

Физическое моделирование процесса взрывного рыхления скальных пород

В.В. Иовенко, А.А. Чебровский, Е.В. Солодовник,

М.В. Лейбович, Е.Л. Маркова

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: При прокладке автомобильных и железных дорог в скальных породах взрывные работы часто являются единственным способом подготовки материала к выемке. Взрывное рыхление также используется для добычи камня в качестве строительного материала. Для обеспечения хорошего качества рыхления скальных пород, необходимо предварительно провести серию экспериментов на модели и выяснить способствующие этому условия, поскольку натурные испытания экономически весьма затратны и часто опасны. Чтобы результаты модельных испытаний можно было перенести на природу, требуется подобие модели и природы. Приближенное подобие достигается, в первую очередь, равенством критериев подобия для модели и природы. Характерные критерии подобия получены путем анализа физических величин, присущих механической системе, при помощи теории размерности и подобия. Полученные критерии, путем несложных преобразований, представлены в классическом виде. Это критерии Струхалея, Фруда, Коши и Ньютона.

Ключевые слова: взрывное рыхление, скальная порода, интервал замедления, критерий подобия, моделирование, плотность породы, модель, натура, высота разлета, размерность, физическая величина.

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых как в горной промышленности, так и для проведения дорожно - строительных работ возникает проблема эффективного рыхления горных пород. Поскольку горные породы имеют более высокую крепость, то подготовка их к выемке обычно ведется взрывным способом [1]. Взрывные работы отличаются масштабностью исполнения, быстротой и позволяют значительно сократить сроки производства работ, связанных с разрушением горных пород. Часто они являются единственным способом подготовки пород к выемке. Проведение взрывных работ вблизи населенных пунктов и различных объектов строительной инфраструктуры всегда сопровождается большими сложностями по соблюдению требований безопасности работ [2]. Потому всегда надо стремиться к снижению негативного воздействия массовых взрывов всеми возможными современными средствами [3-5].

Из-за сложности процесса взрывного рыхления скальных пород невозможно составить его полное математическое описание в виде системы дифференциальных уравнений, но возможно, в самом общем виде, представить зависимость между физическими величинами, характеризующими этот процесс, лишь анализируя размерности известных физических величин [6]. Натурные испытания дорогостоящи по экономическим соображениям и небезопасны, так как при массовых взрывах в воздух выбрасываются куски породы, пыль и ядовитые газы. Этой проблемой, в настоящее время, занимаются как отечественные [7-8], так и зарубежные исследователи [9-10].

Поэтому в этом случае целесообразно прибегнуть к приближенному физическому моделированию взрывного процесса. Обычно влияние отдельных факторов, представленных различными величинами, проявляется не порознь, а совместно в виде их совокупности (критериев подобия), характерных для конкретного процесса. Их постоянство для модели и природы позволяет перенести экспериментальные результаты на натуральный процесс. Предварительные модельные эксперименты (при подобии модели и природы) позволяет выявить условия результативного и безопасного разрыхления горной породы и применить их при натурном испытании. Это снижает затраты на строительство дорог, увеличивает объемы и качество строительных материалов, предприятия получают большую прибыль.

Примем, в первом приближении, следующие величины, характеризующие буровзрывные работы:

c – скорость звука в скальной породе,

g – ускорение силы тяжести,

E – модуль Юнга породы,

t – время замедления,

h – глубина установки заряда,

H – высота разлета кусков породы,
 a – расстояние между зарядами,
 ρ – плотность скальной породы,
 N – мощность устанавливаемого заряда.

Рассмотрим, в первом приближении, процесс взрывного рыхления скальных пород с механической точки зрения, который характеризуется семью величинами, имеющими разную размерность: $c, g, E, t, \ell, \rho, N$. В нашем случае, мы получаем четыре независимых критериев подобия. Представим размерности параметров процесса в виде следующей таблицы.

Таблица 1

Формулы размерностей используемых величин

Величины	Размерность	Формула размерности	Показатели степеней		
			[L]	[M]	[T]
$p_1 = c$	$м/сек$	$[L][T]^{-1}$	1	0	-1
$p_2 = g$	$м/сек^2$	$[L][T]^{-2}$	1	0	-2
$p_3 = E$	$Па$	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	-1	1	-2
$p_4 = t$	$сек$	$[T]$	0	0	1
$p_5 = h, H, a$	$м$	$[L]$	1	0	0
$p_6 = \rho$	$кг/м^3$	$[M][L]^{-3}$	-3	1	0
$p_7 = N$	$вт$	$[M][L]^2[T]^{-3}$	2	1	-3

Выберем три параметра t, a и ρ в качестве основных единиц (по числу первоначальных основных единиц измерения) и через них выразим остальные параметры в безразмерном виде. Выбранные параметры t, a и ρ независимы, так как соответствующий определитель не равен нулю:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 1 \neq 0 \quad (1)$$

Первый критерий подобия получаем из выражения:

$$\begin{aligned} [\pi_1] &= \frac{[c]}{[t]^{a_1}[h]^{b_1}[\rho]^{c_1}} = \frac{[L][T]^{-1}}{([T])^{a_1}([L])^{b_1}([M][L]^{-3})^{c_1}} = \\ &= [L]^{1-b_1+3c_1}[M]^{-c_1}[T]^{-1-a_1} = 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь индексы при показателях степени соответствуют порядковому номеру параметров в табл. 1. При трех основных единицах измерения и семи параметрах, характеризующих взрывные работы, будет четыре независимых критериев подобия. Применяя метод нулевых размерностей, имеем:

$$\begin{cases} 1-b_1+3c_1=0 \\ -c_1=0 \\ -1-a_1=0 \end{cases}, \text{ или } \begin{cases} b_1=1 \\ c_1=0 \\ a_1=-1 \end{cases}, \text{ откуда } \pi_1 = \frac{c}{t^{a_1}h^{b_1}\rho^{c_1}} = \frac{c}{t^{-1}h^1\rho^0} = \frac{ct}{h}. \quad (3)$$

Второй критерий подобия получаем из соотношения:

$$\begin{aligned} [\pi_2] &= \frac{[g]}{[t]^{a_2}[h]^{b_2}[\rho]^{c_2}} = \frac{[L][T]^{-2}}{([T])^{a_2}([L])^{b_2}([M][L]^{-3})^{c_2}} = \\ &= [L]^{1-b_2+3c_2}[M]^{-c_2}[T]^{-2-a_2} = 1, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{откуда } \begin{cases} 1-b_2+3c_2=0 \\ -c_2=0 \\ -2-a_2=0 \end{cases}, \text{ или } \begin{cases} b_2=1 \\ c_2=0 \\ a_2=-2 \end{cases}; \text{ таким образом, имеем:}$$

$$\pi_2 = \frac{g}{t^{a_2}h^{b_2}\rho^{c_2}} = \frac{g}{t^{-2}h^1\rho^0} = \frac{gt^2}{h}. \quad (5)$$

Третий критерий подобия требует, чтобы:

$$\begin{aligned} [\pi_3] &= \frac{[E]}{[t]^{a_3}[h]^{b_3}[\rho]^{c_3}} = \frac{[M][L]^{-1}[T]^{-2}}{([T])^{a_3}([L])^{b_3}([M][L]^{-3})^{c_3}} = \\ &= [L]^{-1-b_3+3c_3}[M]^{1-c_3}[T]^{-2-a_3} = 1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{или } \begin{cases} -1-b_3+3c_3=0 \\ 1-c_3=0 \\ -2-a_3=0 \end{cases}, \text{ или } \begin{cases} b_3=2 \\ c_3=1 \\ a_3=-2 \end{cases}, \text{ откуда}$$

$$\pi_3 = \frac{E}{t^{a_3} h^{b_3} \rho^{c_3}} = \frac{E}{t^{-2} h^2 \rho^1} = \frac{Et^2}{h^2 \rho}. \quad (7)$$

Четвертый критерий подобия получаем аналогично:

$$\begin{aligned} [\pi_4] &= \frac{[N]}{[t]^{a_7} [h]^{b_7} [\rho]^{c_7}} = \frac{[M][L]^2[T]^{-3}}{([T])^{a_7} ([L])^{b_7} ([M][L]^{-3})^{c_7}} = \\ &= [L]^{2-b_7+3c_7} [M]^{1+3c_7} [T]^{-3-a_7} = 1, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{или } \begin{cases} 2 - b_7 + 3c_7 = 0 \\ 1 - c_7 = 0 \\ -3 - a_7 = 0 \end{cases}, \text{ или } \begin{cases} b_7 = 5 \\ c_7 = 1 \\ a_7 = -3 \end{cases}, \text{ откуда:}$$

$$\pi_4 = \frac{N}{t^{a_7} h^{b_7} \rho^{c_7}} = \frac{N}{t^{-3} h^5 \rho^1} = \frac{t^3 N}{\rho h^5}. \quad (9)$$

Проверим размерность полученных критериев. Действительно имеем:

$$\begin{aligned} [\pi_1] &= \frac{[c][t]}{[h]} = \frac{[L][T]^{-1}[T]}{[L]} = 1, \quad [\pi_2] = \frac{[g][t^2]}{[h]} = \frac{[L][T]^{-2}[T]^2}{[L]} = 1, \\ [\pi_3] &= \frac{[E][t^2]}{[h^2][\rho]} = \frac{[M][L]^{-1}[T]^{-2}[T]^2}{[L]^2[M][L]^{-3}} = 1, \quad [\pi_4] = \frac{[t^3][N]}{[\rho][h^5]} = \frac{[T]^3[M][L]^2[T]^{-3}}{[M][L]^{-3}[L]^5} = 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Важным свойством критериев подобия является то, что входящие в них одноименные (имеющие одинаковую размерность) величины могут взаимно заменяться. Поскольку любая комбинация критериев представляет собой так же критерий подобия, то результат, конечно же, получился тот же, только изменилась форма их записи. Т.е. одна группа независимых величин может быть сведена к другой группе независимых величин и обе группы будут эквивалентны. Поэтому нетрудно получить классические критерии подобия, используя полученную группу критериев:

$$\pi_1 = \frac{ct}{h}, \quad \pi_2 = \frac{gt^2}{h}, \quad \pi_3 = \frac{Et^2}{h^2 \rho}, \quad \pi_4 = \frac{Nt^3}{\rho h^5}. \quad (11)$$

Так, критерий гомохронности или критерий Струхала будет:

$$Ho = Sh = \frac{\ell}{ct} = \frac{1}{\pi_1} = \frac{h}{ct}; \quad (12)$$

критерий Фруда (гравитационный):

$$Fr = \frac{v^2}{lg} = \pi_2 = \frac{gt^2}{h} = \frac{vt^2}{th} \cdot \frac{g}{g} \cdot \frac{v}{v} = \frac{v^2}{hg} \cdot \frac{gt^2}{tv} = \frac{v^2}{hg} \cdot \frac{vt^2}{t \cdot tv} = \frac{v^2}{hg}; \quad (13)$$

критерий Коши:

$$Ca = \frac{v}{\sqrt{E/\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\pi_3}} = \sqrt{\frac{h^2 \rho}{Et^2}} = \sqrt{\frac{h^2}{E/\rho \cdot t^2}} = \sqrt{\frac{v^2}{E/\rho}} = \frac{c}{\sqrt{E/\rho}}; \quad (14)$$

критерий Ньютона:

$$Ne = \frac{Ft^2}{m\ell} = \pi_4 = \frac{Nt^3}{\rho h^5} = \frac{F\ell}{t} \cdot \frac{t^3}{\rho h^5} = \frac{F}{\rho} \cdot \frac{t^2}{h^4} = \frac{Ft^2}{\rho Ah \cdot h} = \frac{Ft^2}{mh}. \quad (15)$$

Проведение буровзрывных работ при неудачном расположении зарядов может сопровождаться большим разбросом грунта и значительным расходом взрывчатого материала при низком качестве рыхления скального грунта. Поэтому, желательно экспериментально выяснить выгодные схемы расположения зарядов, чему поможет грамотно поставленный эксперимент.

В работе, методами теории подобия, получены четыре независимых критерия подобия процесса взрывного рыхления скальных пород, которые, в свою очередь, представлены в виде четырех классических критериев подобия: критериев Струхаля, Фруда, Коши и Ньютона. В дальнейшем, применяя линейное программирование, можно найти оптимальный баланс между расходом материала и денежными затратами при эффективном рыхлении скального грунта.

Литература

1. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. – 231 с.
2. Аверьянов В.И., Добрынин А.А. Взрывные работы вблизи городских и промышленных объектов // Горный журнал. 1999. № 11. – С. 78–80.
3. Авдеев Ф.А., Южаков С.В. Новый вид защиты от разлета кусков породы при взрывах // Взрывное дело. 1966. № 61/18. – С. 218-223.

4. Бабаянц Г.М., Евсин В.Г., Николаев К.П. Совершенствование взрывных работ на горнорудных предприятиях // Горный журнал. 1995. №12. – С. 40–42.

5. Лещинский А.В., Н.К. Лукашевич. Локализация взрывов в дорожном строительстве // Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. № 1. – С. 12-13.

6. Седов Л. И. Методы теории размерностей и теории подобия в механике. М.: Наука, 1981. – 448 с.

7. Курзанов А.Д., Оборина М.С. Обоснование возможности использования отходов горнодобывающей промышленности в производстве строительных материалов. // Инженерный вестник Дона, 2019, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5966/.

8. Гергарт Ю.А. Методика испытания горных пород на прочность неразрушающим методом при проходке транспортных тоннелей. // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2118/.

9. Ebrahim F. Salmi, Ewan J. Sellers. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design. Engineering Geology, 2021, Volume 281. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795220318676/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795220318676/).

10. Goodman R.E. Introduction to Rock Mechanics. Second edition. John Wiley & Sons, 1989. 562 p.

References

1. Tangaev I.A. E'nergoemkost' protsessov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh [Energy intensity of the processes of mining and processing of minerals]. Nedra, 1986. 231 p.

2. Averyanov V.I., Dobrynin A.A. Gornyy zhurnal. 1999. № 11. pp. 78-80.

3. Avdeev F.A., Yuzhakov S.V. Vzryvnoe delo, 1966, № 61/18, pp. 218-223.



4. Babayants G.M., Evsin V.G., Nikolaev K.P. Gornyy zhurnal. 1995. № 12. pp. 40-42.
5. Leshchinsky A.V., Lukashevich N.K. Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli. 2009. № 1. pp. 12-13.
6. Sedov L. I. Metody teorii razmernostey i teorii podobiya v mekhanike [Methods of the theory of dimensions and the theory of similarity in mechanics]. Nauka, 1981. 448 p.
7. Kurzanov A.D., Oborina M.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2019/5966/.
8. Gergart Yu. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2118/.
9. Ebrahim F. Salmi, Ewan J. Sellers. Engineering Geology, 2021, №281. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795220318676/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795220318676/).
10. Goodman R.E. Introduction to Rock Mechanics. Second edition. John Wiley & Sons, 1989. 562 p.