

УДК 624.131

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА ЗАРЯДОВ ВЫБРОСА СФЕРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ

Камалян Р. З.¹, Камалян С. Р.²

MODELS CALCULATION COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARGES EMISSION OF THE SPHERICAL SYMMETRY

Kamalian R. Z., Kamalian S. R.

The comparative analysis of the calculation formulas of charges released into the soil is carried out. It is shown that the results for fluid models differ considerably from the experimental data. The best equivalence is in the case of the formula, obtained by the method of dimensions.

Keywords: explosive cavity, the rate of explosion action, fluid model, the optimal depth, the determine parameters.

Пусть на глубине h_0 осуществляется подземный взрыв некоторой массы Q заряда взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 1).

Действие взрыва заглубленного заряда массы Q в грунтовом массиве может носить камуфлетный характер, сопровождаться образованием провальных воронок или воронок выброса [1]. Камуфлетность возникает когда энергии, высвободившейся в результате детонации заряда, недостаточно для разрушения грунта и последующего его выброса. Основные механические эффекты, сопутствующие камуфлетному взрыву, — образование взрывной полости с достаточно разветвленной сетью трещин и зоны уплотнения. Провальные воронки возникают, если энергии заряда достаточно для полного разрушения грунта, но не достаточно для последующей его экскавации. Это приводит к тому, что разрушенный грунт обрушивается во взрывную полость, образуя провальную воронку. В случае если энергии заряда достаточно для последующего перемещения грунта и его распределения на дневной поверхности, возникает воронка выброса.

В практике взрывного дела определение массы заряда является наиболее важным этапом при составлении проекта производства буровзрывных работ (БВР) [2]. Ранее

было предложено множество расчетных формул, в большинстве своем эмпирических и теоретически недостаточно обоснованных [3, 4]. При их выводе авторы сравнительно произвольно подбирали те или иные математические выражения, стремясь только в большей степени удовлетворить имеющимся в их распоряжении экспериментальным данным. Так как обычно эти данные охватывали ограниченный интервал значений весов заряда и ограниченный диапазон изучаемых сред и взрывчатых веществ, то, оставаясь приближенно справедливыми для некоторых условий, они, при попытке обобщения их на другие условия, давали значительные отклонения от экспериментальных данных. Стремление к получению более точных формул приводило исследователей к введению поправок, коэффициентов, а в ряде случаев и к созданию новых зависимостей [3, 4]. Все эти формулы можно представить в общем виде

$$Q = kh^3 f(n), \quad (1)$$

где Q — масса заряда ВВ, h — глубина заложения заряда, k — величина, характеризующая свойства разрушаемой среды и свойства взрывчатого вещества (так называемой удельный расход ВВ), n — показатель действия взрыва равный $n = r/h$, r — радиус

¹Камалян Рубен Завенович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой общей и прикладной математики Академии маркетинга и социально-информационных технологий; e-mail: kasarub@mail.ru.

²Камалян Самвел Рубенович, канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой математики и прикладной информатики Краснодарского филиала Российского государственного торгово-экономического университета, доцент кафедры математического моделирования Кубанского государственного университета; e-mail: karuzav@mail.ru.

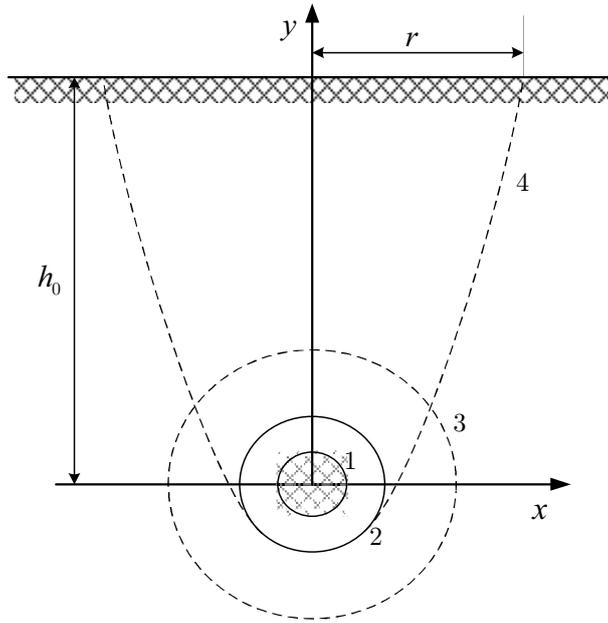


Рис. 1. Схема образования воронки выброса: 1 — заряд ВВ, 2 — взрывная полость, 3 — зона уплотнения, 4 — контур воронки

воронки выброса, $f(n)$ — функция показателя выброса.

В основе этих формул лежит геометрическое подобие и некоторый интегральный учет свойств среды в виде удельного расхода ВВ k . В отечественной практике взрывного дела наибольшее распространение, из всех формул [3, 4], получила так называемая формула Борескова, с функцией показателя выброса $f(n) = 0,4 + 0,6n^3$, справедливость которого ограничена значением показателя действия взрыва $0 \leq n \leq 3,0$.

Теоретические исследования по определению массы заряда выброса были начаты значительно позже. В основном для этой цели использовались жидкостные модели [5, 6]. К одной из первых можно отнести работу [7], где в представлении среды как идеальной несжимаемой жидкости получена формула вида

$$Q = kh^3 \left(\frac{1+n^2}{2} \right)^{9/4}. \quad (2)$$

Дополнительный множитель $2^{9/4}$ введен в формулу (2) для того, чтобы в окончательном результате в случае так называемой нормальной воронки, т.е. при $n = 1$ получить общепринятое выражение $Q = kh^3$. Это соотношение обычно используется для определения в заданной среде постоянной k путем подбора величины заряда Q , при которой образуется воронка нормального выброса. В работе [8], где среда также представлена в виде идеаль-

ной несжимаемой жидкости, получена формула

$$Q = qk\rho c_*^3 h^3 [0,5(1+n^2)]^{3/2}, \quad (3)$$

где q — удельная энергия взрывчатого вещества, $k = \text{const}$, c_* — значение критической скорости отрыва, характерное для данного грунта, ρ — плотность среды.

При больших глубинах h , когда сила тяжести начинает превалировать над прочностью грунта, что равносильно $c_* \sim \sqrt{gh}$, формула (3) принимает вид

$$Q = qk\rho gh^4 [0,5(1+n^2)]^{3/2}, \quad (4)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Однако и в (3) и в (4) функция $f(n)$ показателя выброса имеет один и тот же вид

$$f(n) = [0,5(1+n^2)]^{3/2}.$$

Для последующего анализа понадобится несколько подробное представление модели идеальной несжимаемой жидкости. Ее применение оправдывается тем, что на начальной стадии взрыва давление очень велико, что позволяет описывать состояние среды шаровым тензором. Иными словами, для описания начальной стадии действия взрыва в сплошной среде предполагается, что 1) среда несжимаема; 2) среда идеальна, т.е. в ней нет касательных напряжений; 3) деформация и смещения остаются малыми.

Заметим, что в рамках этой модели М. А. Лаврентьевым решена задача о формировании и действии кумулятивного заряда [9].

При применении жидкостной модели, как правило, используется импульсная постановка, суть которой состоит в следующем [6]. Имеется некоторая область G с границей Γ , заполненная идеальной несжимаемой жидкостью. В точках границы задано давление $P(N, t)$, $N \in \Gamma$, действующее в течение малого промежутка времени τ . Требуется определить в области G поля давлений $P(M, t)$ и скоростей $\mathbf{v}(M, t)$, $M \in G$. Для решения задачи вводится импульс давления

$$P(M) = \int_0^{\tau} p(M, t) dt. \quad (5)$$

Тогда, при условии кратковременности действия давления

$$\mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \text{grad } P(M).$$

Величина P/ρ является потенциалом скоростей. Из условия несжимаемости следует, что импульс давления (5) удовлетворяет уравнению Лапласа. Таким образом требуется решить задачу Дирихле для уравнения Лапласа при граничном условии (5). Заметим, что в импульсной постановке получены и формулы (2) и (3).

С физической точки зрения создание начального поля скоростей есть результат распространения, отражения и взаимодействия волн напряжений в среде, окружающей ВВ. Очевидно, что модель среды, основанная на схеме идеальной несжимаемой жидкости не в состоянии учесть всего многообразия свойств среды и взрывчатого вещества и достаточно точно отразить физические явления, сопровождающие процесс. В этой связи представляет интерес подход, основанный на общем методе теории размерностей [10]. Строго говоря метод предполагает четкую формулировку задачи, лучше всего — математическую. Заметим, что если задача математически не сформулирована, то при использовании метода теории размерностей необходимо знать хотя бы основные, определяющие явления, параметры. Применительно к действию взрыва в грунтах и горных породах задача может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти зависимость геометрических размеров воронки выброса от

величины и свойств заряда, глубины его заложения и характеристик разрушаемой среды.

Теперь перейдем к рассмотрению параметров, от которых должно зависеть решение этой задачи.

Заряд взрывчатого вещества полностью определяется следующими параметрами: энергией взрыва ε , скоростью детонации D , плотностью взрывчатого вещества $\rho_{ВВ}$ и его геометрией. Этим параметров вполне достаточно для описания основных свойств заряда. Через них однозначно можно выразить и другие свойства заряда ВВ, не фигурирующие в условии в явном виде. Например, масса заряда Q может быть выражена через его плотность $\rho_{ВВ}$ и геометрические размеры r_0 , поэтому можно ее в явном виде не вводить в систему определяющих параметров.

Среда может быть охарактеризована плотностью ρ (для учета инерционных свойств среды), удельной работой разрушения γ , углом внутреннего трения θ . Для учета сжимаемости материала разрушаемой среды можно ввести модуль упругости E или скорость распространения упругих волн $v_0 = v_0(E, \rho)$.

Воронка выброса может быть охарактеризована глубиной заложения заряда h_0 , радиусом r или глубиной H . На решение задачи в общем случае будут влиять также параметры среды, находящейся выше свободной поверхности, т.е. параметры атмосферы: давление $P_{ат}$ и плотность $\rho_{ат}$.

Физический закон, устанавливающий зависимость между параметрами, входящими в систему, может быть выражен некоторым уравнением вида

$$F_1(\varepsilon, D, \rho_{ВВ}, r_0, \rho, \gamma, g, v_0, \theta, r, H, h_0, p_{ат}, \rho_{ат}) = 0.$$

Согласно π -теореме [10], уравнение, связывающее между собой m размерных величин, из которых $l \leq m - 1$ величин с независимыми размерностями, имеет решение в виде

$$F_1(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{m-l}) = 0,$$

где Π_i — являются безразмерными независимыми произведениями, составленными из m размерных величин; при этом число этих произведений равно $m - l$.

В нашем случае в систему определяющих параметров входят 14 величин, из которых 13 размерные, следовательно, $m = 13$. Из этих 13 размерных параметров только 3 параметра имеют независимые размерности,

т.е. $l = 3$. Таким образом, число определяющих параметров может быть сокращено до 10, если вместо размерных величин ввести безразмерные комбинации из этих величин. Из π -теоремы также следует, что в данном случае любые из десяти комбинаций, зависящие друг от друга, могут быть приняты в качестве определяющих. К таким комбинациям можно отнести следующие

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\varepsilon}{\gamma h_0^v}, & \Pi_2 &= \frac{\varepsilon}{g\rho h_0^{v+1}}, \\ \Pi_3 &= \frac{r}{h_0}, & \Pi_4 &= \frac{H}{h_0}, & \Pi_5 &= \frac{r_0}{h_0}, \\ \Pi_6 &= \frac{\varepsilon}{\rho_{\text{ВВ}} D^2 r_0^v}, & \Pi_7 &= \frac{v_0}{D}, & \Pi_8 &= \frac{\rho}{\rho_{\text{ВВ}}}, \\ \Pi_9 &= \frac{P_{\text{ат}}}{\rho_{\text{ВВ}} D^2}, & \Pi_{10} &= \frac{\rho_{\text{ат}}}{\rho_{\text{ВВ}}}. \end{aligned}$$

Таким образом решение может быть записано в виде

$$F_1 \left(\frac{\varepsilon}{\gamma h_0^v}, \frac{\varepsilon}{g\rho h_0^{v+1}}, \frac{r}{h_0}, \frac{H}{h_0}, \frac{r_0}{h_0}, \frac{\varepsilon}{\rho_{\text{ВВ}} D^2 r_0^v}, \frac{v_0}{D}, \frac{\rho}{\rho_{\text{ВВ}}}, \frac{P_{\text{ат}}}{\rho_{\text{ВВ}} D^2}, \frac{\rho_{\text{ат}}}{\rho_{\text{ВВ}}}, \theta \right) = 0. \quad (6)$$

Формула (6) определяет общую зависимость энергии взрыва от остальных параметров, входящих в условие задачи. Однако формула (6) в представленном виде малоинформативна, так как функция F_1 очень слабо ограничена. Для получения более конкретного соотношения, необходимы дополнительные предположения. При проведении взрывных работ, как правило, бывают известны параметры ВВ, т.е. известны плотность заряжения $\rho_{\text{ВВ}} = \text{const}$ и скорость детонации $D = \text{const}$. Кроме того, для конкретного ВВ отношение ε/r_0^v также есть величина постоянная. Задачу еще больше можно упростить, если рассматривать взрыв в относительно однородной среде, т.е. считать плотность постоянной величиной $\rho = \text{const}$. Тогда без особой погрешности будут постоянными и сцепление $\theta = \text{const}$ и скорость распространения упругих волн $v_0 = \text{const}$. Удельная работа разрушения γ может принимать разные, но конечные значения. Очевидно, что параметры атмосферы также могут быть приняты постоянными, т.е. $\rho_{\text{ат}} = \text{const}$, $P_{\text{ат}} = \text{const}$. При этих условиях параметры

$$\Pi_6 = \frac{\varepsilon}{\rho_{\text{ВВ}} D^2 r_0^v}, \quad \Pi_7 = \frac{v_0}{D}, \quad \Pi_8 = \frac{\rho}{\rho_{\text{ВВ}}},$$

$$\Pi_9 = \frac{P_{\text{ат}}}{\rho_{\text{ВВ}} D^2}, \quad \Pi_{10} = \frac{\rho_{\text{ат}}}{\rho_{\text{ВВ}}},$$

и θ окажутся постоянными и формула (6) примет вид

$$F_2 \left(\frac{\varepsilon}{\gamma h_0^v}, \frac{\varepsilon}{g\rho h_0^{v+1}}, \frac{r}{h_0}, \frac{H}{h_0}, \frac{r_0}{h_0} \right) = 0. \quad (7)$$

В последнем уравнении радиус заряда r_0 можно выразить через энергию взрыва ε . Действительно, для сферического, а также и цилиндрического, заряда ($v = 3, 2$) можно записать

$$\varepsilon = \sigma_v g \rho_{\text{ВВ}} q_0 r_0^v,$$

откуда следует, что

$$r_0 = \left[\frac{\varepsilon}{\sigma_v g \rho_{\text{ВВ}} q_0} \right]^{\frac{1}{v}}, \quad (8)$$

где

$$\sigma_v = \frac{2(v-1)\pi}{v}.$$

Здесь q_0 — удельная энергия взрывчатого превращения. С учетом (8) соотношение (7) запишется в виде

$$F_2 \left[\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \left(\frac{\varepsilon}{\sigma_v g \rho_{\text{ВВ}} q_0 h_0^v} \right)^{\frac{1}{v}} \right] = 0. \quad (9)$$

Входящие в (9) безразмерные параметры Π_1 и Π_5 связаны между собой через постоянные величины $\rho_{\text{ВВ}}$ и q_0 и переменные γ и g

$$\Pi_5 = \left(\frac{\gamma}{\sigma_v g \rho_{\text{ВВ}} q_0} \right)^{\frac{1}{v}} \Pi_1^{\frac{1}{v}}.$$

Из последнего соотношения, после некоторых преобразований, находим

$$\frac{\Pi_5}{\Pi_1} = \frac{\gamma}{\sigma_v g \rho_{\text{ВВ}} q_0} \left(\frac{h_0}{r_0} \right)^{v-1}.$$

Можно показать, что параметр Π_5 мал по сравнению с параметром Π_1 и им пренебречь. Тогда, исключив Π_5 из уравнения (9), окончательно получим

$$F_3 \left(\frac{\varepsilon}{\gamma h_0^v}, \frac{\varepsilon}{g\rho h_0^{v+1}}, \frac{r}{h_0}, \frac{H}{h_0} \right) = 0. \quad (10)$$

Для заряда сферической симметрии $v = 3$ и формула (10) примет вид

$$F_4 \left(\frac{\varepsilon}{\gamma h_0^3}, \frac{\varepsilon}{g\rho h_0^4}, \frac{r}{h_0}, \frac{H}{h_0} \right) = 0. \quad (11)$$

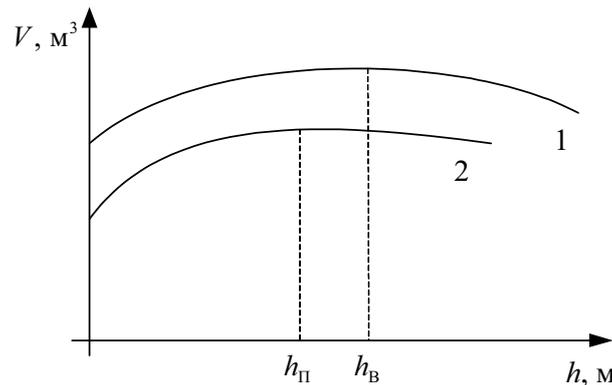


Рис. 2. Качественная зависимость объема выброса (1) и котловой полости (2) от глубины заложения заряда

Дальнейшее преобразование (11) с целью его упрощения нам не представляется возможным из-за отсутствия дополнительных надежных, широкого диапазона экспериментальных зависимостей. Однако и из (11) видно какие параметры, из общего числа рассмотренных, являются определяющими процесс. Тем не менее существует формула [11], полученная Саламахиным Т.М. на основании метода размерности, и имеющая вид

$$Q = kh_0^3 \frac{2(3n^2 + 4)^2}{n + 97}, \quad (12)$$

$$f(n) = \frac{2(3n^2 + 4)^2}{n + 97}.$$

Возможно, автором формулы (12) были использованы некоторые, установленные им, экспериментальные зависимости.

Представляет интерес сравнить результаты расчетов по приведенным формулам с данными экспериментальных исследований, осуществленных в натуральных условиях.

Однако прежде чем приступить к сравнительному анализу формул (2), (3), (12), рассмотрим вопрос о наличии оптимальных значений глубины заложения заряда и, соответственно, показателя действия взрыва.

Оптимальной глубиной заложения заряда при взрыве считается такая глубина, при которой образуется воронка максимальных размеров [12]. Экспериментально установлено, что эффект образования видимых воронок определяется как непосредственно выбросом грунта, так и ее уплотнением на камуфлетной стадии. Роль этих факторов неодинакова и зависит от масштаба взрывов. В соответствии с этим меняются и критерии для

выбора оптимальной глубины. Кривые, качественно характеризующие зависимость объема взрывной полости и выброшенного грунта от глубины заложения заряда, представлены на рис. 2.

При увеличении глубины оба объема возрастают, поскольку продукты детонации на большей глубине успевают до своего прорыва в атмосферу совершить большую работу по перемещению и деформированию среды. Однако общий ход их с глубиной различен. Взрывная полость достигает некоторого максимального значения и при дальнейшем увеличении глубины заложения заряда остается практически без изменений. При этом общее действие взрыва приобретает постепенно все более внутренний характер, пока взрыв не станет полностью камуфлетным. Объем же выброшенного грунта возрастает лишь до некоторой глубины заложения заряда и далее начинает уменьшаться. Это связано с тем, что запас кинетической энергии, которую взрыв сообщает грунту при данной массе заряда, имеет вполне определенное ограниченное значение. Затраты же энергии на перемещение грунта в поле силы тяжести с увеличением глубины заложения заряда возрастают неограниченно. Поэтому оптимальный выброс грунта возможен лишь при некоторой определенной глубине. При дальнейшем увеличении глубины запаса кинетической энергии становится недостаточно для подъема грунта над поверхностью земли и перемещения его за пределы воронки, в результате чего общий объем выброса уменьшается. Таким образом, определение оптимальной глубины заложения заряда должно учитывать проявление обоих факторов (образование взрывной полости и выброс грунта). В этой связи объем видимой воронки

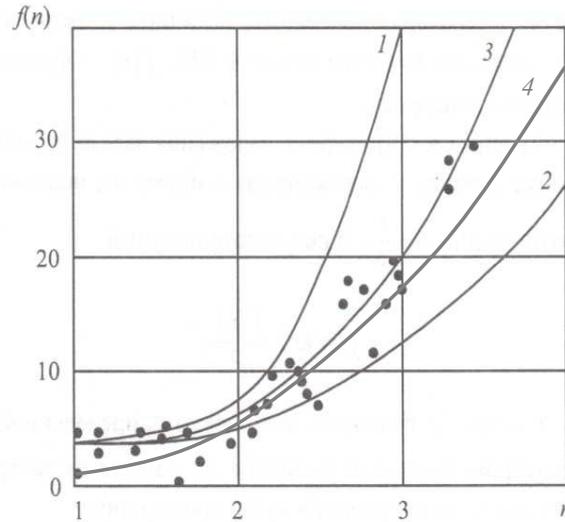


Рис. 3. Зависимость $f(n)$ от показателя выброса, рассчитанные по формулам: 1 — (3), 2 — (2), 3 — (12), 4 — по формуле Борескова. Точками нанесены экспериментальные данные

может быть представлен в виде двучленной формулы [12]

$$V = 0,85K_{\Pi}Q + 0,93Q^{3/4}, \quad (13)$$

где K_{Π} — показатель протреливаемости грунтов.

В уравнении (13) первое слагаемое — вклад в объем видимой воронки взрывной полости, второе — объем выброшенного грунта. Экспериментальный коэффициент в первом слагаемом показывает, что в объем видимой воронки входит 0,85 объема взрывной полости.

Естественно, что при использовании модели идеальной несжимаемой среды учет изложенного механизма выброса грунта затруднителен, тем не менее и в этом случае должен иметь место оптимальный показатель выброса, а следовательно, и связанная с ним оптимальная глубина заложения заряда.

Для удобства представим все три формулы в виде (1). Заменяя в (1) глубину заложения заряда h через радиус воронки r и показатель выброса n , используя соотношение $n = r/h$, получим

$$Q = kr^3 \frac{f(n)}{n^3}.$$

Считая Q функцией выброса n , определенной в некотором интервале значений n , найдем ее экстремум, для чего приравняем нулю производную

$$\frac{dQ}{dn} = kr^3 \frac{f'(n) \cdot n^3 - 3n^2 f(n)}{n^6} = 0,$$

откуда

$$\frac{f'(n)}{n^3} - 3 \frac{f(n)}{n^4} = 0. \quad (14)$$

Для формулы (3)

$$f(n) = [0,5(1+n^2)]^{3/2}, \quad f'(n) = 1,5(1+n^2)^{1/2}n.$$

Подставляя $f(n)$ и $f'(n)$ в (14), после преобразований получим $n = \sqrt{2,43} = 1,55$. По физическим соображениям $n \neq 0$, $n^2 \neq -1$ и не стремится к бесконечности. Следовательно, при $n \approx 1,55$ мы будем иметь минимум $f(n)/n^3$, а значит, минимум Q .

Для формул (2) и (12) имеем соответственно $n = 1,41$ и $n = 2,03$.

Зная оптимальное значение показателя выброса, нетрудно определить и оптимальную глубину заложения заряда для получения воронки заданного радиуса.

Практикой взрывных работ установлено, что воронка выброса максимального объема наблюдается примерно при $n = 2$. Этому значению показателя выброса лучше соответствует формула (12).

Интересно отметить, что функция показателя выброса в формуле Борескова не имеет оптимального значения.

На рис. 3 представлены зависимости $f(n)$ от n для всех формул, в том числе и формулы Борескова.

Как видно из рисунка и здесь наилучшее соответствие с экспериментальными данными наблюдается у формулы (12). Удовлетворительное соответствие наблюдается и у

формулы Борескова в интервале значений $1 \leq n \leq 3$, что было отмечено выше. При $n > 3$ расхождение между расчетной кривой и экспериментальными точками значительное.

Таким образом, из сравнительного анализа следует, что получаемые теоретические результаты с использованием модели грунта как идеальной несжимаемой жидкости далеки от реальных и пригодны больше для проведения качественного анализа, чем количественных оценок. Широкая же распространенность объясняется относительной простотой получаемых результатов.

Литература

1. Родинон В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Ромашов А. Н., Цветков В. М. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971. 224 с.
2. Проектирование взрывных работ в промышленности / Под ред. Б. Н. Кутузова. М.: Недра, 1983. 359 с.
3. Топорков В. А. Анализ расчетных формул для определения веса заряда / Ученые записки САИГИМСа. Вып. 7. Ташкент, 1962. С. 41–44.
4. Топорков В. А. Влияние диаметра и длины заряда на степень дробления горных пород взрывом / Дисс. ... канд. техн. наук. Ташкент, 1960. 140 с.
5. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1977. 408 с.
6. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977. 262 с.
7. Власов О. Е. Основы теории действия взрыва. М.: ВИА, 1957. 408 с.
8. Кузнецов В. М. Некоторые проблемы гидродинамической теории взрыва // ПМТФ. 1983. № 1. С. 88–96.
9. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Чельшев В. П., Шехтер Б. Н. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
10. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972. 440 с.
11. Камалян Р. З., Камалян С. Р. О модели грунтового массива при динамических воздействиях // Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. науки. 2005. Спецвыпуск. С. 79–84.
12. Ромашов А. Н. Особенности действия крупных подземных взрывов. М.: Недра, 1980. 243 с.

Ключевые слова: взрывная полость, показатель действия взрыва, жидкостная модель, оптимальная глубина, определяющие параметры.

Статья поступила 19 декабря 2011 г.

Академия маркетинга и социально-информационных технологий, г. Краснодар

Краснодарский филиал Российского государственного торгово-экономического университета, г. Краснодар

Кубанский государственный университет, г. Краснодар

© Камалян Р. З., Камалян С. Р., 2012