

УДК 544.45

DOI: 10.15372/PMTF202315339

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАМУФЛЕТНОГО ВЗРЫВА

В. А. Седнев, С. Л. Копнышев, А. В. Седнев*

Академия государственной противопожарной службы Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Москва, Россия

* Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
E-mails: sednev70@yandex.ru, serkopn@mail.ru, bauman@bmstu.ru

Получено решение центрально-симметричной задачи определения поля скоростей в сплошной упругопластической среде при камуфлетном взрыве в предположении о бесколебательном характере движения и несжимаемости среды в областях пластичности и упругости. Решение найдено с использованием камуфлетного уравнения — соотношения для определения давления на контактной поверхности расширяющейся взрывной полости. Полученное решение позволяет оценивать размеры зон расширения, пластического деформирования среды и воздействие взрывных возмущений на объекты.

Ключевые слова: давление, безопасность, камуфлетный взрыв, поле скоростей

Введение. В настоящее время энергия взрыва используется в различных областях, где требуется однократное направленное воздействие большой силы: при строительстве гидротехнических сооружений, сварке и резке металлов, синтезе веществ, прокладке каналов, взрывании льда на реках, углублении дна в реках, в оборонных целях. Наиболее трудоемки взрывные работы в горном деле при проходке горных выработок и добыче полезных ископаемых [1–4].

Использование внутренних зарядов, которые размещаются в заранее пробуренных шпурах, скважинах, камерах, позволяет решать основные задачи взрывного разрушения грунтов и горных пород. Если при взрыве заряда взрывчатого вещества в массиве породы его действие не проявляется на открытой поверхности, а локализуется внутри массива, оно называется внутренним действием (камуфлетом), а заряд — камуфлетным зарядом [5–8].

Процесс взаимодействия продуктов камуфлетного взрыва с окружающей средой начинается с момента выхода детонационной волны на поверхность заряда, когда газообразные продукты наносят резкий удар в окружающей среде, в результате чего в среде возникает ударная волна, а по газообразным продуктам к геометрическому центру взрыва следует волна разрежения. Многократно отражаясь от центра полости и ее поверхности, волна разрежения способствует быстрому выравниванию давления в продуктах взрыва. Результатом ударно-волнового взаимодействия является движение, а также одновременное деформирование и разрушение окружающей среды.

Так как отраженные волны быстро выравнивают давление в образовавшейся сферической полости, считается, что продукты взрыва внутри этого объема находятся под дей-

ствием постоянного давления. Механическое действие взрыва моделируется камуфлетным движением. Полезная работа продуктов взрыва совершается в фазе первичного расширения полости [6–8]. Начально-краевые условия центрально-симметричной задачи определяются на основе результатов анализа взаимодействия продуктов взрыва с окружающей средой. Для расчетов параметров сейсмозрывных волн при их распространении в различных средах применяются как численные, так и аналитические методы [9–12]. Для простых физических моделей взрыва удается получить аналитические решения с использованием кусочно-линейных аппроксимаций диаграмм объемного сжатия и сдвига.

1. Актуальность исследования. Камуфлетный взрыв исключает возникновение воздушной ударной волны и вредное воздействие продуктов взрыва на окружающую среду, однако приводит к возникновению сильных сейсмических колебаний, способных негативно воздействовать на близкорасположенные объекты и вызывать трещинообразование в элементах строительных конструкций, потерю их несущей способности, повреждение и разрушение трубопроводов, нарушение изоляции электрических и телефонных кабелей и т. д. Ввиду необходимости обеспечения безопасности таких объектов целью данной работы является решение задачи определения поля скоростей в сплошной упругопластической среде при камуфлетном взрыве.

2. Методика исследования. Механизм передачи энергии взрыва грунтам и породам определяется, прежде всего, давлением, действующим на них со стороны продуктов взрыва. Так, на расстояниях, равных $5 \div 7$ радиусам заряда, при камуфлетном взрыве в твердых средах амплитуда давлений достигает нескольких сотен атмосфер, а на границе области пластического деформирования среды (несколько десятков радиусов заряда), амплитуда давлений близка к величине предела текучести материала среды [6–8]. Поэтому в основу исследований было положено камуфлетное уравнение, полученное при решении задачи о расширении сферической полости в упругопластической среде за счет внутреннего давления [12–14].

Решение центрально-симметричной задачи о распространении взрывных возмущений в твердых средах основано на предположении, что в безграничное полупространство помещен глубинный сферический заряд радиусом r_3 , который мгновенно, без изменения объема превращается в газ высокого давления P_0 . В результате обмена энергией между газообразными продуктами взрыва и окружающей средой с момента времени $t = 0$ давление в сферической полости начинает уменьшаться, при этом ее радиус $a(t)$ увеличивается от начального значения, равного радиусу заряда: $a(0) = r_3$. Первой характеристикой геометрического положения точек возмущенной окружающей среды в сферических координатах является текущий радиус камуфлетной полости $a(t)$, второй — радиус упругопластической области $b(t)$. Предполагается, что давление в полости уменьшается в соответствии с уравнением [6–8]

$$P_0 = P_{00}(a/r_3)^{-3m}$$

($m = 1, 2 \div 1, 3$ — показатель степени; P_{00} — начальное давление в полости при $a = r_3$), а связь давления при $t > 0$ с радиусом, скоростью и ускорением расширяющейся полости определяется камуфлетным уравнением [7, 8]

$$P_0 = A + Ba\ddot{a} + C\dot{a}^2, \quad (1)$$

где A, B, C — константы, являющиеся характеристиками среды. Вызванное расширением полости возмущенное состояние среды в областях ее упругого и пластического деформирования характеризуется также плотностями ρ_0 и ρ соответственно. Предполагается, что переход от упругого состояния к пластическому сопровождается мгновенным изменением плотности среды от ρ_0 до ρ . Это позволяет приближенно учитывать сжимаемость.

Представим уравнение (1) в виде

$$a\ddot{a} + \frac{C}{B} \dot{a}^2 = \frac{1}{B} (P_0 - A)$$

и введем безразмерные переменные

$$y = \rho \dot{a}^2 / P_{00}, \quad x = a / r_3.$$

Тогда $y|_{x=1} = V^2$ (V — приведенная начальная скорость камуфлетной поверхности).

Продифференцируем переменные по времени и радиальной координате:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\dot{a}}{r_3}, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{2\rho \dot{a} \ddot{a}}{P_{00}}, \quad y' = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \frac{dt}{dx}.$$

С учетом выражения для x и указанных производных последнее уравнение сводится к следующему:

$$y' = \frac{2\rho \dot{a} \ddot{a}}{P_{00}} \frac{dt}{dx} = \frac{2\rho \dot{a} \ddot{a}}{P_{00}} \frac{r_3}{\dot{a}} = \frac{2\rho}{P_{00}x} a\ddot{a},$$

откуда получаем

$$a\ddot{a} = \frac{y' x P_{00}}{2\rho}.$$

Подставляя полученные для \dot{a}^2 и $a\ddot{a}$ выражения в исходное соотношение (1), находим

$$\frac{y' x P_{00}}{2\rho} + \frac{C}{B} \frac{y P_{00}}{\rho} = \frac{1}{B} (P_0 - A). \quad (2)$$

Равенство (2) запишем в виде уравнения

$$y' + 2N \frac{y}{x} = \frac{2\rho}{P_{00} B x} (P_0 - A), \quad (3)$$

где $N = C/B$.

Решая уравнение (3) методом вариации произвольной постоянной, получаем

$$y(x) = \frac{2\rho}{B} \frac{x^{-3m}}{2N - 3m} + \frac{\rho A}{B P_{00}} \frac{1}{N} + \frac{\Phi}{x^{2N}}, \quad (4)$$

где Φ — неизвестная постоянная.

Для того чтобы определить величину Φ , будем считать известным максимальный безразмерный радиус газовой полости x_1 , образующейся при камуфлетном взрыве (радиус полости в момент ее остановки):

$$x_1 = \left(\frac{a}{r_3} \right)_{\max} = \sqrt[3]{\frac{V_{\max}}{V_0}}$$

($V_0 = 4\pi r_3^3/3$ — объем полости (сферического заряда) в начальный момент времени; $V_{\max} = 4\pi a_{\max}^3/3$ — объем полости при камуфлетном взрыве по окончании ее расширения). Тогда для определения неизвестной Φ можно использовать условие прекращения расширения полости $y(x)|_{x=x_1} = 0$:

$$\frac{2\rho x_1^{-3m}}{B(2N - 3m)} - \frac{\rho A}{B P_{00} N} + \frac{\Phi}{x_1^{2N}} = 0.$$

Отсюда следует

$$\Phi = \frac{\rho A x_1^{2N}}{B P_{00} N} - \frac{2\rho x_1^{2N-3m}}{B(2N - 3m)}.$$

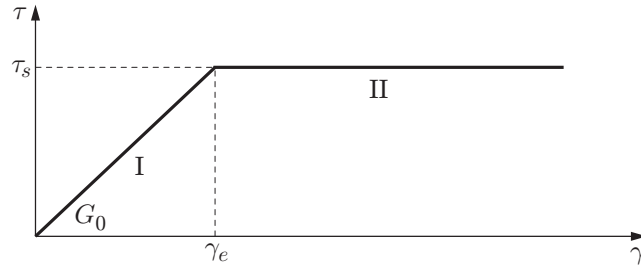


Диаграмма сдвига:

I — область упругости ($r > b$), II — область пластичности ($a < r < b$)

Окончательно выражение (4) для определения $y(x)$ принимает вид

$$y(x) = \frac{\rho A}{BP_0} \frac{1}{N} \left[\left(\frac{x_1}{x} \right)^{2N} - 1 \right] - \frac{2\rho}{B} \frac{x^{-3m}}{2N - 3m} \left[\left(\frac{x_1}{x} \right)^{2N-3m} - 1 \right]. \quad (5)$$

Для оценки радиуса полости x_1 используем закон сохранения энергии. Работа продуктов взрыва, расширяющихся по адиабатическому закону, описывается выражением [6, 8, 13, 14]

$$A_0 = \int_{V_0}^{V_{\max}} P dV = \frac{P_0 V_0}{m - 1} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_{\max}} \right)^{m-1} \right].$$

Для оценки энергии деформаций используем диаграмму связи касательных напряжений τ и деформации сдвига γ , приведенную на рисунке (τ_s — предел упругости, γ_e — предельная упругая деформация сдвига, G_0 — модуль упругости при сдвиге, a — радиус полости, b — радиус упругопластической области, r — радиальная координата) [8, 15].

В области упругого деформирования внешние силы уравниваются напряжением

$$\tau = G_0 \gamma,$$

где $G_0 = \text{const}$.

Элементарная работа частицы среды в области упругого деформирования $r > b$ представляется в виде

$$\tau d\gamma = G_0 \gamma d\gamma,$$

а потенциальная энергия деформации частицы среды при изменении деформации сдвига от нуля до γ определяется выражением

$$\int_0^{\gamma} G_0 \gamma d\gamma = \frac{1}{2} G_0 \gamma^2.$$

Потенциальная энергия деформаций сдвига во всей области Π_e упругого деформирования находится из равенства

$$\Pi_e = \int_b^{\infty} \frac{1}{2} G_0 \gamma^2 \cdot 4\pi r^2 dr. \quad (6)$$

Рассмотрим связи между тремя радиусами: радиусом заряда r_z , радиусом расширяющейся камуфлетной полости $a(t)$ и радиусом упругопластической области $b(t)$.

Пластическое деформирование среды происходит при достижении предельного значения γ_e деформации сдвига $\gamma(r, t)$, которое для материалов и грунтов изменяется в диапазоне $\gamma_e \approx 10^{-2} \div 10^{-4}$ [15, 16]. Определим связь между величиной перемещения $W(r, t)$ среды в точке r и радиусом полости $a(t)$ в произвольный момент времени t . Объем среды, вытесняемой камуфлетной полостью при ее расширении за время t , равен

$$V_1 = 4\pi a^3/3 - 4\pi r_3^3/3.$$

Объем среды, перемещающейся за это же время через поверхность сферы радиусом r , определяется зависимостью

$$V_2 = 4\pi(r + W)^3/3 - 4\pi r^3/3.$$

Из закона сохранения массы при условии несжимаемости среды следует

$$a^3 - r_3^3 = (r + W)^3 - r^3,$$

откуда при $x = a/r_3$ в окрестности границы упругопластической области (при $r \gg a$) получаем

$$W(r, t) \approx a^3(1 - x^{-3})/(3r^2), \quad (7)$$

и соответственно

$$\frac{\partial W}{\partial r} = -\frac{2a^3(1 - x^{-3})}{3r^3}. \quad (8)$$

Известно, что величина главного сдвига γ при постоянной плотности определяется соотношением [8, 16]

$$\gamma \approx \frac{W}{r} - \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{2}\left(\frac{W}{r}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)^2. \quad (9)$$

Подставляя в (9) вместо величин W и $\partial W/\partial r$ выражения (7) и (8), получаем

$$\gamma = \left(\frac{a}{r}\right)^3(1 - x^{-3}) \frac{1 + 0,5(a/r)^3(1 - x^{-3})}{(1 + (a/r)^3(1 - x^{-3}))^{4/3}} \approx \left(\frac{a}{r}\right)^3(1 - x^{-3}), \quad (10)$$

так как в области упругого деформирования $(a/r)^3(1 - x^{-3}) \ll 1$.

Из выражения (10) следует, что на границе упругопластической области ($r = b$ и $\gamma = \gamma_e$), связь между тремя указанными выше радиусами определяется формулой

$$\gamma_e = (a/b)^3(1 - x^{-3}). \quad (11)$$

С учетом (10), (11) выражение (6) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \Pi_e &= \int_b^\infty \frac{1}{2} G_0 \left(\frac{a}{r}\right)^6 (1 - x^{-3})^2 \cdot 4\pi r^2 dr = \frac{1}{2} G_0 a^6 (1 - x^{-3})^2 \cdot 4\pi \int_b^\infty \frac{1}{r^4} dr = \\ &= \frac{1}{2} G_0 \gamma_e (1 - x^{-3}) V_{\max} = \frac{1}{2} \tau_s V_{\max} (1 - x^{-3}). \end{aligned}$$

В упругопластической области $a < r < b$ потенциальная энергия деформации частицы среды запасена как в виде упругой деформации (так как каждая частица нагружена упруго до предела $\gamma = \gamma_e$), так и в виде пластических деформаций, т. е. равна

$$G_0 \gamma_e^2/2 + \tau_s(\gamma - \gamma_e) = \tau_s \gamma_e/2 + \tau_s \gamma - \tau_s \gamma_e = \tau_s \gamma - \tau_s \gamma_e/2.$$

Потенциальная энергия деформаций сдвига во всей упругопластической области Π_p находится из равенства

$$\begin{aligned}\Pi_p &= \int_a^b \left[\tau_s \left(\frac{a}{r} \right)^3 (1 - x^{-3}) - \frac{1}{2} \tau_s \gamma_e \right] \cdot 4\pi r^2 dr = \\ &= 4\pi \tau_s a^3 (1 - x^{-3}) \int_a^b \frac{1}{r} dr - 4\pi \tau_s \gamma_e \cdot \frac{1}{2} \int_a^b r^2 dr = \\ &= 4\pi \tau_s a^3 (1 - x^{-3}) \ln r \Big|_a^b - 4\pi \tau_s \gamma_e \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} r^3 \Big|_a^b = \\ &= \tau_s V_{\max} (1 - x^{-3}) \left\{ \ln \left(\frac{b}{a} \right)^3 - \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{a}{b} \right)^3 \right] \right\}.\end{aligned}$$

Так как $(a/b)^3 \ll 1$, то последнее выражение можно представить в виде

$$\Pi_p \approx \tau_s V_{\max} (1 - x^{-3}) [\ln(b/a)^3 - 1/2]. \quad (12)$$

Для того чтобы определить величину $\ln(b/a)^3$, используем закон сохранения массы в камуфлетной полости и в области упругопластического деформирования

$$\rho_0 (b^3 - r_3^3) = \rho (b^3 - a^3).$$

Отсюда следует

$$\frac{b^3}{a^3} = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} - \frac{\rho_0}{\rho - \rho_0} \frac{r_3^3}{a^3} = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} - \frac{\rho_0}{\rho - \rho_0} \frac{r_3^3}{a^3}. \quad (13)$$

Учитывая, что $r_3^3/a^3 \ll 1$ при $a \geq 2$, последним слагаемым в соотношении (13) можно пренебречь. Тогда

$$\frac{b^3}{a^3} = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} = \frac{1}{\beta}$$

и соотношение (12) принимает вид

$$\Pi_p \approx \tau_s V_{\max} (1 - x^{-3}) (\ln(1/\beta) - 1/2).$$

Приравнявая работу расширяющихся продуктов взрыва к сумме $\Pi_e + \Pi_p$, получаем

$$\begin{aligned}\frac{P_{00} V_0}{m-1} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_{\max}} \right)^{m-1} \right] &= \frac{1}{2} \tau_s V_{\max} (1 - x_1^{-3}) + \\ &+ \tau_s V_{\max} (1 - x_1^{-3}) \ln \frac{1}{\beta} - \frac{1}{2} \tau_s V_{\max} (1 - x_1^{-3}),\end{aligned}$$

откуда следует

$$\tau_s (1 - x_1^{-3}) \ln \frac{1}{\beta} = \frac{P_{00} V_0}{(m-1) V_{\max}} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_{\max}} \right)^{m-1} \right], \quad (14)$$

где $x_1 = (a_{\max}/r_3) = (V_{\max}/V_0)^{1/3} = (V_0/V_{\max})^{-1/3}$, т. е. $V_0/V_{\max} = x_1^{-3}$.

Выражая в (14) V_0/V_{\max} через x_1^{-3} , получаем уравнение относительно одной неизвестной величины x_1 , разрешив которое можно определить эту величину.

Таким образом, соотношение (5) и зависимость $\dot{a}^2 = y(x) P_{00}/\rho$ позволяют вычислить размерную скорость камуфлетной поверхности $\dot{a}(x)$.

Определив значение $\dot{a}(x)$, по формуле $u(r) = a^2 \dot{a}/r^2$ при заданном r можно вычислить значения скорости частиц на различных расстояниях от центра взрыва $u(r)$ в момент достижения значения радиуса камуфлетной полости, равного a .

Полученные результаты могут быть использованы для определения начальной скорости камуфлетной полости. Например, в расчетах с использованием зависимости (5) при значениях $P_{00} \approx 1,8 \cdot 10^4$ МПа, $m = 1,3$ для тротила [17] и при значении $x_1 = a_{\max}/r_3 \approx 6$, характерном для мягких грунтов ($\rho \approx 1830$ кг/м³), в начальный момент времени (при $x = 1$) получаем значение $y(x)|_{x=1} = 0,657$, откуда находим начальную скорость камуфлетной поверхности

$$V = \dot{a}|_{x=1} = \sqrt{\frac{P_{00}y(x)|_{x=1}}{\rho}} = \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^9 \cdot 0,657}{1830}} \approx 800 \text{ м/с.}$$

Заключение. В работе получено аналитическое решение центрально-симметричной задачи определения поля скоростей частиц сплошной среды при взрыве камуфлетного заряда в предположении о бесколебательном характере движения и несжимаемости среды в областях пластического и упругого деформирования.

В основу решения положено камуфлетное уравнение — соотношение, связывающее давление на контактной поверхности расширяющейся сферической полости с ее радиусом, скоростью и ускорением. Полученное решение позволяет оценивать размеры зон расширения, пластического деформирования среды и воздействие взрывных возмущений на объекты, находящиеся в непосредственной близости от центра взрыва. Результаты исследований могут быть использованы при выборе зон установки камуфлетных зарядов в грунтах и горных породах с целью недопущения потери несущей способности, повреждения или разрушения таких объектов.

Направлением дальнейших исследований является определение поля напряжений, возникающих в сплошных средах при камуфлетном взрыве, для оценки воздействия последнего на заглубленные объекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кутузов Б. Н.** Методы ведения взрывных работ. Ч. 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности. М.: Горная кн., 2011.
2. **Городниченко В. И.** Основы горного дела / В. И. Городниченко, А. П. Дмитриев. М.: Горная кн., 2008.
3. **Komashchenko V. I., Atrushkevich V. A., Kachurin N. M., Stas G. V.** The effectiveness of borehole charges in the destruction of rocks by explosion // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т. 11, № 2. С. 191–198.
4. **Селиванов В. В.** Взрывные технологии: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / В. В. Селиванов, И. Ф. Кобылкин, С. А. Новиков. М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2014.
5. **Горное дело:** Терминол. словарь. М.: Горная кн., 2016.
6. **Бовт А. Н.** Механическое действие камуфлетного взрыва / А. Н. Бовт, Е. Е. Ловецкий, В. И. Селяков, В. К. Сироткин, В. С. Фетисов, Е. А. Шурыгин. М.: Недра, 1990.
7. **Чедвик П.** Механика глубинных подземных взрывов / П. Чедвик, А. Кокс, Г. Гопкинс. М.: Мир, 1966.
8. **Физика взрыва:** В 2 т. Изд. 3-е, перераб. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.
9. **Чернуха Н. А.** Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD // Инж.-строит. журн. 2014. № 1. С. 12–22.

10. **Седнев В. А., Копнышев С. Л., Седнев А. В.** Оценка глубины проникания ударника с полусферической формой головной части в полубесконечную среду при внедрении по нормали к ее поверхности // Пробл. машиностроения и автоматизации. 2020. № 1. С. 158–164.
11. **Седнев В. А., Копнышев С. Л.** Модель поведения конструкционных материалов и грунтов при воздействии на них динамических нагрузок // Пробл. машиностроения и автоматизации. 2018. № 2. С. 82–87.
12. **Седнев В. А., Копнышев С. Л.** Теоретические основы обоснования требований к физической стойкости гидротехнических сооружений и других объектов энергетики при внешнем динамическом воздействии // Пробл. безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2018. № 6. С. 43–62.
13. **Седнев В. А., Копнышев С. Л.** Модель расширения сферической полости в упругопластической сплошной среде с учетом ее упрочнения // Пробл. машиностроения и автоматизации. 2018. № 4. С. 105–113.
14. **Sednev V. A., Kopynshev S. L., Sednev A. V.** Estimation of the penetration depth of an impactor with a hemispherical head part into a semi-infinite medium when penetrated along the normal to the surface // J. Machinery Manufacture Reliability. 2020. V. 49, N 8. P. 659–666.
15. **Ишлинский А. Ю., Зволинский Н. В., Степаненко Н. З.** К динамике грунтовых масс // Докл. АН СССР. 1954. Т. 95, № 4.
16. **Шемякин Е. И.** Расширение газовой полости в несжимаемой упругопластической среде. (К изучению действия взрыва на грунт) // ПМТФ. 1961. № 3. С. 91–99.
17. **Харланюк Л. Ф.** Динамика проникания и заглубленного взрыва / Л. Ф. Харланюк, С. Л. Копнышев. М.: Общевойсковая акад. Вооруж. Сил РФ, 2009.

*Поступила в редакцию 20/VI 2023 г.,
после доработки — 20/VI 2023 г.
Принята к публикации 26/VI 2023 г.*
