УДК 539.3 DOI: 10.36535/0869-4176-2020-01-9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСШИРЕНИЯ КАМУФЛЕТНОЙ ПОЛОСТИ В ПЛОТНОЙ СРЕДЕ ЗА СЧЕТ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Доктор техн. наук *В.А. Седнев*, кандидат техн. наук *С.Л. Копнышев*
ФГБОУ ВО «Академия государственной противопожарной службы МЧС России»

Рассматривается задача об определении поля скоростей в плотной среде при расширении сферической полости за счет внутреннего давления. Для решения поставленной задачи используется полученное авторами камуфлетное уравнение, учитывающее характеристики окружающей полость сплошной среды. Применение камуфлетного уравнения позволяет обосновать предложения по повышению физической стойкости объектов инфраструктуры к воздействию обычных средств поражения.

Ключевые слова: среда, камуфлетная полость, расширение, поле скоростей, объект инфраструктуры, воздействие обычных средств поражения, защищенность.

DETERMINATION OF THE CAMOUFLAGE CAVITY EXPANSION VELOCITY IN A DENSE MEDIUM DUE TO INTERNAL PRESSURE

Doctor (Tech.) *V.A. Sednev*, Ph.D (Tech.) *S.L. Kopnyshev*
Federal state budgetary educational institution of higher education
«Academy of the state fire-fighting service of EMERCOM of Russia»

The problem of determining the velocity field in a dense medium with the expansion of a spherical cavity due to internal pressure is considered. To solve this problem, the authors use the camouflage equation that takes into account the characteristics of the surrounding cavity of the continuous medium. The use of camouflage equation allows to justify proposals to increase the physical stability of infrastructure to the impact of conventional weapons.

Keywords: medium, camouflage cavity, expansion, velocity field, infrastructure object, impact of conventional weapon, security.

Обычные средства поражения являются достаточно эффективными для поражения различных видов объектов, что требует выполнения комплекса мероприятий по повышению их защищенности. При этом основными поражающими факторами будут местное ударно-пробивное действие поражающих элементов, а также бризантное и фугасное действия взрыва. Для оценки таких воздействий на объекты инфраструктуры важное значение имеет оценка поля скоростей в твердой среде при камуфлетных взрывах.

Камуфлетное взрывание - взрывание заглубленных зарядов взрывчатого вещества, не вызывающее разрушения среды на её поверхности. Камуфлетные взрывы применяются для ускорения процесса создания емкостей в отложениях каменной соли, для дробления полезных ископаемых, для образования подземных полостей в качестве хранилищ жидких и газообразных веществ и других целей.

Предлагаемое решение центрально-симметричной задачи о распространении взрывных возмущений в твердых средах основывается на предположении, что в безграничное полупространство помещен глубинный сферический заряд радиуса $r_з$, 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 $a(0)=r_3$. Текущий радиус камуфлетной полости $a(t)$ является первой характеристикой геометрического положения точек возмущенной окружающей среды в сферических координатах. Второй характеристикой 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 [1,2]

$$P_0 = P_{00}\left(\frac{a}{r_з}\right)^{-3m}, \tag{1}$$

где *m* – степенной показатель,
а связь давления при *t >0* с противодействием окружающей среды определяется камуфлетным уравнением [3]

$$P_0 = A + Ba\ddot{a} + C\dot{a}^2, \tag{2}$$

где *A*, *B* и *C* – константы, являющиеся характеристиками среды.

Представим (2) в виде

$$a\ddot{a} + \frac{C}{B}\dot{a}^2 = \frac{1}{B}\left(P_0 - A\right) \tag{3}$$

и введем безразмерные переменные

$$y = \frac{\rho\dot{a}^2}{P_{00}} \quad \text{или} \quad \dot{a}^2 = \frac{yP_{00}}{\rho}, \quad x = \frac{a}{r_з}, \tag{4}$$

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

Продифференцируем переменные по времени и радиальной координате

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\dot{a}}{r_3}, \qquad \frac{dy}{dt} = \frac{2\rho\dot{a}\ddot{a}}{P_{00}} \qquad \text{и} \qquad y' = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt}\cdot\frac{dt}{dx}. \tag{5}$$

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

$$y' = \frac{2\rho\dot{a}\ddot{a}}{P_{00}}\frac{dt}{dx} = \frac{2\rho\dot{a}\ddot{a}}{P_{00}}\cdot\frac{r_з}{\dot{a}}\cdot\frac{a}{a} = \frac{2\rho}{P_{00}x}a\ddot{a}, \quad \text{откуда} \quad a\ddot{a} = \frac{y'xP_{00}}{2\rho}. \tag{6}$$

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

$$\frac{y'xP_{00}}{2\rho}+\frac{C}{B}\cdot\frac{yP_{00}}{\rho}=\frac{1}{B}\left(P_0-A\right). \tag{7}$$

Равенство (7) запишем в виде уравнения

$$y'+2N\frac{y}{x}=\frac{2\rho}{P_{00}Bx}\left(P_0-A\right), \tag{8}$$

где

$$N=\frac{C}{B}. \tag{9}$$

Уравнение (8) будет основным в поставленной задаче. Для его решения найдем такую функцию $y(x)$, которая является решением однородного дифференциального уравнения

$$\frac{dy}{dx}+2N\frac{y}{x}=0. \tag{10}$$

После разделения переменных получим

$$\frac{dy}{y}=-2N\frac{dx}{x} ,$$

отсюда

$$\int\frac{dy}{y}=-2N\int\frac{dx}{x} , \quad \text{или} \quad \ln y=-2N\ln x+y_{const}.$$

После потенцирования имеем

$$y=y_{const}\cdot x^{-2N}. \tag{11}$$

Далее решение уравнения (8) будем искать в виде

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

считая y_{const} функцией аргумента *x*.

Соотношение (11) продифференцируем по *x*

$$y'=y'_{const}\cdot x^{-2N}+y_{const}\left(-2N\cdot x^{-2N-1}\right)=y'_{\mathrm{const}}x^{-2N}-y_{const}\cdot 2Nx^{-2N-1}. \tag{12}$$

и, подставив (11) и (10) в (9), получим

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

откуда

$$y'_{const} = \frac{2\rho}{x^{-2N+1}B}\left(\frac{P_0}{P_{00}} - \frac{A}{P_{00}}\right). \tag{13}$$

Для определения постоянного y_{const} подставим в (12) выражение (1)

$$y'_{const} = \frac{2\rho}{x^{-2N+1}B}\left(\frac{a^{-3m}}{r_3^{-3m}} - \frac{A}{P_{00}}\right) = \frac{2\rho}{x^{-2N+1}B}\left(x^{-3m} - \frac{A}{P_{00}}\right) = \frac{2\rho}{B}x^{2N-3m-1} - \frac{2\rho A}{BP_{00}}x^{2N-1}. \tag{14}$$

и проинтегрируем полученное соотношение

$$y_{const} = \frac{2\rho}{B}\int x^{2N-3m-1}dx + \frac{2\rho A}{BP_{00}}\int x^{2N-1}dx == \frac{2\rho}{B}\frac{x^{2N-3m}}{(2N-3m)} + \frac{2\rho A}{BP_{00}}\cdot\frac{x^{2N}}{2N} + \Phi, \tag{15}$$

где Φ - постоянная. Подставив найденное выражение (15) в (11), для искомой функции $y(x)$ получим

$$y(x) = \frac{2\rho}{B}\frac{x^{-3m}}{(2N-3m)} + \frac{2\rho A}{BP_{00}}\cdot\frac{1}{2N} + \frac{\Phi}{x^{2N}} \tag{16}$$

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

$$V^2 = \frac{2\rho}{B\left(2N-3m\right)} + \frac{\rho A}{BP_{00}N} + \Phi, \tag{17}$$

откуда

$$\Phi = V^2 - \frac{2\rho}{B\left(2N-3m\right)} - \frac{\rho A}{BP_{00}N}. \tag{18}$$

Полученная зависимость (16) и соотношение $\dot{a}^2 = \frac{y(x)P_{00}}{\rho}$ позволяют вычислять значения размерной скорости камуфлетной поверхности $\dot{a}(x)$. После того, как $\dot{a}(x)$ определено, по формуле $u(b) = \frac{a^2 \cdot \dot{a}}{b^2}$, при заданном отношении $\frac{a}{b}$, легко вычисляются значения скорости частиц на различных расстояниях от центра взрыва $u(b)$. Единственной неизвестной величиной в соотношении (18) остается начальная постоянная V^2, определение которой оказывается возможным с использованием закона сохранения энергии в возмущенной области.

Литература

1. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, переработанное. В 2 томах. Т.1. – М.: Физматлит. - 2002. – 832с. Т.2. – М.: Физматлит. - 2002. - 656с.

2. Механическое действие камуфлетного взрыва/ Бовт А.Н., Ловецкий Е.Е., Селяков В.И. и др. - М.: Недра. - 1990. - 184с.

3. Седнёв В.А., Копнышев С.Л. Теоретические основы обоснования требований к физической стойкости гидротехнических сооружений и других объектов энергетики при внешнем динамическом воздействии // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, № 6. - 2018. - С. 43 – 62.

Сведения об авторах

Седнев Владимир Анатольевич, профессор, профессор кафедры защиты населения и территорий учебно-научного комплекса гражданской защиты Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д.4), 8 (495) 617-26-83, e-mail:sednev70@yandex.ru.

Копнышев Сергей Львович, доцент, доцент кафедры защиты населения и территорий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4, тел. (495) 617-26-59, (916) 582-83-47, Serkopn@mail.ru.