



**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ
НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

Н. Н. Ефремовцев, И. Е. Шиповский

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: efremovtsev_n@ipkonran.ru, shipovskiy_i@ipkonran.ru,
Крюковский тупик 4, г. Москва 111020, Россия*

Обусловлена необходимость расширения возможностей управления действием взрыва для получения равномерной рациональной фрагментации горной массы с минимальным выходом негабаритных и мелких некондиционных фракций. Рассмотрены методологические вопросы применения метода сглаженных частиц для трехмерного моделирования и исследования закономерностей динамического нагружения массива, равномерности и интенсивности дробления в различных зонах действия взрыва, а также вопросы калибровки двухмерных и трехмерных моделей. Метод откалиброван путем моделирования процесса фрагментации взрывом в сравнении с результатами экспериментов взрывного разрушения образцов горной породы при взрыве удлиненного скважинного заряда. Проведены работы по изучению влияния параметров буровзрывных работ и кинетики выделения энергии на интенсивность и равномерность фрагментации. Установлены закономерности влияния удельного расхода промышленных взрывчатых веществ, скорости выделения энергии, расстояния между скважинами, диаметра скважинных зарядов, а также величины воздушного промежутка на интенсивность и равномерность дробления в различных зонах действия взрыва.

Взрывчатое вещество, плотность взрывчатого вещества, диаметр заряда, зоны действия взрыва, физические эксперименты, компьютерное моделирование, метод сглаженных частиц, интенсивность и равномерность дробления

**NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DRILLING
AND BLASTING PARAMETERS ON ROCK BREAKING UNIFORMITY**

N. N. Efremovtsev and I. E. Shipovskii

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences,
E-mail: efremovtsev_n@ipkonran.ru, shipovskiy_i@ipkonran.ru,
Kryukovskiy tupik 4, Moscow 111020, Russia*

The necessity of expanding the possibilities for controlling the explosive action to obtain a uniform rational fragmentation of the run-of-mine with a minimum yield of oversized and fine low-grade fractions is substantiated. The methodological problems of applying the smoothed particle method for 3D modeling and studying the patterns of dynamic loading of a rock mass, the uniformity and intensity of crushing in different explosive zones, as well as problems of two- and three-dimensional model calibration are considered. The method is calibrated by simulating the fragmentation process by an explosion in comparison with experimental results on blasting rock samples during the explosion of an elongated borehole charge. Work was carried out to study the influence of drilling and blasting parameters and kinetics of energy release on the intensity and uniformity of fragmentation. The regularities of the effect produced by specific consumption of industrial explosives, the rate of energy release; the distance between boreholes, the diameter of borehole charges, as well as air gap values on the intensity and uniformity of crushing in different explosive zones are determined.

Explosive, explosive density, charge diameter, explosive zones, physical experiments, computer simulation, smoothed particle method, intensity and uniformity of crushing

Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска закономерностей фрагментации горных пород в различных зонах действия взрыва при изменении параметров буровзрывных работ с целью снижения выхода негабаритных и мелких некондиционных фракций.

Методика исследований для шпуровой отбойки в подземных условиях предусматривает использование имитационных композиционных моделей с выделением цветом зон действия взрыва [1] в совокупности с двухмерным или трехмерным компьютерным моделированием методом сглаженных частиц. Калибровка численной модели проводилась по данным физических экспериментов путем переноса параметров композиционной модели в цифровую модель, корректировки показателей взрываемой среды и сопоставлении результатов гранулометрического анализа. Коэффициент корреляции полученных зависимостей превышает значение 0.98.

Целесообразность применения метода сглаженных частиц [2–4] обусловлена отсутствием расчетной сетки, что дает возможность проведения численных исследований динамических взаимодействий неоднородных объектов при взрывном нагружении. При этом расчеты сопровождаются наглядной визуализацией результатов. Рассматривалось действие энергии взрыва зарядов сложной конструкции (с промежутками, заполненными различными материалами) на гомогенные и трещиноватые массивы с нелинейными границами и с существующими горными выработками.

Для калибровки модели действия скважинных зарядов дробящего и щадящего действия с различной кинетикой выделения энергии использовались трехмерные численные модели взрывааемых сред с однородной и сложной внутренней структурой. При этом рассматривались численные модели детонационных систем зарядов в соответствии с типовыми, утвержденными на конкретном предприятии параметрами буровзрывных работ при различном диаметре скважин.

Важной частью исследований являлось изучение закономерностей распределения в массиве зон пластической деформации и разрушения при применении зарядов различной конструкции с соответствующей кинетикой выделения энергии, в том числе зарядов с заполненными воздухом или различными материалами промежутками. При этом в качестве критерия разрушения используется условие превышения предела прочности на растяжение в породе нагружаемого взрывом массива.

Разработана и апробирована методология исследований с помощью метода сглаженных частиц в пределах взрываемого блока, предусматривающая проведение расчетов напряженно-деформированного состояния и разрушения горной породы и системный анализ результатов трехмерных расчетов методом сглаженных частиц с выделением до 15 зон действия взрыва. Отдельно выполнялись расчеты в областях между зарядами, в приоткосной зоне действия верхнего и нижнего зарядов, воздушного промежутка, в зоне забойки, в области перебура, а также в зоне между скважинами и плоскостью отрыва. В каждой выделенной части массива j с шагом 0.5 м от заряда определялось общее число разрушенных N_{Bj} и учитываемых фрагментов массива N_{Oj} , а также плотность разрушенных фрагментов в относительных единицах P_{Bj} по формуле:

$$P_{Bj} = \frac{N_{Bj} \cdot 10^2}{N_{Oj}}, \% \quad (1)$$

При построении модели учитываются данные о физико-механических свойствах пород, параметры взрываемого блока, конфигурация откоса уступа. Калибровка компьютерной модели осуществлялась по результатам взрывов в производственных условиях. При этом для формирования цифровой модели используются параметры реального взрывааемого блока с расположением и конструкцией зарядов, выбранными в соответствии с паспортом буровзрывных работ базового физического эксперимента.

Для каждой выделенной зоны проводились исследования закономерностей локализации и изменения во времени напряжений и концентрации разрушенных фрагментов массива в зависимости от диаметра скважины, расстояния между зарядами, удельного расхода ПВВ и скорости выделения энергии. В статье представлены результаты численного моделирования действия взрыва при двухрядном взрывании известняков прочностью $350\text{--}400\text{ кг/см}^2$ с применением рассредоточенных зарядов в скважинах высотой 10 м, диаметром 115 и 80 мм.

Геометрические и численные модели. Начальная конфигурация расчетной области геометрической модели детонационной системы для взрывного нагружения блока горного массива несколькими скважинными зарядами показана на рис. 1.

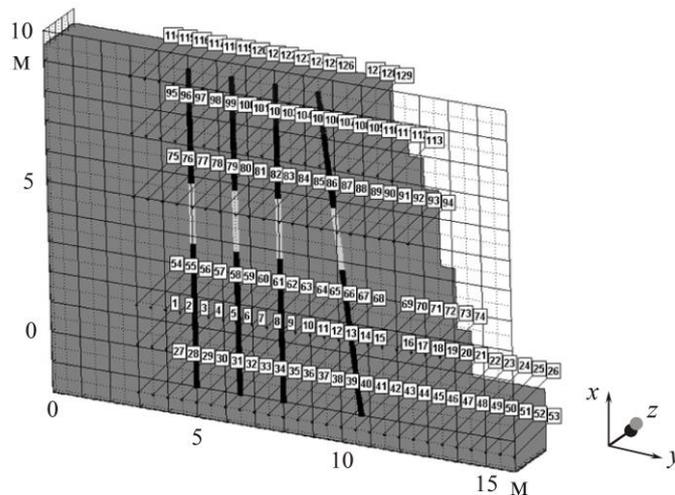


Рис. 1. Пример начальной конфигурации расчетной области при использовании скважин с воздушными промежутками

В модели сформированы скважины с заданным диаметром и параметрами буро-взрывных работ. В начальный момент времени полагается, что горная порода находится в ненапряженном и недеформированном состоянии. Внешние границы блока свободны от напряжений. Свойства материала блока горной породы задаются модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, плотностью, пределами прочности, пределом текучести и углом внутреннего трения. Метод сглаженных частиц не только может моделировать процесс разрушения горной породы и возникающую в результате фрагментацию, но также может хорошо отражать основные характеристики взрывных работ, т. е. образование во времени областей пластической деформации, развитие протяженных магистральных трещин и дробления.

Результаты расчетов. В результате проведенных исследований с применением численной модели получены графические изображения локализации в пространстве полей пластической деформации (темно серый цвет) и фрагментов нагружаемой взрывом среды, разрушенной в соответствии с заданным критерием разрушения (черный цвет). На рис. 2 представлены графические изображения состояния массива после подрыва скважинных зарядов АС/ДТ-6 диаметром 115 мм с базовым и увеличенным расходом ПВВ и зарядами диаметром 80 мм.

На рис. 3а, б показаны изменения на макроуровне в относительных единицах плотности локализации разрушений (рассчитанных по формуле (1)) с увеличением расстояния от заряда в зоне забойки и в отметках действия взрыва верхнего заряда в приоткосной зоне его действия, а также между зарядами в смежных скважинах. Характер изменения плотности разрушения обусловлен нелинейным изменением напряжений с расстоянием от заряда, результатами совместного воздействия прямых и отраженных волн напряжений, формируемых взрывом нескольких зарядов (рис. 3в).

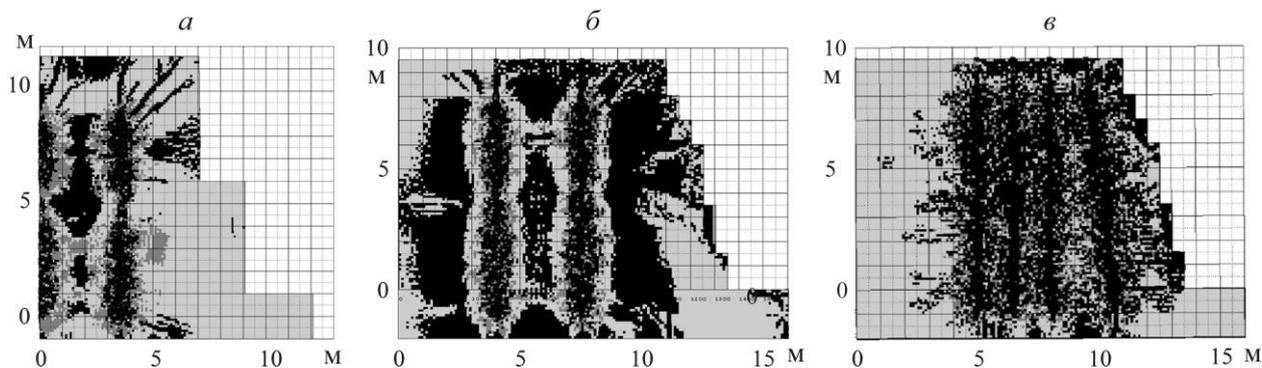


Рис. 2. Графическое изображение состояния участка взрываемого блока при применении зарядов взрывчатого вещества АС/ДТ-6 в скважинах 115 мм при базовом (а), увеличенном (б) расходе ПВВ, а также при применении скважинных зарядов диаметром 80 мм (в)

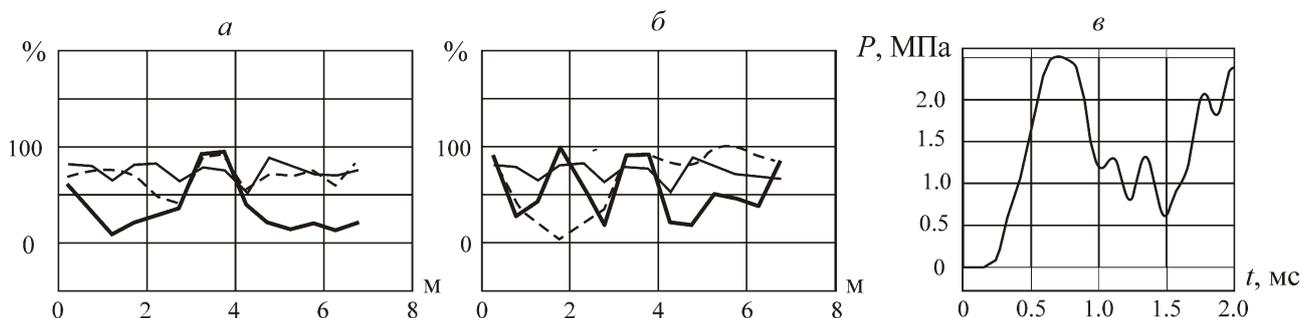


Рис. 3. Изменение плотности разрушения: а — в зоне забойки с расстоянием от дальнего заряда; б — в отметках верхних зарядов соответственно для трех вариантов параметров БВР; в — изменение во времени первого инварианта тензора напряжений в приоткосной части массива на расстоянии 1.0 м от заряда

На рис. 3а, б сплошной жирной линией обозначено изменение плотности разрушений с расстоянием от зарядов при базовом расходе АС/ДТ-6 в скважинах 115 мм согласно паспорту буровзрывных работ (БВР), пунктирной — изменение плотности разрушений с расстоянием от двух зарядов при увеличенном на 20 % расходе ПВВ в скважинах диаметром 115 мм, сплошной тонкой линией — изменение плотности разрушений на различных расстояниях от четырех зарядов диаметром 80 мм. При этом значения плотности разрушений зависят от расстояния до заряда в скважине и свободной поверхности откоса уступа. Нелинейный характер изменения плотности зон разрушения с увеличением расстояния от заряда обусловлен волновым характером нагружения массива с наличием нескольких импульсов при детонации удлиненных зарядов (рис. 3в), взаимодействием волн напряжений зарядов смежных скважин, а также прямых и отраженных от свободной поверхности волн. На рис. 4 показаны зависимости изменения первого инварианта напряжений от расстояния до зарядов с различным диаметром.



Рис. 4. Изменение первого инварианта тензора напряжений, создаваемых взрывом заряда АС/ДТ-6 диаметром 115 мм (сплошная линия) и 80 мм (пунктирная линия) с расстоянием от заряда

Зависимость максимальных значений напряжений с удалением от скважины имеет экспоненциально убывающий характер независимо от диаметра заряда. Этот факт обуславливает локализацию максимальных значений плотности разрушения вблизи осей скважинных зарядов. Волновые процессы, происходящие в различных зонах взрывааемых геосред, могут быть описаны аналитически вейвлет функциями или степенными полиномами.

Численные значения плотности разрушений и их стандартных отклонений в нескольких зонах и областях действия взрыва системы удлиненных зарядов диаметром 115 и 80 мм представлены в таблице.

Значения плотности локализации разрушений N_{Bj} и их стандартных отклонений при различном удельном расходе АС/ДТ-6 и диаметре скважинных зарядов в различных зонах действия взрыва

Наименование вариантов параметров буровзрывных работ и зон действия взрыва	Плотность локализации разрушения N_{Bj} , %	Стандартное отклонение N_{Bj} , доли ед.	Относительное изменение N_{Bj} , доли ед.	Относительное изменение стандартного отклонения N_{Bj} , доли ед.
Вариант 1. Зона забойки в приоткосной части	22.00	26.90	1.00	1.00
Вариант 1. Зона забойки между скважинами	36.70	24.78	1.67	0.92
Вариант 2. Зона забойки в приоткосной части	68.80	19.60	3.12	0.73
Вариант 2. Зона забойки между на участке между скважинами	61.10	15.55	2.78	0.58
Вариант 3. Зона забойки в приоткосной части	75.40	7.20	3.43	0.27
Вариант 3. Зона забойки на участке между скважинами	59.60	11.32	2.71	0.42
Вариант 1. Зона действия взрыва в отметках верхних зарядов в приоткосной части	49.28	27.04	2.24	1.00
Вариант 1. В отметках верхних зарядов между скважинами	61.14	30.91	2.77	1.15
Вариант 2. В отметках верхних зарядов в приоткосной части	78.7	8.76	3.58	0.32
Вариант 2. В отметках верхних зарядов между зарядами	57.3	34.49	2.60	1.28
Вариант 3. В отметках верхних зарядов в приоткосной части	77.1	9.85	3.50	0.37

Видно, что численные значения плотности разрушения в зонах действия взрыва отличаются в 1.7–3.7 раза, а значения стандартных отклонений плотности разрушений в 1.4–3.8 раза при изменении удельного расхода ПВВ и диаметра зарядов и соответствующих расстояний между скважинами. Это подтверждает целесообразность оценки фрагментации горной массы по предлагаемой схеме, предусматривающей, в отличие от предшествующих исследований [5], существенно большее число зон и областей для дифференцированной оценки и системного анализа особенностей действия взрыва на массив горных пород в пределах взрываемого блока.

ВЫВОДЫ

Результаты анализа численных экспериментов данных, полученных с помощью трехмерной модели методом сглаженных частиц, подтверждают целесообразность дифференцированной оценки фрагментации массива горных пород по выделенным зонам действия взрыва. На интенсивность и равномерность дробления участков взрываемого блока существенное влияние оказывает удельный расход ПВВ, а при равном удельном расходе ПВВ — диаметр применяемых скважин и расстояние между зарядными полостями. Так, с увеличением удельного расхода ПВВ в 1.2 раза, интенсивность дробления в зоне забойки возрастает в 1.64–3.13 раз. При этом стан-

дартное отклонение плотности разрушений снижается в 1.10–1.35 раза. При уменьшении диаметра бурения зарядов с 115 до 80 мм интенсивность и равномерность дробления в зоне забойки увеличивается в 2.7–3.4 раза, а стандартное отклонение снижается в 1.70–3.75 раза.

Изменение плотности разрушаемых участков взрываемого блока с изменением расстояния от оси скважинных зарядов может быть описано степенным полиномом с коэффициентами корреляции 0.95–0.98 или семейством вейвлет-функций.

Нелинейный характер изменения интенсивности локализации разрушений в отдельных зонах действия взрыва обусловлен, в частности, экспоненциально убывающей зависимостью первого инварианта напряжений от расстояния до заряда, а также волновым характером нагружения массива с наличием нескольких импульсов при детонации удлиненных зарядов и взаимодействием прямых и отраженных от свободной поверхности волн напряжений.

Практическим выходом исследований является совершенствование методологии корректировки параметров буровзрывных работ, выбора оптимальной конструкции зарядов и кинетики выделения энергии применяемых пластичных взрывчатых веществ, обеспечивающих снижение выхода мелких и некондиционных фракций за счет повышения равномерности нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Efremovtsev N. N., Trofimov V. A., and Shipovskii I. E.** Localization of deformations in a wave field induced by explosion of lengthy charge, *Mining Information and Analysis Bulletin*, 2020, no. 8, pp. 73–85. [Ефремовцев Н. Н., Трофимов В. А., Шиповский И. Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлиненного заряда // ГИАБ. — 2020. — № 8. — С. 73–85].
2. **Potapov A. P., Roys S. I., and Petrov I. B.** Modeling of wave processes with smoothed particle hydrodynamics method, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2009, vol. 21, no. 7, pp. 20–28. [Потапов А. П., Ройз С. И., Петров И. Б. Моделирование волновых процессов методом сглаженных частиц // Математическое моделирование. — 2009. — Т. 21. — № 7. — С. 20–28.]
3. **Graya J. P., Monaghan J. J.**, Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, vol. 135, pp. 259–283.
4. **Xuejun Wang**, Numerical simulation of heterogeneous material failure by using the smoothed particle hydrodynamics method, Nanyang Tech. University, PHD thesis, 2009, 273 p.
5. **Crushing** of rocks by explosion in quarries, Monograph, N. N. Kazakov, S. D. Viktorov, A. V. Shlyapin, I. N. Lapikov, Ed. K. N. Trubetskoy, Moscow, RAS, 2020, 520 pp. [Дробление горных пород взрывом в карьерах. Монография / Н. Н. Казаков, С. Д. Викторов, А. В. Шляпин, И. Н. Лапиков. Ред. К. Н. Трубецкой. — М.: РАН, 2020. — 520 с.]