

УДК 622.232

МОДЕЛЬ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ ВЗРЫВОМ

MODEL TO STUDY THE PROCESS OF MOVING ROCK EXPLOSION

Катанов Игорь Борисович ,
докт. техн. наук, профессор, e-mail: noa-0025@yandex.ru
Katanov Igor B. ,Dr. Sc. (Eng.), Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: Описана полезная модель для наблюдения за процессом перемещения горной массы при взрывной подготовке ее к выемке. Приведены результаты обоснования рационального выбора эквивалентных материалов модели вскрышного уступа и источника энергии, имитирующего взрыв заряда ВВ. Такая конструкция модели позволяет изучать качественную картину раз渲ала горной массы при взрыве.

Abstract: Described a useful model for visual study of the process of displacement of rock mass when blasting preparation lower. The results of the rational justification of the choice of equivalent material models Strippling ledge and is the source of energy that simulates the explosion of the explosive charge. This design model allows us to study the qualitative picture of the collapse of the rock mass.

Ключевые слова: полезная модель, взрывные работы, открытые горные работы, взрыв, заряд ВВ, эквивалентные материалы.

Keywords: utility model, blasting, open pit mining, blast, explosive charge, equivalent materials.

Цель создания модели процесса перемещения горной массы взрывом состоит в возможности наглядного изучения процесса разрушения уступа и перемещения разрушенной породы с формированием раз渲ала. В учебных целях имитация процесса перемещения раздробленных горных пород энергией взрыва и формирование раз渲ала при отбойке горной массы, как на угольных, так и на рудных карьерах является актуальной задачей, поскольку позволяет студентам получить представление о результатах процесса подготовки горной массы к выемке.

Схематически процесс дробления породы описан довольно разнообразно. Первая попытка описать процесс разрушения массива горных пород под действием взрыва в случае неоднородности среды встречается в работах М. В. Мачинского [1, 2], который объясняет возникновение трещин в слабых местах взрываемого массива, как результат действия волны напряжения, после прохождения которой, трещины продолжают развиваться и в какой-то момент времени смыкаются. В результате горная порода оказывается раздробленной.

Физически глубоко обоснованные представления качественной картины действия взрыва на среду изложены в работах Г. И. Покровского [3], который рассматривая положение автомодельности распространения ударных волн при взрыве и основные энергетические зависимости, устанав-

ливает ряд параметров ударной волны, возникающей в среде при взрыве сферического заряда ВВ. Таким образом, определяются максимальное значение избыточного давления волны сжатия в твердой среде и время действия избыточного положительного давления в волне сжатия.

В вопросе разрушения горной среды взрывом А. Н. Ханукаев [4] придерживается теории, согласно которой процесс разрушения происходит под действием упругих волн. Основываясь на теории разрушения породы отраженной волной, выдвигается положение, по которому процесс разрушения пород в значительной степени зависит от их акустической жесткости. Произведение величин $\rho \cdot C$, где ρ – плотность среды; C – скорость распространения в массиве продольных волн, по мнению А. Н. Ханукаева, характеризует природу среды. При этом в зависимости от характера процесса разрушения породы разделяются их на три группы. К первой относятся породы с акустической жесткостью в пределах $10 \cdot 10^5 - 25 \cdot 10^5$ г/см²·см/с. Породы этой группы разрушаются в основном под действием прямых волн сжатия и отраженных волн от свободных поверхностей массива. Ко второй группе относятся породы с акустической жесткостью в пределах $5 \cdot 10^5$ до $10 \cdot 10^5$ г/см²·см/с, т. е. те, которые разрушаются как под действием волн сжатия и отражения, так и под непосредственным действием давления газов взрыва. К третьей группе относятся породы с аку-

стической жесткостью в пределах от $0,2 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ г/см²·см/с. Породы этой группы разрушаются главным образом от фугасного действия взрыва по направлению от заряда к свободной поверхности. Характер разрушения пород обусловлен количеством энергии, переносимой ударной волной в определенный период времени. Этот отрезок времени зависит от амплитуды волны, которая в свою очередь, зависит от интенсивности и продолжительности действия давления газов взрыва на породу, окружающую заряд.

Японский исследователь Кутао Хино [5] объясняет механизм разрушения пород с позиции теории разрушения отраженной волной. Взгляды японского исследователя во многом совпадают с концепциями А. Н. Ханукаева.

Е. П. Максимова [6], проводя экспериментальные взрывы на бетонных кубиках, пришла к заключению, что основной объем разрушений вызывается трещинами, распространяющимися от зарядной камеры. Объем разрушений, произведенный отраженными волнами, незначителен.

А. Ф. Беляев и М. А. Садовский [7], рассматривая вопрос о природе бризантного и фугасного действия взрыва, разделяют разнообразные формы разрушения твердой среды на два вида. Первый вид – разрушение среды в непосредственной близости от заряда, проявляющееся в переизмельчении среды фронтальной частью импульса взрыва. Второй вид разрушения среды формируется за пределами зоны бризантного действия, проявляющийся в трещинообразовании и сдвигении за счет основной части энергии взрывной волны. Авторы отмечают, что повышение полезной работы может быть достигнуто более благоприятным перераспределением полной работы взрыва по отдельным формам, а также уменьшением потерь. Увеличения полезной формы работы можно добиться, снижая бризантное действие взрыва и увеличивая фугасное.

Обобщенные представления Ф. А. Баума о механизме разрушения породы взрывом, по-видимому, наиболее полно отражают существенные стороны этого процесса, протекающего под совокупным воздействием продуктов детонации (ПД), ударных волн (УВ) и волн разгрузки (разрежения). Во времени и по природе физических явлений, определяющих его, взрыв характеризуется несколькими последовательными стадиями [8]. При начальной стадии процесса основную роль играют расширяющиеся ПД, которые в первый момент находятся под давлением порядка 10⁵ кг/см². Расширение ПД протекает изэнтропически – сначала по закону $PV^3 = const$ (от $P_{нач}$ до некоторого P_K), а затем при более низких давле-

ниях – по закону $PV^\gamma = const$. На этой стадии развития взрыва в горном массиве происходит пластическое течение породы, возникновение радиальных трещин и ее дробление. На контакте

заряд-порода, действует закон сжимаемости, определяющий начальные параметры и ряд закономерностей распространения ударных волн. Вторая стадия процесса, начинается после выхода УВ на свободную поверхность. Она связана с распространением отраженной от этой поверхности волны разрежения и ее взаимодействием с хвостовой частью бегущей волны сжатия. В результате этого процесса в породе возникают значительные растягивающие напряжения и в конечном итоге происходят новые трещинообразования. Пересечение этих трещин и естественных микро- и макротрещин, имеющихся в породе, с системой радиальных трещин, возникающих (вернее, потенциально наметившихся) в ней на предыдущей стадии развития взрыва, приводит к образованию пространственной сетки трещин, характер которой в определенной мере предопределяет возможные размеры и количество раздробленных при взрыве кусков породы. Роль откольных явлений в процессе дробления пород взрывом очень невелика. Третья, заключительная стадия процесса сводится в основном к воздействию на породу уже расширившихся до $r = r_{kp}$ продуктов детонации (ПД). К моменту полного своего расширения ПД еще содержат около 50 % энергии взрыва от общего ее количества. Под воздействием этой энергии происходят различные виды доразрушения породы (проникание газов в трещины, отрыв отдельных кусков от массива и т.п.), перемещение разрушенной массы породы и разлет отдельных кусков массива.

Некоторые дополнительные данные о взаимозависимости интенсивности дробления от различных физических факторов взрыва и среды содержатся в работах Ф. И. Кучерявого, и М. Ф. Друкованного [9, 10], которые экспериментально доказали, что на интенсивность дробления горных пород наряду с величиной давления на фронте волны значительное влияние оказывает время действия взрыва на массив.

Анализ научной информации показывает, что представления различных авторов о механизме разрушения породы взрывом, взятые в отдельности, не дают полного объяснения этого сложного физического процесса. Отдать предпочтение тому или иному мнению невозможно, поскольку каждое из них в большей или меньшей степени соответствует определенным горнотехническим условиям.

При взрывной подготовке горных пород к выемке форма раз渲а определяется его параметрами (шириной и высотой). Фугасное действие взрыва приводит в формированию раз渲а породы определенной формы, параметры которого можно определить путем математического моделирования, представленного в работе [11].

Управлять параметрами раз渲а можно изменением последовательности взрывания зарядов. На практике форма раз渲а определяется технологией отработки горной массы. При транспортной

технологии должна быть обеспечена компактность раз渲ала. В этом случае его ширина и высота соответствуют рабочим параметрам выемочно-погрузочного оборудования. При бестранспортной технологии необходимо обеспечить наибольшее перемещение породы во внутренний отвал. В этом случае ширина раз渲ала должна быть максимально возможная.

Наглядное представление о механизме разрушения с некоторыми допущениями может дать только физическая модель. Техническим результатом физического моделирования является упрощение процесса восприятия результатов эксперимента и повышение безопасности при моделировании взрыва горных пород.

В настоящее время существует два основных подхода к моделированию процесса дробления. Один из них основан на подобии упругих волн, а второй метод предполагает использование эквивалентных материалов. Оба метода не лишены недостатков, так как предполагают внесение в процесс моделирования ряда допущений. Однако благодаря этим допущениям процесс моделирования становится возможным при выполнении геометрического и временного подобия, подобия полей напряжений и прочностных характеристик пород. В простейшем случае физическая модель взрыва горной породы воспроизводит изучаемое явление с сохранением геометрического подобия и физическую природу, отличаясь от натуры лишь размерами и скоростью протекания процесса. В более сложных случаях модель изготавливается из среды, отличной от натуры, но при обязательном соблюдении условий подобия, т. е. используется модель из эквивалентных материалов. В основе метода лежит теория механического подобия Ньютона, которая предполагает геометрическое, кинематическое и динамическое подобия в соответствии с изучаемой задачей. При этом в качестве исходных материалов для модели применяют песок, споду, мел, глину и вяжущие вещества – гипс, парафин, вазелин, которые должны отвечать

определенным требованиям по чистоте, размерам и другим физическим свойствам. Кроме требований механического подобия необходимо учесть условия динамического подобия воздействия взрыва, которые сводятся к выбору типа ВВ, способного вызвать эффект, что и взрыв в натуре.

Для изучения процесса перемещения горной массы взрывом создаются модели взрывного уступа с подбором эквивалентных материалов для формирования тела модели. Например, используется дискретная среда с образцом породы, в которой устанавливается скважинный заряд. При этом учитывается распределение энергии взрыва в ближней зоне [12]. Условия подобия материала модели, имитирующего горный массив по прочностным свойствам, сводятся к тому, чтобы диаграмма прочности модели была подобна соответствующей диаграмме натуры [13].

Например, для вскрышных пород угольных разрезов Кузбасса средняя плотность составляет $2,5 \cdot 10^3$ кг/м³ с временными сопротивлением однозначному сжатию около 60 МПа. Поэтому необходимо при формировании модели учитывать масштаб моделирования из соотношения, связывающего через масштаб напряжений диаграммы прочности модели σ_m и натуры σ_n .

Известно, что наиболее подходящим эквивалентным материалом является песчано-цементная смесь, состоящая из портландцемента марки 400, воды и песка в весовом соотношении 1:2:7, которая позволяет получить эквивалентный материал с прочностной характеристикой $[\sigma_{сжм}]$.

Технология изготовления элементов модели (кубиков) предусматривает использование разборных форм, в которые укладывается песчано-цементная смесь, полученная в турбулентном смесителе. Для получения элементов модели необходимой прочностной характеристики используется виброплощадка, обеспечивающая плотность заполнения форм, пропарочная камера и сушильный шкаф. В камере нормального хранения эле-

а



б

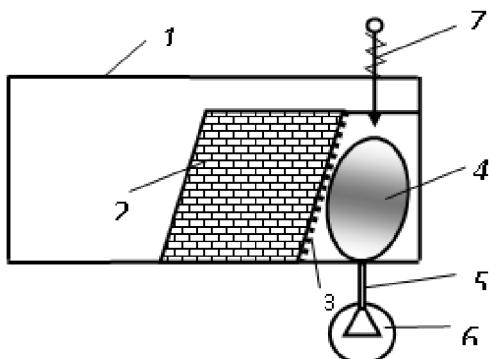


Рис. 1. Модель процесса раз渲ала горной массы взрывом: а – общий вид; б – схема; 1 – корпус камеры; 2 – модель уступа; 3 – перфорированная перегородка; 4 – эластичная оболочка; 5 – воздухопровод; 6 – компрессор

менты модели выдерживаются 28 суток. Затем каждая партия элементов модели испытывается на одноосное сжатие по ГОСТ 5802 – 66. Элементы используются для составления модели уступа если средние значения характеристик $\gamma_{\text{ср}}=1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

и $[\sigma_{\text{сжм}}]_{\text{ср}} = 2,1 \text{ МПа}$ отвечают граничным условиям с коэффициентами вариации соответственно 0,5 и 3,8 %. Тогда на основании $[\sigma_{\text{сжм}}]_{\text{ср}} = \frac{2,1}{60} = M_{\sigma_{\text{сж}}}$, масштаб моделирования определяется равным 1:30, а формирование моделей с размерами $250 \times 250 \times 250 \text{ мм}$ из элементов (кубиков) с ребром 50,0 мм соответствует диаметрам естественных отдельностей пород средней крепости и блочности.

Недостатком таких моделей при изучении процесса разрушения массива в студенческой аудитории является то, что в них используется взрывчатое вещество, а это в условиях учебного процесса недопустимо по фактору обеспечения безопасности.

Наиболее приемлемыми вариантами в условиях учебного изучения процесса разрушения породы взрывом является использование моделей, в которых имитатором скважинного заряда является энергия сжатого воздуха [14]. Однако при использовании в моделях распределительного устройства, которое позволяет управлять последовательностью срабатывания зарядов, давление сжатого воздуха в системе меняется по мере срабатывания эластичных полостей. Причем перфорированные эластичные полости не создают ударного воздействия сжатого воздуха на грунт модели.

На основании анализа известных технических решений и задачи по обеспечению безопасности при моделировании процесса разрушения горного массива взрывом заряда ВВ была разработана полезная модель [15].

В модели (рис. 1), состоящей из камеры 1 с прозрачными боковыми стенками, внутри которой располагается уступ 2 с моделируемым грунтом. На дне камеры устанавливается ряд штуцеров, на которые устанавливаются эластичные оболочки 4. Эластичные оболочки 4 соединяются воздухопроводом 5 с компрессором 6. К перфорированной перегородке 3, выполняющей роль стенки взрывной камеры, прикреплены подпружиненные трошки 7, которые со стороны взрывной камеры имеют вид игл, а с другой стороны закреплены в спусковом механизме.

При нажатии на кнопку «взрыв», планка спускового механизма нажимает на иглы, отрегулированные по длине так, что эластичные оболочки 4, наполненные сжатым воздухом до 0,2 МПа прокалываются либо одновременно, либо в заданной последовательности, и результате фугасного действия сжатого воздуха перемещается материал, из которого был смоделирован породный уступ 2. Формируется развал. При этом выполняется основная цель – моделируется процесс перемещения взорванной породы.

Заключение

Изготовленная по патенту RU 155908 полезная модель может использоваться в учебном процессе при изучении дисциплин «Технология и безопасность взрывных работ», «Процессы открытых горных работ» и «Основы горного дела».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачинский, М. В. Опыт построения теории раздробления горных пород взрывом // Журнал технической физики. – 1933. Т. 3. вып. 2-3.
2. Мачинский, М. В. Теория расчета зарядов // Сб.: Взрывное дело № 26. – М.: ОНТИ, 1936. – С. 12–38.
3. Покровский Г. И. Взрыв. – М.: Недра, 1973. – 182 с.
4. Ханукаев, А. Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. – М.: Недра, 1974. – 224 с.
5. Kutao Hino. Effect of discontinuity of rock on fragmentation of the industrial explosives society. Japan, vol. 18, № 14, October, 1957
6. Максимова, Е.П. Моделирование процесса взрывного разрушения. Сб.: Вопросы горного дела. – М.: Углехиздат, 1958.
7. Беляев, А. Ф. О природе фугасного и бризантного действия взрыва. Физика взрыва / А. Ф. Беляев, М. А. Садовский // Сб. научн.-исслед. работ АН СССР, 1952. – № 1.
8. Баум, Ф. А. Процессы разрушения горных пород взрывом // Сб.: Взрывное дело № 52/9. – М.: Госгортехиздат, 1963. – С. 262–285.
9. Друкованый, М. Ф. Управление действием взрыва скважинных зарядов на карьерах / М.Ф. Друкованый, В. С. Куц, В. И. Ильин. – М.: Недра, 1980. – 223 с.
10. Кучерявый, Ф. И. Короткозамедленное взрывание на карьерах / Ф.И. Кучерявый, М. Ф. Друкованый, Ю. В. Гаек. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 267 с.
11. Сысоев А. А. Обоснование технологический решений на разрезах / А. А. Сысоев, О. И. Литвин, Я. О. Литвин; КузГТУ. – Кемерово. 2015. – 126 с.
12. Ваганян И. Ф. Физическое моделирование действия взрыва и процесса разрушения горных пород взрывом. И. Ф. Ваганян, В. А. Боровиков. Л. : Изд. ЛГИ, 1984. С. 30–31.

13. Катанов И. Б. Обоснование технологических характеристик пеногелевой забойки взрывных скважин. Вестник КузГТУ № 5 (50). 2005. С. 50-54.
14. Адушкин В. В. Моделирование взрывов на выброс при помощи лабораторной вакуумной установки. В. В. Адушкин, В. Н. Родионов. В кн. : Взрывное дело, № 64/21. М. : Недра. С. 24–42.
15. Наумов В. М. Устройство для моделирования взрыва. В. М. Наумов, Б. Д. Бурлацкий/ а. с. 1261402 SU F 42 D 1/00.
16. Катанов И. Б. Модель процесса перемещения взорванной породы. И. Б. Катанов, О. И. Литвин/ патент на полезную модель RU 155908 U1 F42D 1/00 G01N 33/22.

REFERENCES

1. Machinski, M. V. the development of the theory of fragmentation of rocks by explosion // technical physics. – 1933. Vol. 3. vol. 2-3.
2. Machinski, M. V. the Theory of the calculation of charges // Proc.: The explosive case No. 26. – Moscow: ONTI, 1936. – S. 12-38.
3. Pokrovsky G. I. Explosion. – M.: Nedra, 1973. – 182 p.
4. Khanukaev, A. N. Physical processes at breaking of rocks by explosion. – M.: Nedra, 1974. – 224 p.
5. Kutao Hino. Effect of discontinuity of rock on fragmentation of the industrial explosives society. Japan, vol. 18, No. 14, October, 1957.
6. Maksimov, E. P. modeling of the process of explosive destruction. Sat.: Issues of mining. – M.: Whiteheat, 1958.
7. Belyaev, A. F. On the nature of explosive and blasting of explosion. Blast physics / A. F. Belyaev, M. A. Sadovskii // Proc. scientific.-issled. works of the USSR, 1952. – No. 1.
8. Baum, F. A. the Processes of destruction of rocks by explosion // SB.: The explosive case No. 52/9. – M.: Gosgortekhizdat, 1963. – P. 262-285.
9. Drukovanyy, M. F. Control of the force of the explosion of borehole charges in quarries / M. F. Drukovanyy, V. S. Kuts, V. I. Ilyin. – M.: Nedra, 1980. – 223 p.
10. Curly, F. I. short-delay blasting in quarries / F. I. Kucheryavyi, M. F. Drukovanyy, J. V. Nuts. – M.: Gosgortekhizdat, 1962. – 267 p.
11. Sysoev, A. A. Substantiation of technological solutions in the slits / A. A. Sysoev, O. I. Litvin, O. Y. Litvin; KuzGTU. – Kemerovo. 2015. – 126 p
12. Vaganian I. F. Physical simulation of explosion and the process of destruction of rocks by explosion. F. I. Vahanyan, V. A. Borovikov. L. : Izd. LIE, 1984. S. 30-31.
13. Katanov I. B. justification of the technological characteristics peopleway stemming of blast holes. Bulletin Of The Kuzbass State Technical University No. 5 (50). 2005. S. 50-54.
14. Adushkin V. V. Modeling of explosions in the release by the laboratory vacuum installation. V. V. Adushkin, V. N. Rodionov. In the book. : The explosive case No. 64/21. M. : Nedra. P. 24-42.
15. Naumov, V. M. Device for simulation of explosion. V. M. Naumov, B. D. Burlac-cue/. S. 1261402 SU F 42 D 1/00.
16. Katanov I. B. model of the process of moving the blasted rock. I. B. Katanov, O. I. Lytvyn/ / patent for useful model RU 155908 U1 F42D 1/00 G01N 33/22.

Поступило в редакцию 22.11.2016
Received 22 November 2016