

Научная статья
УДК 614, 626/627

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДЕЙСТВИЯ КАМУФЛЕТНОГО ВЗРЫВА НА ОБЪЕКТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ

✉ **Седнев Владимир Анатольевич;**
Копнышев Сергей Львович;
Сергеенкова Надежда Александровна.
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
✉ sednev70@yandex.ru

Аннотация. В условиях глобальной социальной и экономической нестабильности проблема защищенности объектов инфраструктуры от актов незаконного вмешательства выдвигается в число приоритетных задач государства, укрепления его национальной безопасности. При этом наиболее эффективными разрушающими воздействиями на объекты оказываются динамические, связанные с заглубленными взрывными воздействиями.

Цель исследования – решение центрально-симметричной задачи определения граничных условий на газовой сфере, образующейся при камуфлетном взрыве заряда, в предположении о бесколебательном характере движения и несжимаемости среды, а также поля скоростей частиц среды, для оценки воздействия взрывных возмущений на объекты инфраструктуры и обоснования мероприятий по обеспечению устойчивости их функционирования.

Ключевые слова: безопасность, гидротехническое сооружение, защищенность, система физической защиты, устойчивость функционирования, управление

Для цитирования: Седнев В.А., Копнышев С.Л., Сергеенкова Н.А. Моделирование характеристик воздействия камуфлетного взрыва на объекты инфраструктуры // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 57–71.

Scientific article

MODELING OF THE CHARACTERISTICS OF THE IMPACT OF A CAMOUFLAGE EXPLOSION ON INFRASTRUCTURE FACILITIES

✉ **Sednev Vladimir A.;**
Kopnyshev Sergey L.;
Sergeenkova Nadezhda A.
Academy of State fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
✉ sednev70@yandex.ru

Abstract. In the context of global social and economic instability, the problems of protecting infrastructure facilities from acts of unlawful interference and strengthening national security are put forward among the priorities of the state. At the same time, the most effective destructive effects on objects are dynamic ones associated with buried explosive effects.

The purpose of the study is to solve the centrally symmetric problem of determining the boundary conditions on a gas sphere formed during a camouflage charge explosion, assuming the vibrationless nature of the movement and incompressibility of the medium, as well as the velocity field of the particles of the medium, to assess the impact of explosive disturbances on infrastructure facilities and justify measures to ensuring the stability of their functioning.

Keywords: security, hydraulic engineering structure, security, physical protection system, stability of functioning, management.

For citation: Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sergeenkova N.A. Modeling of the characteristics of the impact of a camouflage explosion on infrastructure facilities // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 2 (66). P. 57–71.

Введение. Обоснование исходных данных

Для оценки воздействия камуфлетного взрыва на окружающую среду и элементы гидротехнического сооружения необходимо рассмотреть центрально-симметричную задачу о полях скоростей и напряжений в средах, возникающих вследствие камуфлетного взрыва. Исследование предполагает рассмотрение камуфлетного взрыва обычного взрывчатого вещества (ВВ), под которым понимается взрыв, в результате которого до земной поверхности доходят только упругие волны деформации и не происходит образование воронки на земной поверхности.

Предполагается, что детонация заряда ВВ происходит в условиях сферической симметрии и представляет собой процесс, протекающий без изменения объема. Процесс взаимодействия продуктов взрыва с окружающей средой начинается с момента выхода детонационной волны на поверхность заряда.

Так как отраженные волны быстро выравнивают давление в образовавшейся сферической полости, считается, что продукты взрыва внутри этого объема находятся под действием одинакового давления. Механическое действие взрыва моделируется камуфлетным движением. Полезная работа продуктов взрыва совершается в фазе первичного расширения полости. Начально-краевые условия центрально-симметричной задачи определяются из результатов анализа взаимодействия продуктов взрыва с окружающей средой и нулевых значений бытовых давлений.

Отмеченные допущения, наряду с представлениями о кусочно-линейной аппроксимации диаграмм объемного сжатия и сдвига и о несжимаемости среды, позволяют исключить волновые эффекты и решить основное уравнение задачи (камуфлетное уравнение).

В общем виде процесс взаимодействия продуктов камуфлетного взрыва с окружающей средой (ОС) начинается с момента выхода детонационной волны на поверхность заряда, когда газообразными продуктами наносится резкий удар по окружающей среде, в результате которого 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 будет движение, а также одновременное деформирование и разрушение ОС.

При этом расширяющиеся продукты взрыва образуют вокруг себя зону сильно раздробленного, уплотненного и разогретого вещества, подобного сжимаемой жидкости, а энергия ударных волн необратимо теряется на немеханические формы (нагревание, ионизация, диссоциация, фазовые переходы). Размер этой «ближней» зоны взрыва [1–3] не превышает десяти радиусов заряда ВВ.

На расстояниях до 50 радиусов заряда начинают преобладать уменьшившиеся нагрузки и соответствующее им механическое действие взрыва.

Процессы, происходящие в ударной волне при ее дальнейшем распространении в ОС, определяются, с одной стороны, увеличением поверхности волны и, с другой, – спадом давления при достижении волнами разгрузки фронта ударной волны. Снижение интенсивности ударной волны приводит к вырождению ее в волну сжатия и, в конце концов, в упругую волну. Для расчетов параметров сейсмозрывных волн при их распространении в различных средах применяются как численные, так и аналитические методы [1–15]. Аналитические решения удается получать для простых физических моделей взрыва при кусочно-линейных аппроксимациях диаграммах объемного сжатия и сдвига.

В качестве физической модели процесса принимается модель расширения сферической полости в среде за счет давления продуктов взрыва сферического заряда ВВ, инициируемого в центре, с расширением продуктов взрыва в бесконечность. При описании результатов решений таких моделей, как правило, пользуются приведенным расстоянием \tilde{r} , под которым понимают отношение расстояния r от центра заряда ВВ к его определенному характеристическому размеру, например, радиусу сферического заряда ВВ:

$$r_3 \approx 0,053 \cdot \sqrt[3]{C_{эф}},$$

где $C_{эф}$ – приведенная к тротилу масса заряда ВВ в кг.

Подобная форма записи используется и при аппроксимации экспериментальных результатов выражением [1, 3]:

$$P = K \cdot A \left(\frac{r}{\sqrt[3]{C}} \right)^{-n},$$

где P – максимальное давление во фронте ударной волны; A и n – коэффициенты, характеризующие свойства среды; K – коэффициент влияния глубины заложения заряда ВВ.

Соотношение дает возможность свести взрывы боеприпасов различных калибров к единой оценке.

Граничные условия на газовой сфере, образующейся при управлении воздействием камуфлетного взрыва

Для оценки величины начального давления на камуфлетной газовой сфере и описания процесса ее расширения необходимо знание уравнения состояния продуктов детонации (ПД) ВВ при их адиабатическом расширении в широком диапазоне давлений (до ~ 100 ГПа). В настоящее время предложено большое количество таких уравнений, полученных как с учетом химического состава смесевых компонентов ПД, так и без его учета [1].

При камуфлетном взрыве после выхода детонационной волны на границу заряда ВВ волны разрежения успевают многократно пройти сквозь камуфлетную полость, выравнивая в ней давление прежде, чем значительно изменяется объем камуфлетной полости.

Это дает основание рассматривать задачу определения граничных условий в безволновой постановке и использовать уравнение состояния ПД конденсированных ВВ в виде двух адиабат [3, 4]:

$$P = \begin{cases} P_{00} \cdot \left(\frac{a}{r_3} \right)^{-3l} & \text{при } 1 \leq \frac{a}{r_3} \leq \frac{a^*}{r_3}, \\ P_{00} \cdot \left(\frac{a^*}{r_3} \right)^{-3l} \left(\frac{a}{a^*} \right)^{-3m} & \text{при } \frac{a}{r_3} \geq \frac{a^*}{r_3}, \end{cases}$$

где P_{00} – давление в полости в начальный момент после взрыва; r_3 – радиус заряда (начальный радиус камуфлетной полости); a и a^* – текущий радиус и радиус камуфлетной полости в точке сопряжения адиабат ($a^* = 1,53 \cdot r_3$); $l=3$ и $m=1,2 \dots 1,4$ – степенные показатели.

Переходя к определению величины начальной скорости камуфлетной поверхности, будем считать, что экспериментально определен максимальный безразмерный радиус газовой полости x_l , образующейся при камуфлетном взрыве (радиус полости в момент ее остановки):

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

где V_0 – объем полости (сферического заряда) в начальный момент; $V_0 = \frac{4}{3}\pi r_3^3$; V_{\max} – объем полости при камуфлетном взрыве, наблюдаемый по окончании ее расширения; $V_{\max} = \frac{4}{3}\pi a^3$.

Работа продуктов взрыва, расширяющихся по адиабатическому закону, описывается выражением [2, 15]:

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

Для оценки энергии деформаций связь между касательным напряжением τ и деформацией сдвига γ примем в виде, показанном на рис. 1.

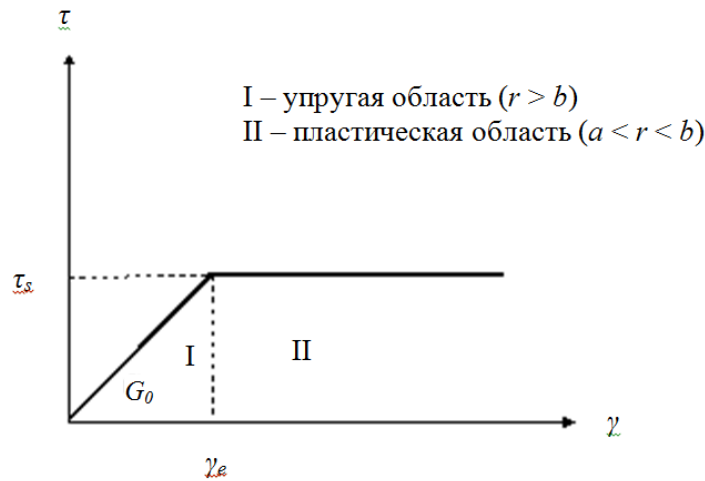


Рис. 1. Диаграмма сдвига, где: τ_s – предел упругости; γ_e – предельное упругое значение деформации сдвига; G_0 – модуль упругости при сдвиге; a – радиус полости; b – радиус упругопластической области; r – радиальная координата

В упругой области действие внешних сил уравновешивается напряжением:

$$\tau = G_0 \cdot \gamma,$$

где $G_0 = const$.

Элементарная работа частицы среды в упругой области $r > b$ представляется в виде:

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

а потенциальная энергия деформации частицы среды при изменении деформации сдвига от 0 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 упругой области Π_e находится из равенства:

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

Рассмотрим связи между тремя радиусами: заряда r_3 , расширяющейся камуфлетной полости $a(t)$ и упругопластической границы $b(t)$.

Пластическое деформирование среды наступает при достижении деформацией сдвига $\gamma(r,t)$ предельного упругого значения γ_e , величина которого для материалов и грунтов изменяется в диапазоне $\gamma_e \approx 10^{-2} \dots 10^{-4}$ [14]. Свяжем величину перемещения $W(r,t)$ среды в точке r с радиусом полости $a(t)$ в произвольный момент времени t . Объем вытесняемой среды камуфлетной полостью при ее расширении за время t составит:

$$V_1 = \frac{4}{3} \pi \cdot a^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot r_3^3.$$

За это же время объем перемещаемой среды через поверхность сферы с радиусом r будет определяться зависимостью:

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi (r+W)^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot r^3.$$

Из закона сохранения массы при условии несжимаемости среды следует, что:

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

откуда $(r+W)^3 = a^3 + r^3 - r_3^3$, а при обозначении:

$$x = \frac{a}{r_3}$$

последнее соотношение переписывается как:

$$(W+r)^3 = r^3 + a^3(1-x^{-3}).$$

Раскрывая левую часть последнего равенства, получаем:

$$W^3 + 3W^2r + 3Wr^2 + r^3 = r^3 + a^3(1-x^{-3}) \text{ или}$$

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

При $r \gg a$, что имеет место в окрестности упругопластической границы, величины W и $\frac{W}{r}$ имеют разные порядки ($W \gg \frac{W}{r}$), поэтому, пренебрегая первыми двумя слагаемыми соотношения (2), получим:

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

и, соответственно,

$$\frac{\partial W}{\partial r} = -\frac{2a^3(1-x^{-3})}{3r^3}. \quad (4)$$

Величина главного сдвига γ при постоянстве плотности определяется соотношением [3]:

$$\gamma \approx \frac{W}{r} - \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{r} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial r} \right)^2. \quad (5)$$

Заменяя в формуле (5) W и $\frac{\partial W}{\partial r}$ их выражениями из (3) и (4), получаем:

$$\gamma = \left(\frac{a}{r} \right)^3 (1-x^{-3}) \frac{1 + 0,5 \left(\frac{a}{r} \right)^3 (1-x^{-3})}{\left(1 + \left(\frac{a}{r} \right)^3 (1-x^{-3}) \right)^{4/3}} \approx \left(\frac{a}{r} \right)^3 (1-x^{-3}), \quad (6)$$

так как в упругой области $\left(\frac{a}{r} \right)^3 (1-x^{-3}) \ll 1$.

Из выражения следует, что на упругопластической границе ($r=b$ и $\gamma = \gamma_e$) связь между тремя радиусами определится формулой:

$$\gamma_e = \left(\frac{a}{b} \right)^3 (1-x^{-3}). \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) выражение (1) преобразуется к виду:

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

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

$$\frac{1}{2} G_0 \gamma_e^2 + \tau_s (\gamma - \gamma_e) = \frac{1}{2} \tau_s \gamma_e + \tau_s \gamma - \tau_s \gamma_e = \tau_s \gamma - \frac{1}{2} \tau_s \gamma_e.$$

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

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

Так как $\left(\frac{a}{b} \right)^3 \ll 1$, то последнее выражение можно представить в виде:

$$\Pi_p \approx \tau_s V_{\max} (1-x^{-3}) \cdot \left[\ln \left(\frac{b}{a} \right) - \frac{1}{2} \right].$$

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

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

откуда:
$$\tau_s (1-x_1^{-3}) \ln \left(\frac{b}{a} \right) = \frac{P_{00} V_0}{(m-1) V_{\max}} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_{\max}} \right)^{m-1} \right], \quad (8)$$

где $x_1 = \left(\frac{a_{\max}}{r_3} \right) = \left(\frac{V_{\max}}{V_0} \right)^{1/3} = \left(\frac{V_0}{V_{\max}} \right)^{-1/3}$.

Для определения зависимости функции $y = \frac{\rho \dot{a}^2}{P_{00}}$ от $x = \frac{a}{r_3}$ воспользуемся результатами работы [15]:

$$\frac{y(x)}{2} = \Phi x^{-3} - \frac{1}{3m-3} x^{-3m} - \frac{4A' \tau_s}{9P_{00}}, \quad (9)$$

полученном на основании показанной на рис. 1 диаграммы сдвига при постоянной плотности $\rho = \rho_0$. В формуле (9) приняты обозначения:

$$\Phi = \frac{\tilde{V}^2}{2} + \frac{1}{3m-3} + \frac{4A'\tau_s}{9P_{00}}, \quad (10)$$

$$A' = \ln \frac{1}{\gamma_e} + 1,$$

$$\tilde{V}^2 = y|_{x=1}, \quad \tilde{V} = const.$$

Так как в выражении для A' главным будет логарифмический член, а в формуле (7) для γ_e величина $(a/b)^3$, то соотношение (8) представим в виде:

$$\tau_s (1 - x_1^{-3}) A' = \frac{1}{m-1} x_1^{-3} \cdot P_{00} (1 - x_1^{-3(m-1)}),$$

или

$$\frac{A'\tau_s}{P_{00}} = \frac{(1 - x_1^{-3(m-1)})x_1^{-3}}{(m-1)(1 - x_1^{-3})} = \frac{(1 - x_1^{-3(m-1)})}{(m-1)(x_1^3 - 1)}.$$

После того, как величина $\frac{A'\tau_s}{P_{00}} = \frac{A'\sigma_s}{2P_{00}}$ определена, можно найти величину Φ в формуле (9), так как в момент остановки полости $y(x_1) = 0$, следовательно:

$$\Phi x_1^{-3} - \frac{1}{3m-3} x_1^{-3m} - \frac{4}{9} \cdot \frac{(1 - x_1^{-3(m-1)})}{(m-1)(x_1^3 - 1)} = 0,$$

или

$$9(m-1)(1 - x_1^{-3}) \cdot \Phi = 3(x_1^{-3(m-1)} - x_1^{-3m}) + 4 - 4x_1^{-3(m-1)} = 4 - x_1^{-3(m-1)} - 3x_1^{-3m},$$

откуда:

$$\Phi = \frac{4 - x_1^{-3(m-1)} - 3x_1^{-3m}}{9(m-1)(1 - x_1^{-3})}.$$

Найденное для Φ выражение подставим в формулу (10):

$$\frac{4 - x_1^{-3(m-1)} - 3x_1^{-3m}}{9(m-1)(1 - x_1^{-3})} = \frac{\tilde{V}^2}{2} + \frac{1}{3m-3} + \frac{4A'\tau_s}{9P_{00}},$$

откуда:

$$\tilde{V}^2 = \frac{2(4 - x_1^{-3(m-1)} - 3x_1^{-3m})}{9(m-1)(1 - x_1^{-3})} - \frac{2}{3m-3} + \frac{8}{9} \frac{(1 - x_1^{-3(m-1)})}{(m-1)(x_1^3 - 1)}.$$

Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы в качестве начальных условий при расчете действия камуфлетного взрыва в пористых грунтах и твердых средах. Так, например, задавая значения $P_{00} \approx 1,8 \cdot 10^4$ МПа, $a^* \approx 1,7r_s$ и $m=1,3$ для тротила [1], при $x_1 = \left(\frac{a}{r_s}\right) \approx 6$, характерного для мягких грунтов ($\rho \approx 1830 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$), получим

$$\tilde{V}^2 = \frac{8}{9}(1 - 6^{-0,75}) \approx 0,657 \text{ и начальную скорость камуфлетной поверхности:}$$

$$\dot{a}_{x=1} = \sqrt{\frac{P_{00} \tilde{V}^2}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1...1,5) \cdot 10^9 \cdot 0,657}{1830}} \approx (599...734) \text{ м/с}.$$

Определение характеристик взрывных возмущений среды при управлении воздействием камуфлетного взрыва

Предположим, что в безграничное полупространство помещен глубинный сферический заряд радиуса 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 $t=0$ начинается снижение давления в сферической полости и одновременное увеличение ее радиуса $a(t)$ от начального значения, равного радиусу заряда $a(0) = r_3$.

Второй характеристикой геометрического положения точек возмущенной окружающей среды в сферических координатах является радиус упругопластической границы $b(t)$, который при разработке волновой теории действия взрыва называют радиусом «фронта» пластической волны. Предполагается, что давление в полости уменьшается в соответствии с уравнением [1, 3]:

$$P_0 = P_{00} \left(\frac{a}{r_3} \right)^{-3m}, \quad (11)$$

а его связь при $t > 0$ с противодействием окружающей среды определяется камуфлетным уравнением:

$$P_0 = A + B a \ddot{a} + C \dot{a}^2, \quad (12)$$

где P_{00} и m – постоянные, а A , B и C – константы упругопластической модели среды [4].

Схема распространения границы между упругой и пластической областями при расширении камуфлетной полости показана на рис. 2.

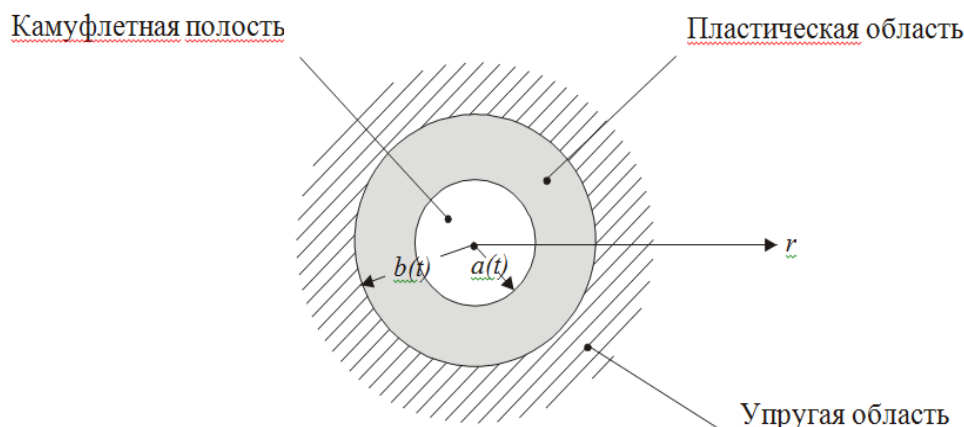


Рис. 2. Схема распространения пластической границы (r – радиальное расстояние от центра заряда ВВ)

Переход на границе из упругого состояния среды в пластическое происходит при достижении деформацией сдвига γ предельного упругого значения γ_e . Краевыми условиями на стенке полости при $r=a(t)$ и на упругопластической границе при $r=b(t)$ являются:

$$\dot{a} = u_{(r=a)} \dot{\epsilon} \quad P_0 = -\sigma_{r(r=a)},$$

$$\sigma_r^{(y)}|_{r \rightarrow \infty} = 0,$$

где $u(r,t)$ – направленная по радиусу из центра полости скорость частиц среды; $\sigma_r^{(n)}$ и $\sigma_r^{(y)}$ – радиальные напряжения.

Индексами (y) и (n) обозначаются величины, относящиеся к упругой и пластической областям деформаций; точка над переменной обозначает дифференцирование последней по времени. Требуется найти зависимости, необходимые для вычисления скорости расширения камуфлетной поверхности \dot{a} . Найденные зависимости позволят оценить размеры зон разрушения и пластического деформирования среды на различных расстояниях от центра взрыва.

Предлагаемое решение центрально-симметричной задачи о распространении взрывных возмущений в материалах и пористых грунтах основывается на продолжении решения для детонационной волны после достижения ею поверхности заряда и использует схему бесколебательного движения, согласно которой условия в камуфлетной полости связываются на ее границе с условиями в упругопластической среде.

При этом предполагается, что среда в упругой и пластической областях несжимаема, то есть эффектами распространения волн пренебрегаем. Это предположение дает возможность исследовать поля напряжений и скоростей аналитическим методом. Для определения функции \dot{a} исходное уравнение (12) представим в виде:

$$a\ddot{a} + \frac{C}{B}\dot{a}^2 = \frac{1}{B}(P_0 - A) \quad (13)$$

и введем безразмерные переменные:

$$y = \frac{\rho\dot{a}^2}{P_{00}} \quad \text{или} \quad \dot{a}^2 = \frac{yP_{00}}{\rho}, \quad x = \frac{a}{r_3},$$

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

Продифференцируем переменные по времени и радиальной координате:

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

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

$$y' = \frac{2\rho\dot{a}\ddot{a}}{P_{00}} \frac{dt}{dx} = \frac{2\rho\dot{a}\ddot{a}}{P_{00}} \cdot \frac{r_3}{\dot{a}} \cdot \frac{a}{a} = \frac{2\rho}{P_{00}x} a\ddot{a}, \quad \text{откуда} \quad a\ddot{a} = \frac{y'xP_{00}}{2\rho}.$$

Подставляя полученные для \dot{a}^2 и $a\ddot{a}$ выражения в исходное соотношение (13), получаем:

$$\frac{y'xP_{00}}{2\rho} + \frac{C}{B} \cdot \frac{yP_{00}}{\rho} = \frac{1}{B}(P_0 - A). \quad (14)$$

Равенство (14) запишем в виде уравнения:

$$y' + 2N \frac{y}{x} = \frac{2\rho}{P_{00}Bx} (P_0 - A), \quad (15)$$

Где
$$N = \frac{C}{B}.$$

Уравнение (15) будет основным в поставленной задаче. Для его решения найдем такую функцию $y(x)$, которая является решением однородного дифференциального уравнения:

$$\frac{dy}{dx} + 2N \frac{y}{x} = 0. \quad (16)$$

После разделения переменных, интегрирования и потенцирования получим:

$$y = y_{const} \cdot x^{-2N}. \quad (17)$$

Решение уравнения (15) будем искать в виде $y(x) = y_{const}(x) \cdot x^{-2N}$, считая $y_{const}(x)$ функцией аргумента x .

Соотношение (17) продифференцируем по x :

$$y' = y'_{const} \cdot x^{-2N} + y_{const} (-2N \cdot x^{-2N-1}) = y'_{const} x^{-2N} - y_{const} \cdot 2Nx^{-2N-1} \quad (18)$$

и, подставив (17) и (18) в (16), получим:

$$y'_{const} x^{-2N} - y_{const} 2Nx^{-2N-1} + 2N \frac{y_{const} x^{-2N}}{x} = \frac{2\rho}{P_{00}Bx} (P_0 - A),$$

откуда:

$$y'_{const} = \frac{2\rho}{x^{-2N+1}B} \left(\frac{P_0}{P_{00}} - \frac{A}{P_{00}} \right).$$

Для определения постоянного $y_{const}(x)$ подставим в полученное решение начальное условие (11). Это дает:

$$\begin{aligned} y'_{const} &= \frac{2\rho}{x^{-2N+1}B} \left(\frac{a^{-3m}}{r_3^{-3m}} - \frac{A}{P_{00}} \right) = \frac{2\rho}{x^{-2N+1}B} \left(x^{-3m} - \frac{A}{P_{00}} \right) = \\ &= \frac{2\rho}{B} x^{2N-3m-1} - \frac{2\rho A}{BP_{00}} x^{2N-1}. \end{aligned}$$

Соответствующую последнему равенству величину y_{const} находим интегрированием:

$$y_{const} = \frac{2\rho}{B} \int x^{2N-3m-1} dx - \frac{2\rho A}{BP_{00}} \int x^{2N-1} dx = \frac{2\rho}{B} x^{2N} \left[\frac{x^{-3m}}{2N-3m} - \frac{A}{2NP_{00}} \right] + \Phi,$$

где Φ – некоторая постоянная.

Окончательно решение (17) запишется в виде:

$$y = y_{const} \cdot x^{-2N} = \frac{2\rho}{B} \cdot \left[\frac{x^{-3m}}{2N-3m} - \frac{A}{2NP_{00}} \right] + \frac{\Phi}{x^{2N}}. \quad (19)$$

Постоянную интегрирования Φ определим из дополнительного условия задачи $y|_{x=1} = V^2$:

$$V^2 = \frac{2\rho}{B} \left(\frac{1}{2N-3m} - \frac{A}{2NP_{00}} \right) + \Phi,$$

откуда:
$$\Phi = V^2 - \frac{2\rho}{B} \left(\frac{1}{2N-3m} - \frac{A}{2NP_{00}} \right). \quad (20)$$

Зависимости (19), (20) и соотношение $\dot{a}^2 = \frac{y(x)P_{00}}{\rho}$ позволяют вычислять значения размерной скорости камуфлетной поверхности $\dot{a}(x)$ при любом значении приведенного расстояния x . После того, как $\dot{a}(x)$ определено, по формуле $u(b) = \frac{a^2 \cdot \dot{a}}{b^2}$ при заданном отношении $\frac{a}{b}$ вычисляются значения скорости частиц на различных расстояниях от центра взрыва $u(b)$. Результаты расчетов по определению скорости движения частиц среды в зависимости от приведенного расстояния до центра взрыва при $x=1$ приведены на рис. 3.

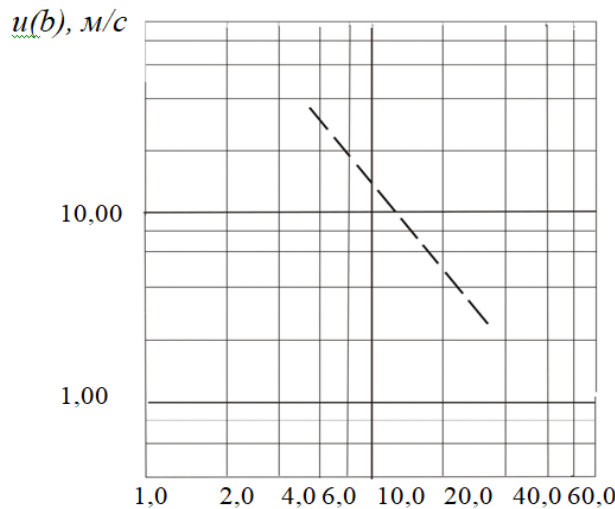


Рис. 3. Скорость движения частиц среды в зависимости от приведенного расстояния до центра взрыва: расчет по теоретической зависимости (60) при $\rho_0=1\ 830\ \text{кг/м}^3$; $\rho=1,01\rho_0$; $E_0=150\ \text{МПа}$; $m=1,25$; $E=0,1E_0$; $\sigma_s=0,4\ \text{МПа}$; $P_{00}=0,12 \cdot 10^4\ \text{МПа}$

Таким образом, в предположении о бесколебательном характере движения и несжимаемости среды в пластической и упругой областях получено решение центрально-симметричной задачи определения поля скоростей в сплошной упругопластической среде при камуфлетном взрыве, позволяющее оценивать размеры зон расширения, пластического деформирования среды, воздействия взрывных возмущений на объекты инфраструктуры и обосновывать мероприятия по обеспечению устойчивости их функционирования.

Выводы

1. Показано, что в основу решения задачи определения поля скоростей в сплошной среде при камуфлетном взрыве и обоснования мероприятий по обеспечению устойчивости функционирования объектов инфраструктуры может быть положено камуфлетное уравнение – соотношение для определения давления на контактной поверхности расширяющейся сферической полости.

2. Получена зависимость для определения поля скоростей частиц сплошной среды при взрыве камуфлетного заряда.

3. Показано, что неизвестная константа, входящая в полученное соотношение, может быть определена из условия сохранения энергии, выделившейся при взрыве, во всей упругопластической области движения окружающей заряд среды.

Список источников

1. Физика взрыва: в 2-х т. / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. М., Физматлит, 2002. Т. 1. 832 с.; Т. 2. М., Физматлит, 2002. 656 с.

2. Механическое действие камуфлетного взрыва / А.Н. Бовт [и др.]. М.: Недра, 1990. 184 с.

3. Чедвик П., Кокс А., Гопкинс Г. Механика глубинных подземных взрывов: пер. с англ. М.: Мир, 1966. 127 с.

4. Седнев В.А., Копнышев С.Л. Теоретические основы оценки физической стойкости гидротехнических сооружений к воздействию ударных динамических нагрузок: монография. М., 2021. 155 с. EDN ADQHFI.

5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Системные исследования чрезвычайных ситуаций: монография / под ред. Н.А. Махутова. М.: МГОФ «Знание», 2015. 864 с. EDN VOQBRF.

6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности: монография / под ред. Н.А. Махутова. М.: МГОФ «Знание», 2015. 936 с. EDN UFPJBT.

7. Безопасность России. Безопасность и защищенность критически важных объектов. Часть 1. Научные основы безопасности и защищенности критически важных для национальной безопасности объектов / Н.А. Махутов [и др.]. М.: МГОФ «Знание», 2012. 896 с.

8. Седнев Ал.В. Защита коммерческой информации как составляющая обеспечения безопасности государства // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2023. № 1.

9. Седнев Ан.В. Защита информации как составляющая обеспечения безопасности государства // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. № 6. С. 114–119. DOI: 10.36535/0869-4176-2019-06-13. EDN TIOQGI.

10. 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 // Journal of machinery manufacture and reliability. 2020. Vol. 49. № 8. P. 659–666. DOI: 10.3103/S1052618820080130.

11. Седнев В.А., Копнышев С.Л., Седнев А.В. Исследование этапов процесса и обоснование математической модели расширения сферической полости в грунтах и горных породах // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 2 (44). С. 302–314. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-302-314. EDN: IJPROE.

12. Седнев В.А., Седнев А.В., Седнев Ал.В. Применение стохастических методов в математическом моделировании действий и при обосновании решений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2022. № 5. С. 45–60. DOI: 10.36535/0869-4176-2022-05-4. EDN PVQVAH.

13. Седнев В.А., Седнев Ал.В. Моделирование организации работ по оборудованию сборного пункта поврежденных машин // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2022. № 3. С. 110–118. EDN PVHMQW.

14. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.

15. Ишлинский А.Ю., Зволинский Н.В., Степаненко Н.З. К динамике грунтовых масс // ДАН СССР. 1954. Т. 95. № 4.

References

1. Fizika vzryva: v 2-h t. / pod red. L.P. Orlenko. 3-e izd., pererab. M., Fizmatlit, 2002. T. 1. 832 s.; T. 2. M., Fizmatlit, 2002. 656 s.

2. Mekhanicheskoe dejstvie kamufletnogo vzryva / A.N. Bovt [i dr.]. M.: Nedra, 1990. 184 s.

3. Chedvik P., Koks A., Gopkins G. Mekhanika glubinyh podzemnyh vzryvov: per. s angl. M.: Mir, 1966. 127 s.

4. Sednev V.A., Kopnyshev S.L. Teoreticheskie osnovy ocenki fizicheskoj stojkosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij k vozdejstviyu udarnyh dinamicheskikh nagruzok: monografiya. M., 2021. 155 c. EDN ADQHFI.

5. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Sistemnye issledovaniya chrezvychajnyh situacij: monografiya / pod red. N.A. Mahutova. M.: MGOF «Znanie», 2015. 864 s. EDN VOQBRF.

6. Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Nauchnye osnovy tekhnogennoj bezopasnosti: monografiya / pod red. N.A. Mahutova. M.: MGOF «Znanie», 2015. 936 s. EDN UFPJBT.

7. Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' i zashchishchennost' kriticheski vaznyh ob"ektov. Chast' 1. Nauchnye osnovy bezopasnosti i zashchishchennosti kriticheski vaznyh dlya nacional'noj bezopasnosti ob"ektov / N.A. Mahutov [i dr.]. M.: MGOF «Znanie», 2012. 896 s.

8. Sednev Al.V. Zashchita kommercheskoj informacii kak sostavlyayushchaya obespecheniya bezopasnosti gosudarstva // Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2023. № 1.

9. Sednev An.V. Zashchita informacii kak sostavlyayushchaya obespecheniya bezopasnosti gosudarstva // Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2019. № 6. S. 114–119. DOI: 10.36535/0869-4176-2019-06-13. EDN TIOQGI.

10. Sednev V.A., Kopnyshev 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 // Journal of machinery manufacture and reliability. 2020. Vol. 49. № 8. P. 659–666. DOI: 10.3103/S1052618820080130.

11. Sednev V.A., Kopnyshev S.L., Sednev A.V. Issledovanie etapov processa i obosnovanie matematicheskoy modeli rasshireniya sfericheskoy polosti v gruntah i gornyh porodah // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij. 2020. T. 12. № 2 (44). S. 302–314. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-2-302-314. EDN IJROE.

12. Sednev V.A., Sednev A.V., Sednev Al.V. Primenenie stohasticheskikh metodov v matematicheskom modelirovanii dejstvij i pri obosnovanii reshenij // Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2022. № 5. С. 45–60. DOI: 10.36535/0869-4176-2022-05-4. EDN PVQVAH.

13. Sednev V.A., Sednev Al.V. Modelirovanie organizacii rabot po oborudovaniyu sbornogo punkta povrezhdennyh mashin // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2022. № 3. S. 110–118. EDN PVHMQW.

14. Samul' V.I. Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. M.: Vysshaya shkola, 1982. 264 s.

15. Ishlinskij A.Yu., Zvolinskij N.V., Stepanenko N.Z. K dinamike gruntovyh mass // DAN SSSR. 1954. T. 95. № 4.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 31.01.2023; одобрена после рецензирования: 21.03.2023;
принята к публикации: 24.03.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 31.01.2023; approved after review: 21.03.2023;
accepted for publication: 24.03.2023

Сведения об авторах:

Седнев Владимир Анатольевич, профессор кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, почетный работник науки и техники Российской Федерации, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования, e-mail: sednev70@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4922-430X>

Копнышев Сергей Львович, доцент кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: serkopn@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8071-0444>

Сергеенкова Надежда Александровна, доцент кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), кандидат технических наук, e-mail: sergeenkova.n.a@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7753-323X>

Information about authors:

Sednev Vladimir A., professor of the department of population and territory protection of the Academy of the State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin st., 4), doctor of technical sciences, professor, honored worker of the higher school of the Russian Federation, honored worker of science and technology of the Russian Federation, laureate of the prize of the government of the Russian Federation in the region of science and technology, laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the field of education, e-mail: sednev70@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4922-430X>

Kopnyshev Sergey L., docent of the department of population and territory protection of the Academy of the State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin st., 4), candidate of technical sciences, senior researcher, e-mail: serkopn@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8071-0444>

Sergeenkova Nadezhda A., docent of the department of population and territory protection of the Academy of the State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin st., 4), candidate of technical sciences, e-mail: sergeenkova.n.a@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7753-323X>