

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДОБИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Ма Кин Йонг<sup>1,2</sup>, Кэй Мей Фенг<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Департамент гражданского строительства, Анхуэйский университет естественных наук и технологии, 232001 Хуэйнан, Китай, qyma@aust.edu.cn

<sup>2</sup>Школа гражданского строительства и исследования окружающей среды, Пекинский университет естественных наук и технологии, 100083 Пекин, Китай

С помощью метода матричного анализа выводятся основные параметры подобия взрывчатого вещества и материала, имитирующего свойства грунта. Определение подобных взрывчатых веществ в значительной степени зависит от выбора имитатора грунта. Показано, что целесообразно в первую очередь определить подобное взрывчатое вещество, а затем материал имитатора грунта, а не наоборот. Пригодность метода проверялась сопоставлением результатов модельных экспериментов для мерзлых грунтов и состава цемент/песок.

Ключевые слова: подобное взрывчатое вещество, имитатор грунта, безразмерный параметр, модельный эксперимент, взрыв.

### ВВЕДЕНИЕ

Модельный эксперимент, обоснование для которого дает теория подобия, является важным и эффективным методом решения сложных инженерных задач. Он позволяет проанализировать инженерную задачу, определить основное явление и выделить определяющие физические факторы. Набор безразмерных комбинаций выводится методом матричного анализа с учетом условий эксперимента и необходимой точности. На основе этих безразмерных комбинаций определяются константы подобия, а также подобные взрывчатые вещества (ВВ) и материалы, имитирующие свойства грунта, а затем проводится модельный эксперимент [1–4].

и время. К геометрическим параметрам относятся главным образом параметры шпура и заряда, такие как диаметр цилиндрического заряда ВВ  $d_c$ , диаметр  $d_b$  и глубина  $l_b$  шпура, наименьшее сопротивление  $W$  и объем взрывного кратера  $V$ , глубина взрыва  $H$  и размер взрывного фрагмента  $d_f$ . Параметры среды — это плотность  $\rho_m$  и прочность  $\sigma$  среды (включая прочность на сжатие ( $\sigma_c$ ), растяжение ( $\sigma_t$ ) и сдвиг  $\sigma_s$ ), волновое сопротивление среды  $Z_m$ , модуль упругости  $E$ , скорость продольной волны  $v_l$ . Свойства ВВ описываются такими параметрами, как плотность ВВ  $\rho_0$ , скорость детонации  $D$  и количество ВВ  $Q$ . К временным параметрам относятся время задержки взрыва внутри шпура и между шпурами, которые обозначены через  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  соответственно.

### 1. УСТАНОВЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

#### 1.1. Выбор определяющих параметров задачи

Параметры подобия включают в себя геометрию и характеристики среды, свойства ВВ

#### 1.2. Определение безразмерных параметров

Размерности всех параметров, выраженные через основные размерности, такие как длина  $L$ , сила  $F$  и время  $T$ , приведены в табл. 1.

Можно показать, что определяющие параметры связаны следующим общим выражением:

$$f(d_c, d_b, l_b, W, V, H, d_f, Z_m, \sigma, E, \rho_0, D, Q, \tau) = 0.$$

(1)

Работа поддержана Молодежным фондом научных и технологических исследований китайской провинции Анхуэй (2001-28).

Ma Qin-yong<sup>1,2</sup> and Cai Mei-feng<sup>2</sup>; <sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; <sup>2</sup>School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

Таблица 1

Размерности основных параметров

Параметр	Размерность	Параметр	Размерность
Диаметр ВВ, $d_c$	$L$	Волновое сопротивление среды, $Z_m$	$FL^{-3}T$
Диаметр шпура, $d_b$	$L$	Прочность среды, $\sigma$	$FL^{-2}$
Глубина шпура, $l_b$	$L$	Модуль упругости среды, $E$	$FL^{-2}$
Наименьшее сопротивление, $W$	$L$	Плотность ВВ, $\rho_0$	$FL^{-4}T^2$
Объем взрывного кратера, $V$	$L^3$	Скорость детонации ВВ, $D$	$LT^{-1}$
Глубина заложения заряда, $H$	$L$	Количество ВВ, $Q$	$FL^{-1}T^2$
Размер взрывного фрагмента, $d_f$	$L$	Время, $\tau$	$T$

Примечание.  $Z_m = \rho_m v_l$ .

Существуют три основные независимые размерности. Применяя метод матричного анализа, можно установить 11 независимых безразмерных комбинаций, куда входят 14 вышеупомянутых параметров:

$$\pi_1 = d_b/d_c; \quad \pi_2 = l_b/d_b; \quad \pi_3 = W/d_b;$$

$$\pi_4 = V/d_b^3; \quad \pi_5 = H/d_b; \quad \pi_6 = d_f/d_b; \quad (2)$$

$$\pi_7 = Z_m/\rho_0 D; \quad \pi_8 = \sigma/\rho_0 D^2; \quad \pi_9 = Q/\rho_0 d_b^3;$$

$$\pi_{10} = E/\sigma; \quad \pi_{11} = D\tau/d_b.$$

В случае, когда геометрические параметры  $d_c$ ,  $d_b$ ,  $l_b$ ,  $W$ , параметры среды  $Z_m$ ,  $\sigma$ ,  $E$ , параметры ВВ  $\rho_0$ ,  $D$ ,  $Q$  и параметр времени  $\tau$  являются константами, можно определить  $V$ ,  $H$ ,  $d_f$ . Параметры  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$ ,  $\pi_7$ ,  $\pi_8$  рассматриваются в качестве независимых, а параметры  $\pi_4, \pi_5, \pi_6$  таковыми не являются, при этом функциональная зависимость для безразмерных комбинаций записывается в виде

$$\pi_4, \pi_5, \pi_6 = F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}). \quad (3)$$

Безразмерные параметры  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$  определяют базис, на основе которого выбирается размер модели, а параметры  $\pi_7$ ,  $\pi_8$ ,  $\pi_9$ ,  $\pi_{10}$ ,  $\pi_{11}$  определяют выбор подобных ВВ и материалов имитаторов грунта. Между последними двумя категориями существует зависимость, которая устанавливается из безразмерных величин.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДОБИЯ ВВ И ИМИТАТОРОВ ГРУНТА

### 2.1. Моделирование взрывов на выброс в мерзлых грунтах

#### 2.1.1. Имитатор грунта

В мерзлом грунте содержание песка больше, чем других фракций. Удобнее всего в модельных экспериментах применять подлинный грунт, при этом содержание воды, плотность и температура имитатора должны быть такими же, как и у моделируемого грунта. В этом случае отношения плотностей и волновых скоростей для мерзлого грунта в натуральных и модельных условиях равны единице, т. е.  $C_{\rho_m} = 1$ ,  $C_{v_l} = 1$ .

#### 2.1.2. Геометрическая константа подобия

При определении геометрической константы подобия необходимо учитывать условия эксперимента и размер модели должен быть не слишком велик. Следует также обращать внимание на граничные условия. С учетом всех факторов геометрическая константа подобия выбрана равной 20. Таким образом,  $C_L = 20$ , а  $C_{d_c} = C_{d_b} = C_{l_b} = C_W = C_H = C_{d_f} = 20$ ,  $C_V = C_L^3 = 8000$ .

#### 2.1.3. Подобное ВВ

Безразмерный параметр  $\pi_7$  дает  $C_{\rho_0} \times C_D = 1$ , аналогично из  $\pi_8$  следует, что  $C_\sigma =$

$C_{\rho_0} C_D^2 = C_D$ , а из  $\pi_9$  вытекает  $C_Q = C_{\rho_0} C_{d_b}^3 = 8000 C_{\rho_0}$ .

При исследованиях в западной шахте в Донгтане, во вспомогательной шахте в Ликяо и в основной шахте Китая в Ренлу в качестве ВВ для горных пород обычно применялся состав № 2 из аммиачной селитры, который работает при температуре мерзлых стен  $-18^\circ\text{C}$  и температуре рабочего места  $-7^\circ\text{C}$ . Плотность состава  $950 \div 1100 \text{ кг/м}^3$ , скорость детонации  $3600 \div 3800 \text{ м/с}$ . Если состав № 2 из аммиачной селитры применить в качестве подобного ВВ, то  $C_{\rho_0} = 1$ ,  $C_D = 1$ , а  $C_\sigma = 1$ ,  $C_Q = 8000$ . Однако критический диаметр этого состава достаточно большой. Поэтому необходимо было заменить состав № 2 из аммиачной селитры другим подобным ВВ. Согласно энергетическому критерию подобия преобразованная масса модельного (подобного) ВВ определяется по формуле

$$m' = (Q''/Q')m, \quad (4)$$

где  $Q'$  — теплотворная способность взрыва модельного ВВ;  $Q''$  — теплотворная способность взрыва состава № 2 из аммиачной селитры;  $m$  — масса состава № 2.

Теплотворная способность взрыва состава № 2 из аммиачной селитры равна  $4,015 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$ , а теплотворная способность взрыва состава DDNP (диазодинитрофенол — динол) —  $4,0 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ , т. е. эти составы подобны. Согласно теории энергетического подобия масса DDNP должна примерно равняться массе состава № 2 из аммиачной селитры, необходимого для взрыва горных пород. По этой причине состав DDNP применялся в качестве подобного ВВ в модельных экспериментах с целью образования воронки в мерзлых грунтах. Его плотность при зарядании составляла  $950 \div 1100 \text{ кг/м}^3$ , а скорость детонации  $3600 \div 3800 \text{ м/с}$ . Приведенные параметры зарядов проверялись экспериментально.

## 2.2. Модельные эксперименты по взрыву цементных растворов

### 2.2.1. Подобное ВВ

В качестве исходного моделируемого ВВ для горных пород рассматривался состав № 2 из водостойчивого (коллоидального) динамита плотностью  $1300 \text{ кг/м}^3$  со скоростью детонации  $4500 \text{ м/с}$ . После большого количества

расчетов и экспериментов со смесями различных пропорций для подобного ВВ была выбрана смесь RDX (циклотриметилентринитрамин, гексоген) и ННУ (черный порох) плотностью  $800 \text{ кг/м}^3$  с измеренной скоростью детонации  $1550 \text{ м/с}$ . В этом случае  $C_{\rho_0} = 1300/800 = 1,625$ ,  $C_D = 4500/1550 = 2,903$ , а исходя из безразмерного параметра  $\pi_9$  получаем  $C_Q = C_{\rho_0} C_{d_b}^3 = 1,625 C_{d_b}^3$ .

### 2.2.2. Имитатор грунта

В качестве исходного моделируемого вещества использовался песчаник, основные физические и механические свойства которого следующие:  $\rho_m = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $E = 2800 \div 3320 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ ,  $\sigma_c = 10 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_t = 0,45 \text{ МПа}$ ,  $v_l = 5000 \text{ м/с}$ . Исходя из условий эксперимента и условий на границе константа геометрического подобия  $C_L$  была определена равной 10.

Безразмерный параметр  $\pi_7$  определяет величины

$$C_{\rho_m} C_{v_l} = C_{\rho_0} C_D = 4,718, \quad \rho'_m v'_l = \rho_m v_l = \\ = \rho_m v_l / 4,718 = 2700 \times 5000 / 4,718 = 2861400.$$

Из безразмерного параметра  $\pi_8$  следует  $C_\sigma = C_{\rho_0} C_D^2 = 1,625 \times 2,903^2 = 13,695$ . При одноосном сжатии и растяжении материала имитатора получаем, что  $\sigma'_c = 10/13,695 = 0,73 \text{ МПа}$ ,  $\sigma'_t = 0,45/13,695 = 0,0329 \text{ МПа}$ . Таким образом, в результате многочисленных экспериментов в качестве имитатора песчаника подобрана смесь цемент/песок 1 : 1,92. Плотность этого состава  $1900 \text{ кг/м}^3$ .

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 3.1. Взрывы в замерзших грунтах

Замерзшие грунты состоят главным образом из глины и песка. Плотность глины  $1950 \text{ кг/м}^3$  при содержании воды 30 %, плотность песка  $2050 \text{ кг/м}^3$  при содержании воды 16 %. В экспериментах температура замерзшего грунта составляла  $T = -7, -12$  и  $-17^\circ\text{C}$ . В качестве ВВ взят состав DDNP. Наружный диаметр трубчатого заряда равнялся 6,4 мм, внутренний — 5,4 мм. Количество ВВ в заряде составляло 0,24 г, отношение длины заряда к

Таблица 2

Результаты экспериментов с целью образования воронок в мерзлых грунтах

Грунт	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_t, \text{МПа}$	$\sigma_c, \text{МПа}$	$v_l, \text{м/с}$	$v_t, \text{м/с}$	$V, 10^{-4} \text{ м}^3$	$q, \text{кг/м}^3$
Мерзлая глина	-7	1,038	3,50	2165,7	1011,5	1,12	2,143
	-12	1,156	5,39	2364,5	1388,7	0,54	4,440
	-17	1,533	7,08	2476,6	1465,8	0,37	6,487
Мерзлый песок	-7	0,602	5,54	3311,2	1967,6	1,10	2,182
	-12	0,672	8,16	3529,5	2278,0	0,65	3,692
	-17	0,896	10,37	3614,0	2453,2	0,60	4,000

диаметру 1,85, плотность заряда 1048,5 кг/м<sup>3</sup>. Результаты экспериментов приведены в табл. 2 ( $q$  — расход ВВ на единицу объема).

### 3.2. Взрывы в смеси цемент/песок

Взрывчатое вещество — смесь RDX/ННУ состава 0,85 : 0,15. Иницирующее ВВ — состав DDNP. Внешний диаметр трубчатого заряда 5,5 мм, внутренний — 4,5 мм. Масса заряда 0,434 г, его плотность 800 кг/м<sup>3</sup>. Получены следующие результаты:  $\rho_m = 1900 \text{ кг/м}^3$ ,  $E = 2600 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_t = 0,61 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_c = 8,23 \text{ МПа}$ ,  $v_l = 1862,1 \text{ м/с}$ ,  $v_t = 1446,2 \text{ м/с}$ ,  $V = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ ,  $q = 1,763 \text{ кг/м}^3$ .

## 4. ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

В модельных экспериментах удельный расход ВВ определялся по формуле

$$q_1 = Q_1/V_1, \quad (5)$$

в инженерных приложениях — по формуле

$$q_2 = Q_2/V_2. \quad (6)$$

Из безразмерных параметров  $\pi_4, \pi_9$  следует

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{d_{b1}^3}{d_{b2}^3}, \quad (7)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\rho_{01} d_{b1}^3}{\rho_{02} d_{b2}^3}. \quad (8)$$

Подставляя (7) и (8) в (5), (6), получаем

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\rho_{01}}{\rho_{02}}, \quad q_2 = \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} q_1. \quad (9)$$

Для мерзлого грунта  $C_{\rho_0} C_D = 1$ ,  $C_{\rho_0} = 1$ ,  $C_D = 1$ ,  $C_Q = C_{\rho_0} C_{db}^3$ ,  $C_q = C_Q/C_L^3 = C_{\rho_0}$ . Поэтому удельный расход ВВ в реальных взрывных работах такой же, как и в модельных экспериментах на мерзлых грунтах.

Для песчаника  $C_{\rho_0} = 1,625$ ,  $C_D = 2,903$ ,  $C_q = C_Q/C_L^3 = C_{\rho_0} = 1,625$ . В результате

$$q_2 = \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} q_1 = 1,625 \times 1,736 = 2,821 \text{ кг/м}^3.$$

Итак, в реальных взрывных работах, проводимых в горных породах удельный расход ВВ равен 2,821 кг/м<sup>3</sup>. В соответствии с этим составлен проект параметров взрыва при работах с горными породами: диаметр шахты 6,8 м, диаметр шпура 40 мм, глубина шпура 2,0 м, число шпуров 97, суммарное количество ВВ 143,28 кг. Горные породы в китайской шахте в Хуэджиэху успешно разрабатываются с помощью взрыва.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Модельные эксперименты — важный путь решения сложных инженерных проблем. Основные безразмерные параметры, такие как  $\rho_m v_l/\rho_0 D$ ,  $\sigma/\rho_0 D^2$ ,  $Q/\rho_0 d_b^3$ , используются для выбора подобных ВВ и материалов, которые имитируют грунты.

- Определение подобных ВВ зависит от выбора имитаторов грунта. В первом способе исходя из свойств грунта определяется материал имитатора, а затем с помощью безразмерных параметров — подобное ВВ. Подобное ВВ должно отвечать требованию простоты приготовления, в противном случае приходится подбирать его вторично, при дополнительном изменении параметров материала имитатора методами энергетической теории подобия. Во вто-

ром способе исходя из заданных условий определяется подобное ВВ, а затем материал имитатора грунта. Обычно второй способ реализовать легче.

• Модельные эксперименты требуют предварительного анализа заданных условий, определения основных параметров и безразмерных величин. На основе безразмерных параметров проводятся модельные взрывные эксперименты, результаты которых подобны результатам взрыва при заданных условиях. Результаты модельных экспериментов, полученные на основе критериев подобия закономерности, принимаются во внимание во взрывных инженерных работах. Вышеизложенный метод был успешно применен в двух экспериментах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Tsitovich H. A.** Mechanics of Frozen Soil // Trans. by Zhang Changqing and Zhu Yanlin. Beijing: Sciences Press, 1985.
2. **Ma Qin-yong.** Model test investigations of blasting crater and blastability of frozen soils // Coal J. Sci. Technol. 1997. V. 22, N 3. P. 288–293.
3. **Ma Qin-yong, Peng Wan-wei, Zhu Yuan-lin.** Relationship among longitudinal and transverse wave velocities and temperature of artificially frozen clay // Chinese J. Rock Mech. and Eng. V. 21, N 2. 2002. P. 290–294.
4. **Zong Qi, Liu Jiming.** Investigations about model test of millisecond blasting in blasting hole // J. Huainan Mining Inst. 1993. V. 13, N 2. P. 33–36.

*Поступила в редакцию 18/II 2002 г.,  
в окончательном варианте — 18/III 2003 г.*

---