

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.83.16.002

УДК 622.235. 5: 622.32

© Р. З. Камалян, С. Р. Камалян, Н. С. Нестерова, 2024

Р.З. КАМАЛЯН

д-р техн. наук, проф.,
профессор кафедры
Российский университет кооперации,
г. Краснодар
e-mail: kasarub@gmail.com

С.Р. КАМАЛЯН

канд. физ.мат. наук
зав. отделом Южного межрегионального управление охраны ПАО «Газпром»,
г. Краснодар
e-mail: kasarub@gmail.com

Н.С. НЕСТЕРОВА

канд. техн. наук
доцент кафедры
ИМСИТ, г. Краснодар
e-mail: nnnnnnn46@mail.ru

К ВОПРОСУ О ФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Модельные исследования физических процессов при разрушении горных пород энергией взрыва получили широкое распространение. Однако при их осуществлении необходим правильный подбор критериев подобия изучаемых процессов.

В работе показан пример такого подбора критериев подобия. Представлен результат модельных экспериментов.

Ключевые слова: ПОДОБИЕ, СМЕЩЕНИЕ, МАССИВ, МЕТАНИЕ, МОДЕЛЬ, УДАР, ЗАЖИМАЮЩАЯ СРЕДА.

В [1] приведены результаты модельных исследований в двухслойной среде. Конкретным примером служило взрывание в зажимающей среде (ЗС) при разработке месторождений как открытым, так и подземным способом.

Ранее при теоретическом исследовании данного процесса была использована модель в одномерной постановке [2], что предполагает распространение по ЗС плоского фронта возмущений, а среда находится в состоянии одноосной деформации. Диаграмма представлена на рис. 1.

Аналитически диаграмма одноосной деформации нелинейно-упрочняющейся

жесткопластической среды с асимптотой деформации ε_a аппроксимирована следующим образом [2]:

при нагрузке

$$\sigma_0 = \frac{E\varepsilon^n}{\varepsilon_b}, \quad n > 1.$$

при разгрузке

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_*, \quad \sigma_0 \leq \sigma_* = E(\varepsilon_* + \varepsilon_-)^n \left(1 - \frac{\varepsilon_*}{\varepsilon_a}\right)^{-1},$$
$$\sigma_- = E\varepsilon_-^n, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_-, \quad \varepsilon_b = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_a}.$$

где E — коэффициент с размерностью давления, σ_- — начальное упрочнение среды, при котором она имеет плотность ρ_0 , σ_* и ε_* — максимальные напряжение и деформация, достигнутые в результате прохождения волны через некоторую точку среды с координатой Лагранжа x , E , n , ε_a — константы среды.

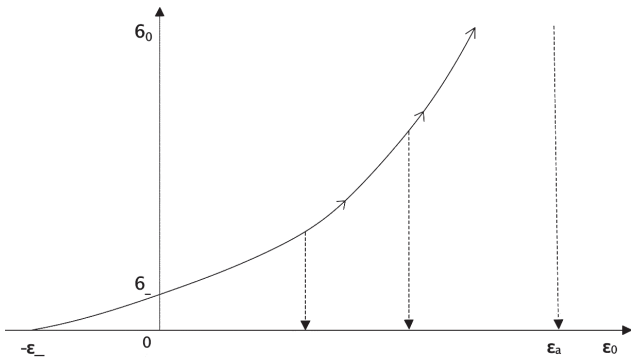


Рис. 1. Диаграмма одноосной деформации

При $\sigma_0 \leq \sigma_-$ — в среде распространяются упругие волны. Однако эти волны, а при $\sigma_0 > \sigma_-$ пластические волны, связаны с принципиально разными движениями зернистой среды. В первом случае имеет место упругое движение в материале зерен, во втором — относительные перемещения самих зерен. Допущение об абсолютной жесткости среды при $\sigma_0 \leq \sigma_-$ имеет тот недостаток, что, например, при ударе некоторого тела по такой среде в ней всегда будут развиваться пластические деформации. Понятно, что чем выше модуль упругости среды при $\sigma_0 \leq \sigma_-$ и больше разность $\sigma_{0max} - \sigma_-$ (σ_{0max} — начальное максимальное напряжение на волне разгрузки), тем меньше количественно отличаются решения для упруго- и жесткопластической моделей. С другой стороны, модель (1) позволяет отразить такую характерную сторону процесса упрочнения среды, как увеличение $d\sigma_0/d\varepsilon_0|_{\varepsilon_0=0}$ с ростом σ_- .

Основной целью моделирования было качественное изучение смещений среды в результате динамического воздействия на нее массива. От этого процесса зависят размеры и форма разрушенной взрывом секции массива, и результаты ее выпуска, а также уплотнение зажимающей среды [3, 4]

Для выяснения степени адекватности теоретической модели исследуемому процессу необходимы эксперименты на физических моделях или в натуральных условиях, что удается сделать значительно реже. Эксперименты на физических моделях требуют правильного выбора критериев подобия. Этому посвящена настоящая работа.

Для исследования смещения поверхности жесткопластического нелинейно-упрочняющегося полупространства получено соотношение [2]

$$U = \left(\frac{I}{\rho_0 V_0} \right) \int_0^{\varepsilon_0(0)} \varphi_n(\dots) d\varepsilon_0 = \left(\frac{I}{\rho_0 V_0} \right) \Phi_n \left(\frac{V_0}{\theta, \varepsilon_-, \varepsilon_a} \right), \quad (1)$$

где $\Phi_n(\dots)$ определяется численным интегрированием.

В [5] приведены значения функции $\Phi_2(\dots)$.

Умножив и разделив правую часть (1) на θ , придадим этому выражению безразмерный вид

$$\bar{U} = \frac{U \rho_0 \theta}{I} = \left(\frac{\theta}{V_0} \right) \Phi_n \left(\frac{V_0}{\theta, \varepsilon_-, \varepsilon_a} \right), \quad (2)$$

где V_0 — скорость метаемого массива, U — смещение поверхности, по которой нанесен удар, I — удельный импульс удара, θ — скорость продольных волн в массиве.

В (2) входят пять критериев подобия

$$\frac{U \rho_0 \theta}{I}, \frac{V_0}{\theta}, n, \varepsilon_-, \varepsilon_a.$$

Два первых критерия зависят от пяти параметров, поэтому масштабы моделирования трех из них можно выбрать произвольно. Эти масштабы должны соответствовать основным независимым единицам измерения. Нетрудно усмотреть два варианта таких единиц. Это ρ_0, m, V_0 или ρ_0, U, E .

Соответственно имеется два варианта произвольно выбранных масштабов: $\lambda_{\rho_0}, \lambda_m, \lambda_{V_0}$ или $\lambda_{\rho_0}, \lambda_U, \lambda_E$. Масштабы моделирования двух оставшихся параметров

определяются законом размерностей [6]. Например, если произвольно задать λ_{ρ_0} , λ_U и λ_E , то

$$\lambda_m = \lambda_{\rho_0} \lambda_U, \quad \lambda_{V_0} = \left(\frac{\lambda_E}{\lambda_{\rho_0}}\right)^{1/2}$$

Для установления подобия в метании слоя массива, выражение для скорости метания [4]

$$V_0 = W^{-1} \left\{ 2SP_0 \frac{[1 - (1 + yW/S)^{1-\gamma}]}{\rho(\gamma - 1)} \right\}^{1/2},$$

$$a = W,$$

приведем к безразмерному виду

$$V_0 W \left(\frac{\rho}{SP_0}\right)^{1/2} = \left[1 - \left(1 + \frac{yW}{S}\right)^{1-\gamma} \right]^{1/2} (\gamma - 1)^{-1/2},$$

где P_0 и S — давление продуктов детонации и площадь поперечного сечения зарядной выработки в начале метания, γ — показатель адиабаты продуктов детонации, y — перемещение слоя.

Видно, что данный процесс имеет три критерия подобия

$$\gamma, V_0 W \left(\frac{\rho}{SP_0}\right)^{1/2}, \quad \frac{yW}{S},$$

два из которых зависят от шести параметров

$$V_0, W, \rho, S, P_0, \gamma.$$

Однако, произвольно можно выбрать только три масштаба моделирования, так как только в этом случае они будут независимыми и через них можно будет определить масштабы для остальных параметров. Из соображений размерности произвольно можно установить масштабы

$$\lambda_\gamma, \lambda_\rho, \lambda_{P_0},$$

то есть масштабы геометрический, плотности и давления продуктов детонации (ПД). Последнее условие весьма важно, так как давление ПД является трудноуправляемым параметром. Для остальных параметров имеем

$$\lambda_W = \lambda_\gamma, \quad \lambda_S = \lambda_\gamma^2, \quad \lambda_{V_0} = \left(\frac{\lambda_{P_0}}{\lambda_\rho}\right)^{1/2}.$$

Из второго записанного равенства следует, что в случае подобия должно быть $h = const$ (h отражает пластические свойства среды). Это касается уже подобия камуфлетного взрыва, вопрос обеспечения которого является в этом случае наиболее сложным. Однако, этот вопрос можно не обсуждать, если подобрать материал модели по условию $h = const$, для чего имеется возможность, так как масштаб λ_ρ , также касающейся свойств материала модели, можно выбрать произвольно.

Подобие импульса удара

$$I = mV_0, \quad m = \rho W,$$

обеспечивается, очевидно, автоматически.

На рис. 2 представлен один из результатов модельных экспериментов [1]. В качестве заряда использовали детонирующий шнур (ДШ). В этой модели заряд был усилен дополнительным отрезком ДШ длиной 12 см, который помещали в среднюю треть скважины. Инициирование заряда было двусторонним.



Рис. 2. Модель и результат взрыва

Как видно из рисунка, контакт приобрел заметную кривизну. На датчике, примыкающем к контакту, видны две ступеньки, положение которых соответствует концам дополнительного отрезка ДШ. Смещение контакта составили: минимальное — 12,

максимальное — 13,3 см. Таким образом, двукратное увеличение концентрации заряда привело к увеличению смещения на 11 %.

Заметим, что задача оптимизации параметров такого выпуклого контакта рассматривалась в [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалян Р.З., Камалян С.Р. Некоторые результаты исследования взрывов цилиндрических зарядов в двухслойной среде // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2015. № 1. С. 24–29.
2. Королев К.Д. К ударному уплотнению грунтов и сыпучих сред // ФТПРПИ. 1984. № 1. С. 24–31.
3. Камалян Р.З., Королев К.Д. О математическом моделировании и оптимизации геометрических параметров выпуска руды // ФТПРПИ. 1990. № 3. С. 102–107.
4. Камалян С.Р., Камалян Р.З. К задаче о взрыве плоского заряда в двухслойной среде // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2015. № 4. С. 43–48.
5. Камалян С.Р., Камалян Р.З. К определению формы контакта взорванного массива с зажимающей средой // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2016. № 1. С. 57–60.
6. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972. 440 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.83.16.002

UDC 622.235. 5: 622.32

© R. Z. Kamalyan, S. R. Kamalyan, N. S. Nesterova, 2024

R.Z. KAMALYAN

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor of Department
Russian University of Cooperation, Krasnodar
e-mail: kasarub@gmail.com

S.R. KAMALYAN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of the Southern Interregional Security Department
PJSC «Gazprom», Krasnodar
e-mail: kasarub@gmail.com

N.S. NESTEROVA

Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor
IMIT, Krasnodar
e-mail: nnnnnnn46@mail.ru

TO THE QUESTION OF PHYSICAL MODELING OF EXPLOSIVE DESTRUCTION OF ROCKS

Model studies of physical processes during the destruction of rocks by explosion energy have become widespread. However, their implementation requires the correct selection of similarity criteria for the processes being studied.

The paper shows an example of such a selection of similarity criteria. The results of model experiments are presented.

Key words: SIMILARITY, DISPLACEMENT, ARRAY, THROWN, MODEL, IMPACT, CLAMPING ENVIRONMENT.

REFERENCES

1. Kamalyan R.Z., Kamalyan S.R. Some results of the study of explosions of cylindrical charges in a two-layer medium // News of universities. North Caucasian region. Natural sciences [Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki]. 2015. No. 1. P. 24–29. [In Russ.].

2. Korolev K.D. On impact compaction of soils and bulk media // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 1984. No. 1. P. 24–31. [In Russ.].

3. Kamalyan R.Z., Korolev K.D. On mathematical modeling and optimization of geometric parameters of ore production // Physical and technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 1990. No. 3. P. 102–107. [In Russ.].

4. Kamalyan S.R., Kamalyan R.Z. On the problem of the explosion of a flat charge in a two-layer medium // Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Community [Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov CHES]. 2015. No. 4. P. 43–48. [In Russ.].

5. Kamalyan S.R., Kamalyan R.Z. On the definition of the form of contact of the blasted massif with the clamping medium // Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Community [Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov CHES]. 2016. No. 1. P. 57–60. [In Russ.].

6. Sedov L.I. Methods of similarity and dimensionality in mechanics. Moscow: Nauka, 1972. 440 p. [In Russ.].