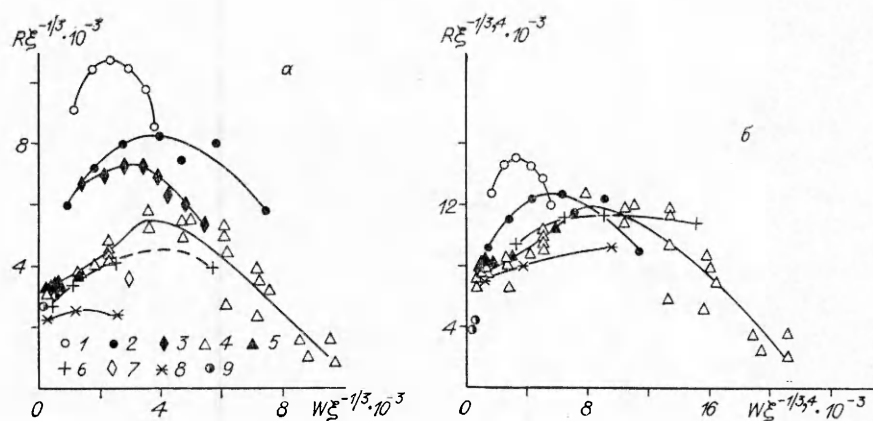


Рис. 1.

в песке «Оттава» при центробежном моделировании ($g = 3380 \text{ м/с}^2$) ядерного взрыва «Джонни Бой» [4].

Американские ученые на основе результатов химических и ядерных взрывов установили, что $m = 1/3, 4$, при этом утверждается, что для взрывов разных масштабов можно построить единые графические зависимости [1]:

$$\begin{aligned} R/\epsilon^m &= f_1(W/\epsilon^m), \quad H/\epsilon^m = f_2(W/\epsilon^m), \\ V/\epsilon^m &= f_3(W/\epsilon^m), \end{aligned} \quad (2)$$

где H и V — соответственно глубина и объем воронки выброса. Однако из рис. 1, б видно, что закон (1) при $m = 1/3, 4$ имеет также ограниченный диапазон применения по масштабу взрыва.

Ограниченность диапазона применения закона подобия в виде (1) по масштабу взрывов можно объяснить тем, что он не учитывает параметров физико-механического состояния грунтов и зависимости степени влияния процессов, имеющих место при взрывах в грунтах, от масштаба взрыва. Здесь прежде всего имеется в виду проникновение продуктов детонации (ПД) в поры грунта при расширении взрывной полости, процессы тепло- и массообмена между ПД и средой, в значительной степени определяющие результаты микровзрывов [10, 12—14]. При макровзрывах достаточно сильно влияние силы тяжести [8]. Рис. 1, б показывает, что $m = 1/3, 4$ в законе (1) в отличие от $m = 1/3$ позволяет приблизить точки, полученные по результатам крупных взрывов, к единой графической зависимости (2). Однако существенное расхождение между результатами микро- и макровзрывов он не ликвидирует. Отсюда следует вывод о необходимости получения закона подобия, который позволял бы с приемлемой точностью переносить результаты модельных микровзрывов (заряды массой порядка десятков грамм и меньше) на натурные.

При построении такого закона подобия использован формальный аппарат теории размерностей. В качестве определяющих независимых переменных, связанных с образованием воронок при взрывах в слабосвязанных грунтах, приняты следующие величины: ϵ — полная энергия заряда ВВ (параметр источника), W — глубина заложения заряда (геометрическая характеристика системы), g — ускорение силы тяжести, p_0 — атмосферное давление, ρ_0 — плотность грунта. Кроме того, в соответствии с выводами [1] о влиянии свойств грунтов на эффект взрыва (расположение по важности, содержание воды в среде, прочность среды на сдвиг, пористость, сжимаемость), при построении закона подобия учтена свободная пористость грунта (содержание воздуха в единице массы грунта), которая косвенно учитывает и содержание воды в грун-

те, так как рассчитывается по формуле

$$V_0 = \frac{\alpha_1}{\rho_0} = \frac{1}{\rho_0} - \frac{\rho_s W_g + \rho_f}{\rho_b \rho_s (1 + W_g)},$$

где α_1 — свободная пористость грунта; ρ_s и ρ_b — плотности твердой фазы грунта и воды; W_g — весовая влажность грунта.

Прочность на сдвиг из-за небольшого диапазона ее изменения для слабосвязанных грунтов, а также сжимаемость грунта, влияние которой при взрывах на выброс незначительное [8], не учитывались. Зависимые величины — полуширина воронки выброса R , ее глубина H и объем V .

Поскольку имеются шесть переменных и три размерности, существуют три безразмерные комбинации π_i ($i = 1, 2, 3$) такие, что $\bar{F}(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0$. В качестве величин с независимыми размерностями приняты ε , g и W . Тогда на основе теории размерностей [15] получаем

$$\begin{aligned} R_0, H_0, V_0 &= f_j(\pi_1, \pi_2, \pi_3), \\ R_0 &= R/W, H_0 = H/W, V_0 = V/W^3, \pi_1 = \varepsilon/(\rho_0 g W^4), \\ \pi_2 &= \varepsilon/(\rho_0 W^3), \pi_3 = \varepsilon V_a/(g W^4), j \rightarrow R, H, V. \end{aligned} \quad (3)$$

Безразмерную комбинацию π_3 , учитывая, что $V_a = \alpha_1/\rho_0$, перепишем в виде

$$\pi_3 = \varepsilon \alpha_1/(\rho_0 g W^4).$$

Установить каждую из функций $f_j(\pi_i)$ без изменения g и ρ_0 невозможно. Поэтому из π_i был построен один безразмерный комплекс $\pi_0 = (\pi_1 \pi_2 \pi_3)^{1/3}$ или

$$\pi_0 = \frac{\varepsilon \alpha_1^{1/3}}{W^{11/3} (\rho_0 g)^{2/3} \rho_0^{1/3}}. \quad (4)$$

Тогда закон подобия будет иметь вид

$$\pi_0 = \text{const}. \quad (5)$$

Оценка его правомочности выполнена на основе содержащихся в литературе данных о результатах химических и ядерных взрывов в слабосвязанных грунтах, а также взрывов, проведенных авторами.

Зависимости $R_0, H_0, V_0 = f_j(\pi_0)$ приведены на рис. 2, точки получены по результатам взрывов следующих зарядов: 1 — тэн, $M = 0,15$ г в сухом кварцевом песке при атмосферном давлении 133,33 Н/м² [16], 2 — тэн, $M = 1,34$ г в песке «Оттава» при нормальном атмосферном давлении (моделирование ядерного взрыва «Джонни Бой» на центробежной машине при $g = 3380$ м/с²) [4], 3 — тэн, $M = 0,8$ г в сухом кварцевом песке [10], 4 — тэн, $M = 0,8$ г в сухом кварцевом песке [17], 5 — тротил, $M = 116 \div 454 000$ кг в аллювии [8], 6 — ядерные взрывы мощностью от 1,2 до 100 кт в аллювии [8], 7 — тэн, $M = 1 \div 4$ г в плотном влажном песке на линейном ускорителе при перегрузках от 10 до 60 [3], 8 — тротил, $M = 10 \div 1000$ кг в лессах [8], 9 — аммонит 6ЖВ, $M = 0,02$ кг в плотном влажном песке.

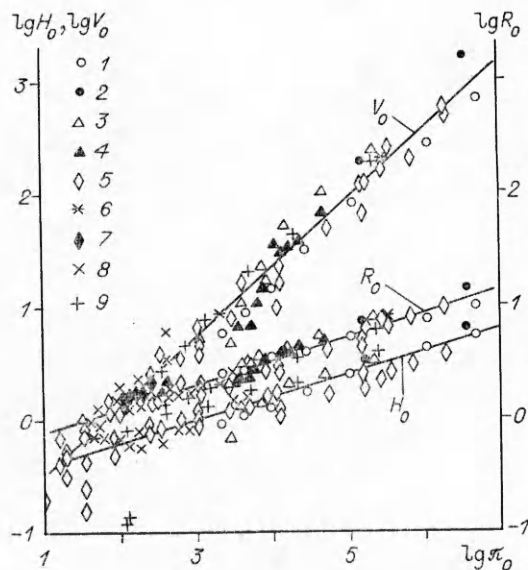


Рис. 2.

Статистическая обработка результатов позволила получить корреляционные зависимости:

$$R_0, H_0, V_0 = K_j \pi_0^{\mu_j}, \quad (6)$$

где K_j, μ_j — эмпирические коэффициент и показатель степени, имеющие значения: $K_R = 0,46387, \mu_R = 0,2124$ при коэффициенте корреляции $r = 0,976$ и $R_0 \geq 1,0$; $K_H = 0,248; \mu_H = 0,2009$ при $r = 0,968$ и $H_0 \geq 0,6$; $K_V = 0,075, \mu_V = 0,61147$ при $r = 0,986$ и $V_0 \geq 1,0$.

При рассмотрении зависимостей (6) следует учесть, что при определении величины π_0 для результатов взрывов из литературных источников принимались усредненные значения ρ_0 и α_1 .

Перепишем (6) так:

$$R, H = K_j \varepsilon^{\mu_j} W^{1 - \frac{11}{3} \mu_j} (\rho_0 g)^{-\frac{2}{3} \mu_j} p_0^{-\frac{1}{3} \mu_j} \alpha_1^{\frac{1}{3} \mu_j}, \quad (7)$$

$$V = K_V \varepsilon^{\mu_V} W^{3 - \frac{11}{3} \mu_V} (\rho_0 g)^{-\frac{2}{3} \mu_V} p_0^{-\frac{1}{3} \mu_V} \alpha_1^{\frac{1}{3} \mu_V}. \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) подобны по виду зависимости радиуса полости от независимых переменных, связанных с образованием полостей при камуфлетных взрывах в грунтах [18].

Из корреляционных зависимостей можно получить выражение для расчета массы заряда ВВ при образовании выемок в слабосвязанных грунтах взрывами на выброс:

$$Q = K_0 W^{3,667} n^{1/\mu_R}, \quad (9)$$

где Q — масса заряда ВВ; $n = R_0$ — показатель действия взрыва; K_0 — аналог расчетного удельного расхода ВВ из формулы М. М. Борескова

$$[1] K_0 = \frac{(\rho_0 g)^{2/3}}{\varepsilon_* K_R} \left(\frac{p_0}{\alpha_1} \right)^{1/3}; \quad \varepsilon_* — \text{удельная энергия ВВ.}$$

Итак, в работе получен закон подобия для подземных взрывов сферических зарядов выброса в слабосвязанных грунтах (4), (5), позволивший привести к единой графической зависимости результаты химических и ядерных взрывов зарядов мощностью от 0,15 г до 100 кг. По результатам модельных и натуральных взрывов определены значения эмпирических величин в зависимостях $R_0, H_0, V_0 = f_j(\pi_0)$. Высокие значения коэффициентов корреляции, полученные при этом, свидетельствуют о хорошей сходимости экспериментальных точек к установленной зависимости.

Закон подобия (4), (5) позволяет переносить непосредственно на натуру результаты микровзрывов, полученные на моделях из обычных грунтов при использовании в качестве источника зарядов химических ВВ. Зависимости (7) — (9) могут быть использованы как для прогнозирования действия подземных взрывов сферических зарядов выброса, так и для расчета параметров взрывов при образовании выемок выброса в слабосвязанных грунтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. — М.: Недра, 1980.
2. Покровский Г. И., Федоров И. С. Центробежное моделирование для решения инженерных задач. — М.: Госстройиздат, 1953.
3. Барсанаев С. Б., Гурович В. И., Распихин К. А. и др. Докл. АН СССР, 1979, 249, 1.
4. Gaffney E. S. // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th. — N. Y.: Pergamon Press, 1978.
5. Викторов В. В., Степанов Р. Д. Инженерный сборник, 1960, 28, 87.
6. Садовский М. А., Адушкин В. В., Родионов В. Н. Докл. АН СССР, 1966, 167, 6, 1253.
7. Адушкин В. В., Родионов В. Н. // Взрывное дело. № 64/21. — М.: Недра, 1968.
8. Механический эффект подземного взрыва/Под ред. М. А. Садовского. — М.: Недра, 1971.
9. Вахрамеев Ю. С. ПММ, 1970, 34, 5, 930.
10. Кузнецов В. М., Шацкевич А. Ф., Романов А. Р. ФГВ, 1979, 15, 2, 146.

11. Адушкин В. В., Зыков Ю. Н., Либин В. Я. ФТПРПИ, 1988, 4, 35.
12. Шацкевич А. Ф. // Взрывное дело. № 76/33.— М.: Недра, 1976.
13. Кузнецов В. М., Шацкевич А. Ф. ФГВ, 1977, 13, 5, 733.
14. Куликов В. И., Шацкевич А. Ф. ФГВ, 1974, 7, 3, 441.
15. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике.— М.: Наука, 1987.
16. Обербек В. Р. // Механика образования воронок при ударе и взрыве.— М.: Мир, 1977.
17. Зельманов И. Л., Кануков А. И., Куликов В. И. и др. ПМТФ, 1969, 2, 73.
18. Коротков П. Ф., Просвирина Б. М. ПМТФ, 1980, 2, 143.

г. Киев

Поступила в редакцию 23/1 1989,
после доработки — 5/V 1989

УДК 539.4

В. К. Голубев, И. Р. Трунин

О ПРОСТОМ ОПИСАНИИ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Определение условий откольного разрушения материалов при высокоинтенсивном взрывном нагружении — задача более сложная и трудоемкая по сравнению с низкоинтенсивным ударным нагружением. Критические условия разрушения в последнем случае можно достаточно просто определить визуально и при металлографическом обследовании нагруженных образцов, а также с помощью элементарных оценок силовых и временных условий нагружения [1]. В случае взрывного нагружения один из основных методов определения условий откольного макроразрушения материалов состоит в следующем. Путем непосредственного сохранения в результате мягкого торможения либо в процессе регистрации при разлете определяется толщина первого откольного слоя. Далее рассчитывается максимальное отрицательное давление p_t в плоскости образца соответствующей глубине макроскопической откольной трещины. В работе [2] методом импульсной рентгенографии получены результаты по откольному разрушению Al, Cu, Ni и Pb при взрывном нагружении.

Наряду с определенными достоинствами, следует отметить также и присущие этому методу недостатки. Так, для уравнений состояния продуктов детонации (ПД) и материала нагружаемого образца, а также для условий инициирования заряда ВВ используются некоторые приближения, что неизбежно приводит к систематической неопределенности полученных результатов. Однако основную неопределенность здесь все же вносит априорное предположение о сохранении сплошности материала вплоть до момента его макроразрушения, т. е. неучет условий зарождения откольных повреждений при более низких растягивающих напряжениях, кинетики процесса разрушения и соответствующей релаксации напряжений, что рассматривалось в работе [3]. В связи с этим метод дает верхнюю оценку реализуемой в таких условиях прочности, хотя и остается в настоящее время действенным и фактически основным для определения условий откольного макроразрушения при взрывном нагружении.

Найденные в [2] значения откольной прочности для рассматриваемых четырех металлов характеризуются линейным ростом с увеличением корня квадратного из градиента давления в растягивающем импульсе $\Delta p/\Delta x$:

$$p_t = p_0 + a\sqrt{\Delta p/\Delta x}. \quad (1)$$

Использование полученного критерия для расчета условий множественного откольного разрушения образца из Al привело к хорошему согла-