

Сергей Викторович ДЕМИДКОВ,  
кандидат технических наук,  
доцент Белорусского государственного  
аграрного технического университета

Владимир Александрович ЗАНКЕВИЧ,  
кандидат технических наук,  
доцент Белорусского государственного  
аграрного технического университета

Валерий Дмитриевич СИЗОВ,  
кандидат технических наук,  
доцент Белорусского национального  
технического университета

## СПОСОБ СТРОИТЕЛЬСТВА НЕФТЕХРАНИЛИЩ С ПОМОЩЬЮ ПОДЗЕМНОГО ВЗРЫВА

### CONSTRUCTION OF OIL STORAGE BY USING THE UNDERGROUND EXPLOSION METHOD

В статье предложена физико-математическая модель, позволяющая оптимизировать параметры (массу взрывчатого вещества и глубину его подрыва) технологического процесса производства подземных нефтехранилищ путем использования камуфлетного взрыва.

This article presents a physical-mathematical model for optimization of the parameters (an explosive mass and explosion depth) of the underground explosion process intended for creation of oil storages.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мощные взрывы применяются для интенсификации добычи нефти и газа, а также для строительства в толще месторождений сферических емкостей для хранения нефти и газопродуктов [1]. Поэтому возникает необходимость оптимизации размера воздушной полости, образуемой в результате подрыва заряда.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрение эффектов взрыва на глубине осложнено многими факторами: физическими характеристиками грунта, продуктов взрыва, геометрией процесса, гравитацией. Однако, как показывает эксперимент, физические характеристики грунтов являются основными факторами, определяющими размер камуфлетной полости. Наиболее подробный обзор по подземным взрывам с образованием камуфлетной полости приведен в [2]. Задачей данного исследования является получение аналитической зависимости, позволяющей производить оперативный расчет радиуса камуфлетной полости в зависимости от глубины, на которой производится взрыв.

На рис. 1 схематически изображено возмущение грунта, вызванное расширяющейся камуфлетной полостью 1 в зоне упругого 3 и пластического 2 деформирования. Основной задачей при расчете камуфлетного движения является предсказание изменения во времени радиусов камуфлетной полости  $a(t)$  и упругопластической зоны  $b(t)$  (см. рис. 1). Поскольку (практически) камуфлетное движение в грунте является бесколебательным, интерес представляет фаза первичного расширения.

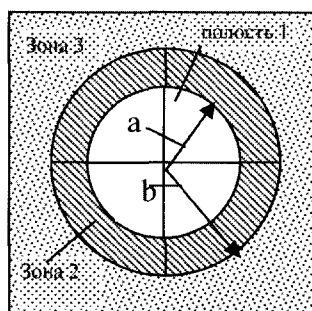


Рис. 1. Схема распространения возмущений в грунте

#### МОДЕЛЬ СРЕДЫ

1 В качестве модели принимали модель среды с условием текучести Кулона. Из закона Кулона следует, что касательное напряжение, при котором происходит течение, является суммой постоянного напряжения сцепления и напряжения трения, линейно возрастающего с увеличением нормальной компоненты вектора напряжения. Таким образом, в области грунта, подвергаемого пластическому деформированию, сопротивление относительно движению будет возрастать с глубиной. Тогда предельным условием прочности будет касательное напряжение на произвольно выделенной площадке, которое линейно зависит от нормального напряжения  $\sigma$ , действующего на эту площадку:

$$|\tau| = c + |\sigma| \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $c$  — сила сцепления частиц;  
 $\varphi$  — угол внутреннего трения.

При расчетах и, чаще всего, в зависимости от типа грунта,  $c$  и  $\varphi$  выбирают константами [2]. Однако в силу чувствительности этих свойств к внешним условиям они характеризуются физическими параметрами, а не константами.

2 Предполагалось, что движение грунта является изохронным, т. е. исключаящим волновые процессы. Поэтому рассматривалась несжимаемая среда. Также предполагалось, что стадия волнового расширения камуфлетной полости по времени составляет незначительную часть всего процесса расширения.

3 Предполагалось, что продукты взрыва (ПВ) находятся под действием однородного давления и объемные изменения происходят адиабатически. Кроме того, вследствие излучения ударной волной энергия ПВ уменьшена до величины одной трети энергии детонации.

Приведенные предположения позволяют процесс расширения камуфлетной полости условно разделить на две стадии: I — упругое расширение, II — упругопластическое расширение (см. рис. 1).

**I. Упругое расширение**

Система уравнений течения среды на первой стадии имеет вид [2]:

$$\rho_0 \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2 \cdot (\sigma_r - \sigma_\theta)}{r}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(Vr^2)}{\partial r} = 0, \tag{2}$$

$$\dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}_\theta = 2E \cdot \frac{V}{r}, \tag{3}$$

- где  $E$  — модуль Юнга;
- $r$  — Эйлера координата;
- $V$  — радиальная компонента скорости;
- $\rho_0$  — начальная плотность среды;
- $\sigma_r, \sigma_\theta$  — механические напряжения в среде, соответствующие сферической системе координат;
- $\dot{\sigma}_r, \dot{\sigma}_\theta$  — механические напряжения в среде, производные по времени.

Граничные условия:  $r \rightarrow \infty; \sigma_r = -P_0; P_0 = \rho_0 \cdot gh + P_{атм}; r = a; \sigma_r = -P(a)$ , где  $P(a)$  — давление продуктов детонации в камуфлетной полости,  $P_{атм}$  — атмосферное давление.

Уравнение (3) системы (1)–(3) записано с учетом того, что  $\nu = 0,5$  (коэффициент Пуассона) для грунтов с идеальной пластичностью.

Интегрируя систему (1)–(3), получаем:

$$\dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}_\theta = 2E \cdot \frac{a^2 \cdot \dot{a}}{r}. \tag{4}$$

Начальные условия для этого уравнения таковы:  $\sigma_\theta = -\rho_0 \cdot gh - P_{атм}; \sigma_r = -\rho_0 \cdot gh - P_{атм}; a = a_0$  ( $a_0$  — начальный радиус камуфлетной полости),  $\dot{a} = 0$  при  $t = 0$ .

Интегрируя уравнение (4), получаем:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2E \ln r \cdot C. \tag{5}$$

В начальный момент времени смещение некоторой частицы от положения равновесия равно нулю, а через произвольный промежуток времени равно  $u$ . Тогда, воспользовавшись условием несжимаемости, получаем:

$$r^3 - a^3 = (r - u)^3 - a^3. \tag{6}$$

Тогда с учетом начальных условий и условия несжимаемости (6) уравнение (5) принимает вид:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \frac{2}{3} \cdot E \ln \left( 1 - \frac{a^3 - a_0^3}{r^3} \right).$$

Подставляя  $(\sigma_r - \sigma_\theta)$  в уравнение движения системы (1) и интегрируя его, получаем:

$$\sigma_r = -\rho_0 \cdot gh - P_{атм} - \frac{4}{3} \cdot E \int_0^\infty \frac{\ln \left( 1 - \frac{a^3 - a_0^3}{r^3} \right)}{r} dr - \rho_0 \cdot \left( \frac{a^2 \cdot \ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2}{r} - \frac{a^2 \cdot \dot{a}^2}{2r^4} \right). \tag{7}$$

Воспользовавшись граничным условием:  $\sigma_r = -P(a)$  при  $r = a$ , окончательно получим интегрально-дифференциальное уравнение движения камуфлетной полости на стадии упругого расширения:

$$P(a) = \rho_0 \cdot gh + P_{атм} + \frac{4}{3} \cdot E \int_0^\infty \frac{\ln \left( 1 - \frac{a^3 - a_0^3}{r^3} \right)}{r} dr - \rho_0 \cdot \left( a \cdot \ddot{a} + \frac{3}{2} \cdot \dot{a}^2 \right). \tag{8}$$

**II. Упругопластическое расширение**

В некоторый момент упругого расширения на камуфлетной полости образуется область пластического течения, которая распространяется в направлении от камуфлетной полости. Преобразуем условие текучести Кулона в соответствии с данной задачей. Из треугольника OKS (рис. 2) следует:

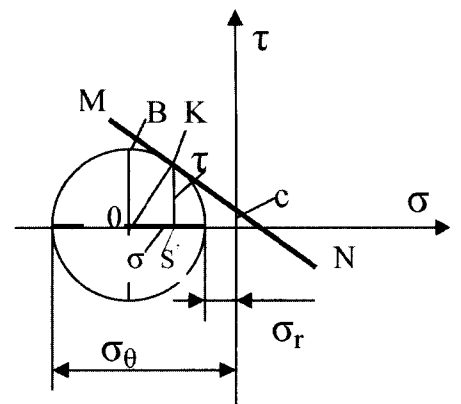


Рис. 2. Схематическое представление условия текучести Кулона

$$r = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \cos(180^\circ - \varphi), \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} - \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}. \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в условие текучести Кулона, получаем:

$$(1 + \alpha) \cdot \sigma_\theta - \sigma_r - Y = 0, \quad (11)$$

где  $Y$  — некоторый параметр, характеризующий сопротивление течению среды, определяемый по формуле:

$$Y = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

$\alpha$  — параметр, характеризующий трение среды, определяемый по формуле:

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}.$$

Момент наступления текучести определяется из уравнений:

$$\frac{2}{3} \cdot E \ln \frac{a_1}{a_0} = Y + \alpha P_1,$$

где  $a_1$  — радиус каверны, соответствующий началу текучести на границе камуфлетной полости;  $P_1$  — давление в этот момент времени.

Подставляя условие текучести (11) в уравнение движения (1), получаем:

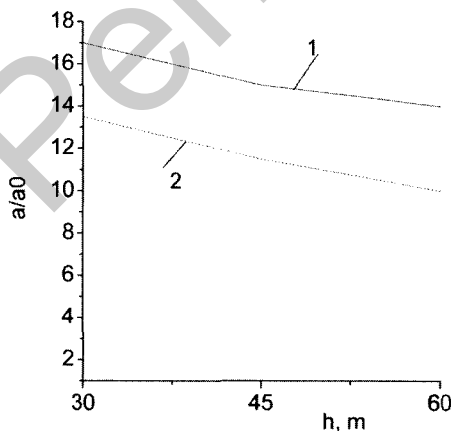
$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2\alpha \sigma_r}{(1+\alpha) \cdot r} = \frac{2\alpha Y}{(1+\alpha) \cdot r} + \rho_0 \cdot \left( \frac{a^2 \cdot \ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2}{r} - \frac{a^2 \cdot \dot{a}^2}{2r^4} \right). \quad (12)$$

Для определения движения камуфлетной полости воспользуемся граничным условием непрерывности напряжений на границе камуфлетной полости. Подставляя условие текучести в уравнение движения и интегрируя последнее, получаем:

$$\sigma_r = \frac{Y}{\alpha} + \left( P(a) + \frac{Y}{\alpha} \right) \cdot \left( \frac{a}{r} \right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} + \frac{2\alpha}{1+\alpha} \cdot \rho_0 \cdot (a \cdot \ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2) \cdot \left( \frac{a}{r} \right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} - \frac{a}{r} - \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot c_0 \cdot \dot{a}^2 \cdot (a \cdot \ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2) \cdot \left( \frac{a}{r} \right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} - \left( \frac{a}{r} \right)^4. \quad (13)$$

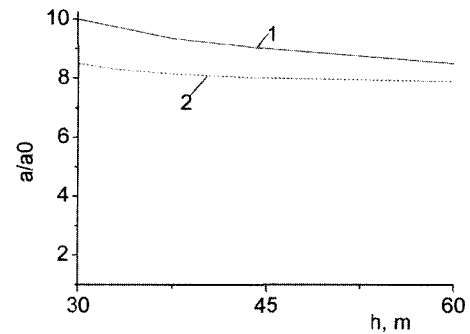
Для определения движения полости, начиная с момента наступления текучести на поверхности камуфлетной полости, воспользуемся условием непрерывности напряжений на границе пластической зоны:

$$\sigma_{r+} = \sigma_{r-}, \quad \sigma_{\theta+} = \sigma_{\theta-},$$



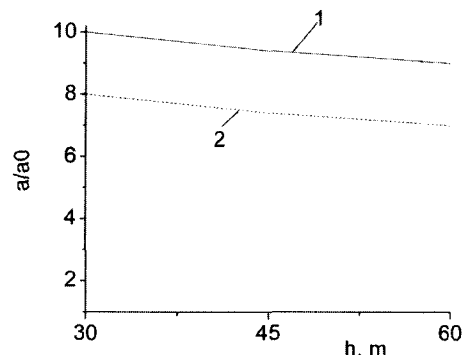
1 — результаты теоретических расчетов по предложенной модели, 2 — экспериментальные данные, полученные в [3]

**Рис. 4.** Зависимость конечного радиуса полости от глубины подрыва для грунта II



1 — результаты теоретических расчетов по предложенной модели, 2 — экспериментальные данные, полученные в [3]

**Рис. 3.** Зависимость конечного радиуса полости от глубины подрыва для грунта I



1 — результаты теоретических расчетов по предложенной модели, 2 — экспериментальные данные, полученные в [3]

**Рис. 5.** Зависимость конечного радиуса полости от глубины подрыва для грунта III

где  $\sigma_{r+}, \sigma_{\theta+}$  — определяются уравнениями упругого течения;  
 $\sigma_{r-}, \sigma_{\theta-}$  — определяются уравнениями пластического течения.

Исходя из этих условий, получаем систему уравнений (14) и (15) для определения  $a(t)$  и  $b(t)$ :

$$Y + \alpha P(a) \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} + \frac{2}{3} \cdot E \ln \left(1 - \frac{a^3 - a_0^3}{b^3}\right) \cdot (1+\alpha) + \alpha \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha} \cdot \rho_0 \cdot (a \cdot \ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2) \cdot \left(\left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} - \frac{a}{b}\right) - \alpha \cdot \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \rho_0 \cdot \dot{a}^2 \cdot (\ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2) \cdot \left(\left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} - \left(\frac{a}{b}\right)^4\right), \quad (14)$$

$$Y + \alpha P + \frac{2}{3} \cdot (1+\alpha) \cdot E \ln \left(1 - \frac{a^3 - a_0^3}{b^3}\right) + \frac{4}{3} \cdot E \int_0^{\infty} \frac{\ln \left(1 - \frac{a^3 - a_0^3}{r^3}\right)}{r} dr - \alpha \rho_0 \cdot \left(\frac{a^2 \cdot \ddot{a} + 2a \cdot \dot{a}^2}{b} - \frac{a^2 \cdot \dot{a}^2}{2b^4}\right), \quad (15)$$

Начальные условия системы (14) и (15)  $a = a_0, a = b, \dot{a} = \dot{a}(0)$  при  $t = 0$ . Фаза расширения заканчивается при  $\dot{a} = 0$ . Давление ПВ определялось функцией, полученной в результате аппроксимации экспериментальных данных [2]:

$$P(a) = P_0 \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{3\gamma_1}, \quad \text{если } 1 \leq \frac{a}{a_0} \leq \frac{a^*}{a_0}$$

и  $P(a) = P_0 \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^{3\gamma_1} \cdot \left(\frac{a}{a^*}\right)^{3\gamma_2}, \quad \text{если } \frac{a}{a_0} \geq \frac{a^*}{a_0}$

где  $a^*$  — радиус каверны, соответствующей критической плотности ПВ;  
 $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 1,27, a^*/a_0 = 1,53$  — для тротила.

Расчеты проводились для нескольких типов грунтов:

I — сухой грунт без сцепления с параметрами:  $c = 0$  МПа;  $\varphi = 0,52; c_0 = 296$  м/с;  $\rho_0 = 1600$  кг/м<sup>3</sup> ( $c_0$  — скорость звука в грунте);

II — глина со слабым трением с параметрами:  $c = 0,14$  МПа;  $\varphi = 0,018; c_0 = 725$  м/с;  $\rho_0 = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;

III — смешанный грунт с параметрами:  $c = 0,105$  МПа;  $\varphi = 0,18; c_0 = 529$  м/с;  $\rho_0 = 2000$  кг/м<sup>3</sup>.

Параметры ВВ: вещество — тротил. Результаты расчетов показаны на рис. 2–5.

Для интегрирования системы уравнений использовалась схема Рунге — Кутта четвертого порядка точности. Результаты расчетов позволили определить аналитические зависимости конечных размеров полости в зависимости от глубины подрыва заряда ВВ ( $[h] = 0$ ):  $a/a_0 = 26,6 \cdot h^{-0,32}$  для грунта I;  $a/a_0 = 32,4 \cdot h^{-0,2}$  для грунта II;  $a/a_0 = 17,2 \cdot h^{-0,18}$  для грунта III.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости размера камуфлетной полости от глубины закладки заряда позволяют оптимально решить задачу определения мощности заряда, используемого для строительства нефтехранилища.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков, С. А. Мирные ядерные взрывы / С. А. Новиков // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 11. — С. 82–89.
- Чедвик, П. Механика глубинных подземных взрывов / П. Чедвик, А. Кокс, Г. Гопкинс. — М.: Мир, 1966.
- Clossmann, P. J. On the prediction of cavity radius produced by an underground nuclear explosion, J. Geophys. Res. — 1969. — Vol. 74. — P. 3935–3939.

Статья поступила в редакцию 08.02.2011.