

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЛИЯНИЯ НА ДРОБЯЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ И ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА

Н. Н. Ефремовцев¹, И. Е. Шиповский¹

¹ ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова
Российской академии наук, 111020, Москва, Крюковский тупик, д.4, Россия

Аннотация: Современные условия развития горнодобывающих предприятий характеризуются необходимостью снижения техногенного воздействия взрывных работ, а также увеличения объемов исследований, направленных на цифровизацию процессов горного производства и все более широкое применение методов численного моделирования разрушения горного массива. Усложнение геомеханических условий разработки месторождений с увеличением глубины их разработки требует совершенствования методологии прогнозирования и расчета выхода фракций горной массы различной крупности. В данной работе приводятся результаты таких исследований влияния плотности взрывчатых веществ различной энергетической насыщенности, внешнего давления и трещиноватости массива на выход мелких фракций, определяющий содержание пыли в атмосфере после массового взрыва на участке горного массива с обнаженной поверхностью. Установлены закономерности фрагментации при совместном воздействии напряжений в массиве и энергии взрывного разрушения. Получены некоторые зависимости, характеризующие фрагментацию массива в зависимости от плотности используемых взрывчатых веществ (ВВ). Получены результаты моделирования действия взрыва одиночного заряда на монолитный массив с внешней свободной поверхностью и массив с трещинами. Показано принципиальное различие характера локализации трещин в монолитном массиве и при наличии трещин, а также возникающих напряжений на различном расстоянии от заряда до и между трещинами.

Работа выполнена в рамках бюджетной тематики ИПКОН РАН.

Ключевые слова: взрывчатое вещество (ВВ), плотность ВВ, диаметр заряда, зоны действия взрыва, геомеханические условия, численное моделирование, метод сглаженных частиц (SPH).

Для цитирования: Ефремовцев Н. Н., Шиповский И. Е. К вопросу оценки методом сглаженных частиц влияния на дробящее действие взрыва внешнего давления и трещиноватости массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-2. – С. 170–182. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_170.

**To issue of evaluation of the influence of external pressure and broken
condition of a massif on the blast shattering effect by the smoothed
particle hydrodynamics method**

N. N. Efremovtsev¹, I. E. Shipovskii¹

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Russia,
e-mail: noee7@mail.ru

Abstract: The present development of mining enterprises requires reducing the human-caused impact of blasting operations and ramp up researches aimed at the digitalization of mining processes and the increasingly widespread use of rock massif disintegration computer simulation methods. The complication of geomechanical conditions associated with deeper field development requires improved calculations of drilling and blasting parameters based on research of patterns of changes in the stress-strain behavior (SSB) and fragmentation of blasted massif with an increase in the rock pressure. This paper describes the results of such researches of how the charge density of explosives of various capacity, external pressure, and broken condition of a massif effect on the fine rock yield, which determines the dust content in the atmosphere after a major blast of a rock massif with an exposed surface. Established is the behavior pattern of the concentration of massif disintegration and stress zones resulting from the blasting impact in the presence and absence of the external pressure. The curves are plotted and the behavior is traced for the dependences of the average piece size and the fine rock yield on the charge density of emulsion and granular explosives. Obtained are the simulation results for the blasting effect of a single charge on a solid massif with a free outer surface and a cracked massif. Demonstrated is the fundamental difference between the concentration of cracks in a solid massif and in a cracked massif, and stresses occurring at different distances from the charge to and between the cracks. The work has been done within the scope of the state-financed subject of the Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences.

Key words: Explosive (EX), charge density, charge diameter, blast impact zone, geomechanical conditions, computer simulation, smoothed particle hydrodynamics (SPH).

For citation: Efremovtsev N. N., Shipovskii I. E. To issue of evaluation of the influence of external pressure and broken condition of a massif on the blast shattering effect by the smoothed particle hydrodynamics method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):170–182. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_170.

Введение

Практика использования взрывов в горных работах свидетельствует о возрастающей тенденции совершенствования буровзрывных работ, основой которого являются теоретические исследования действия взрыва и поиск путей повышения различных аспектов его эффективности [1–4].

Современные условия развития горнодобывающих предприятий характеризуются необходимостью повышения экологической безопасности за счет сокращения выхода мелких фракций горных пород и выбросов пыли в атмосферу при ведении взрывных работ на открытой поверхности, а также увеличения объемов исследований, направленных на цифровизацию процессов горного производства и все более широкое применение методов

численного моделирования разрушения горного массива, комплексное обоснование рациональной степени дробления и экологических последствий горных работ, разработки инновационных технологий ведения горных работ с оценкой воздействия на окружающую среду на глубоких карьерах и рудниках при комплексном освоении недр.

Усложнение геомеханических условий разработки месторождений с увеличением глубины их разработки требует совершенствования методов прогнозирования параметров паспортов БВР с увеличением горного давления при различной трещиноватости массива.

На глубоких карьерах и рудниках разрушение горных пород взрывом осуществляется в условиях внешнего давления с повышенными прочност-

ными характеристиками и, как правило, трещиноватых массивов. Влияние этих факторов должно учитываться при определении параметров буровзрывных работ. Несомненный интерес представляют исследования с применением цифровых моделей влияния параметров геомеханического состояния и трещиноватости взрываемого массива горных пород на закономерности локализации трещин, образованных в результате воздействия энергии взрыва, изучение условий реализации триггер-эффекта разрушения массива горных пород с увеличением глубины разработки месторождений.

Исследования кинетики развития скорости детонации, проведенные ИПКОН РАН, показали, что в скважинных зарядах прослеживается устойчивая тенденция замедления скорости детонации с увеличением расстояния от заряда и в устье скважины на контакте с забойкой, в результате которого происходит изменение режима выделения энергии и полноты взрывчатого превращения с нормальной высокоскоростной детонации на низкоскоростную детонацию и конвективное горение. Этот процесс сопровождается изменением состава и объемов ядовитых газов и снижением КПД и дробящего действия энергии взрыва при использовании как эмульсионных, так и гранулированных промышленных ВВ. Одним из путей решения этой проблемы является применение топливных смесей (ТС), содержащих поризующие эмульсии, вместо дизельного топлива, традиционно используемого в производстве гранулированных сыпучих аммиачно-селитренных ПВВ. Применение разработанных в ИПКОН РАН поризующих ТС позволяет на несколько порядков увеличить площадь соприкосновения топлива и окислителя, устойчивость детонации

в скважинах ограниченного диаметра, что снижает вероятность образования ядовитых газов в продуктах детонации.

Недостаточно изучены в настоящее время особенности комбинированного воздействия внешнего давления на разрушаемую среду энергии взрыва и трещиноватости массива горных пород, влияния величины зазора между зарядом и стенкой скважины, плотности ПВВ на закономерности изменения напряженного состояния и фрагментации массива горных пород с различными физико-механическими свойствами и трещиноватостью. В этой связи проведены исследования с применением методов численного моделирования закономерностей кинетики фрагментации массива горных пород и возникающих в нем напряжений во времени и пространстве. Для калибровки численных моделей действия зарядов различной конструкции и энергетической насыщенности проводятся экспериментальные взрывы композиционных имитационных моделей и обработка результатов физических экспериментов с целью установления закономерностей изменения мелких фракций и крупных фрагментов в различных зонах действия взрыва.

В предшествующих работах нами были изучены особенности изменения тангенциальных и радиальных напряжений, наведенных удлиненными зарядами, развития кинетики фрагментации в результате применения ВВ с различной энергетической насыщенностью, равномерности дробления массива при применении зарядов с воздушными промежутками различного диаметра и плотности взрывчатого вещества [3–5]. До настоящего времени не проводились исследования методом сглаженных частиц особенностей совокупного воздействия энергии взрыва и горного давления, а также трещино-

ватости взрываемой геосреды на кинетику фрагментации массива горных пород и локализацию возникающих в нем напряжений во времени и пространстве.

В связи с этим целью работ на данном этапе исследований является:

– отработка методологии применения метода сглаженных частиц, калибровки моделей, моделирования параметров зарядов и взрываемых сред, анализ тенденций влияния основных факторов на дробящее действие взрыва;

– установление особенностей изменения НДС массива при комбинированном воздействии энергии взрыва и внешнего давления;

– локализация зон разрушения в монолитном и трещиноватом массиве с различными физико-механическими свойствами.

Методика исследований

Методика исследований предусматривает применение методов компьютерного моделирования. При этом обязательная калибровка численных моделей проводилась на результатах физических экспериментов (опытных взрывов) с применением имитационных композиционных моделей, в которых зоны действия взрыва выделены каждой своим цветом на различных расстояниях от стенки зарядной камеры. Определяются значения выхода мелких (ВМФ) и крупных фракций [5]. По результатам моделирования с применением метода SPH определяется зависимость выхода фракций от показателей физико-механических свойств (ФМС) взрываемой среды модели и методом последовательного приближения устанавливаются численные значения ФМС, при которых показатели ВМФ имеют минимальные отклонения от данных физических экспериментов. Обработка результатов моделирования,

представленных в графической форме, позволяет судить об изменении параметров камуфлетной полости, локализации зон разрушения, относительном изменении площади зон разрушения и выхода мелких фракций.

Калибровка компьютерной модели дробящего действия скважинных зарядов в пределах участка взрываемого блока проводится на основе реальных параметров БВР и горно-геологических условий конкретного горнодобывающего предприятия.

Для решения задачи и получения общих закономерностей дробления горных пород с применением зарядов различной конструкции и энергетической насыщенности, по нашему мнению, целесообразно использовать модель сжимаемого идеального упругопластического тела механики сплошной среды, которая при необходимости трансформируется в модель идеальной или вязкой сжимаемой жидкости, в модель пористой среды, в модель сыпучих материалов. Используются уравнения механики сплошной среды. Основная система уравнений записывается в лагранжевых переменных в виде [6–8]:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{V}}{V} - U_{i,i} &= 0; \quad \rho \dot{U}_i = \sigma_{ij,j}; \\ \frac{1}{V} \dot{E} &= \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где V — удельный внутренний объем; точка над символом — материальная производная по времени; U_i — компоненты вектора массовой скорости; запятая после индекса производная по указанной следующим индексом координате; ρ — плотность геосреды; σ_{ij} — тензор напряжений; E — внутренняя энергия; $\dot{\epsilon}_{ij}$ — тензор скоростей деформации.

Тензор напряжений может быть записан как

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}, \quad (2)$$

где P – давление, δ_{ij} – дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, иначе $\delta_{ij} = 0$), S_{ij} – девиатор тензора напряжений.

Система (1) замыкается уравнением состояния для определения давления:

$$P = K(\rho_0 / \rho - 1), \quad (3)$$

где K – модуль объемного сжатия, и определяющими соотношениями для девиатора S_{ij} (закон Гука):

$$\dot{S}_{ij} + \lambda S_{ij} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\varepsilon}_{kk} \right). \quad (4)$$

\dot{S}_{ij} в (4) – производная Яумана:

$$\dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ij} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}, \quad (5)$$

где $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} - U_{j,i})$; λ и μ – коэф-

фициенты Ляме. Производная \dot{S}_{ij} используется для неизменности напряжённого состояния при повороте как жёсткого целого.

Множитель $\lambda > 0$ в эластической области и при сдвиге $\lambda \equiv 0$. Параметр λ можно определить, используя условие пластичности:

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} Y_0, \quad (6)$$

где Y_0 – предел текучести.

Для замкнутой системы уравнений (1)... (6) ставится краевая задача с начальными и граничными условиями, состоящими в том, что на свободных поверхностях области расчета полагается равенство нулю вектора напряжений. Задается горное давление $P_0 = 5$ МПа (~50 атм).

Требуется определить компоненты тензора напряжений σ_x , σ_y и S_{xy}

во всех точках образца и компоненты упругих перемещений u_x и u_y произвольной точки. Сформулированная краевая задача решается методом сглаженных частиц [8–10]. При этом интегрирование уравнений для i -й частицы производится по следующей схеме:

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \Delta t \left(\mathbf{u}_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i^n}{dt} \right);$$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \Delta t \frac{d\rho_i^n}{dt};$$

$$\mathbf{u}_i^{n+1} = \mathbf{u}_i^n + \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i^n}{dt};$$

$$S_i^{n+1} = S_i^n + \Delta t \frac{dS_i^n}{dt}, \quad (6)$$

где \mathbf{x}_i – вектор-столбец декартовых координат; \mathbf{u}_i – вектор-столбец скоростей; S_i – компоненты девиатора тензора напряжений; ρ – плотность; Δt – шаг по времени.

Вывод основных зависимостей, используемых в математической модели SPH волновых процессов, подробно рассмотрен в работах [8–10]. Программное обеспечение для решения краевых задач методом SPH позволяет задавать в пространстве взрываемой модели координаты, в которых будут определены численные значения напряжений, возникающих в результате взрывного воздействия заряда ВВ, необходимых параметров и конструкции. Особенности и преимущества применения метода SPH достаточно подробно также рассмотрены в предшествующих публикациях и работах [11–13]. Особенности применения метода SPH для моделирования хрупкого разрушения и жидких сред рассмотрены в работах [14, 15]. Проведен анализ программных продуктов для проектирования буровзрывных работ

[16] и особенностей автоматизированного расчета параметров буровзрывных работ (ПБВР) [17]. Следует отметить, что предлагаемые методики расчета не учитывают влияния кинетики выделения энергии на дробимость горных пород и параметры зон разрушения, а также не учитывают то, что каждой зоне действия взрыва и конструкции заряда присущи свои закономерности фрагментации горного массива.

Разработанная методика исследований предусматривает изучение дробящего действия ВВ с различной кинетикой выделения энергии зарядов различной конструкции [3]. При этом учитывается изменение скорости детонации и теплоты взрывчатого превращения при изменении плотности ВВ или диаметра заряда. Выделены 9 зон разрушения в имитационных и цифровых моделях, в отличие от ранее использовавшихся монохромных цилиндрических песчано-цементных или стеклянных моделей [18–20]. Предусматривается применение ВВ с различной энергетической насыщенностью.

Результаты расчетов

На рис. 1–7 приведена графическая интерпретация следующих результатов исследований:

- локализации зон предразрушения (трещин) на участке массива горных пород, изначально не имеющего трещин, при отсутствии внешнего давления, под воздействием энергии взрыва заряда низкоплотного ПВВ АС/ДТ-6 (рис. 1, а) и заряда бризантного ВВ-ТНТ (рис. 1, б);

- локализация зон предразрушения при совместном воздействии взрыва и внешнего давления и по двум направлениям (рис. 1, в);

- зависимости изменения во времени средних значений показателя напряженного состояния среды при

совместном действии взрыва и горного давления (рис. 2);

- схемы осесимметричной модели (рис. 3) монолитного массива с локализацией предразрушений под воздействием энергии взрыва заряда аммиачно-селитренного ВВ с плотностью 0,5 (рис. 3, а), 0,99 (рис. 3, б) и 1,2 (рис. 3, в), полученные методом SPH с учетом изменения скорости детонации и теплоты взрыва;

- зависимости выхода мелких фракций от плотности аммиачно-селитренных эмульсионного и гранулированного ВВ (рис. 4), полученные методом SPH с учетом изменения скорости детонации и теплоты взрыва;

- зависимость среднего расстояния между радиальными трещинами от плотности ВВ по результатам расчетов методом SPH с учетом влияния плотности аммиачно-селитренного ПВВ АС/ДТ-6 на скорость детонации и теплоту взрыва (рис. 5);

- локализация трещин в массиве монолитной части массива (слева от зарядной полости) и трещиноватой его части — с трещинами шириной 10 мм в результате воздействия взрыва гранулированного аммиачно-селитренного ВВ диаметром 200 мм (рис. 6);

- график изменения давления во времени на различном расстоянии от заряда (рис. 7). Линии: 1 — на границе зарядной полости и массива, 2 — в непосредственной близости от зарядной полости, на расстоянии 0,5 м, 3 и 4 — в зоне между первой и второй трещинами, на расстоянии более 1 м.

Выводы

Установлены закономерности изменения во времени и пространстве зон разрушения массива (см. рис. 1, а–в) и напряжений, возникающих в результате воздействия взрыва при наличии внешнего давления с образованием трещин и при его отсутствии. Анализ лока-

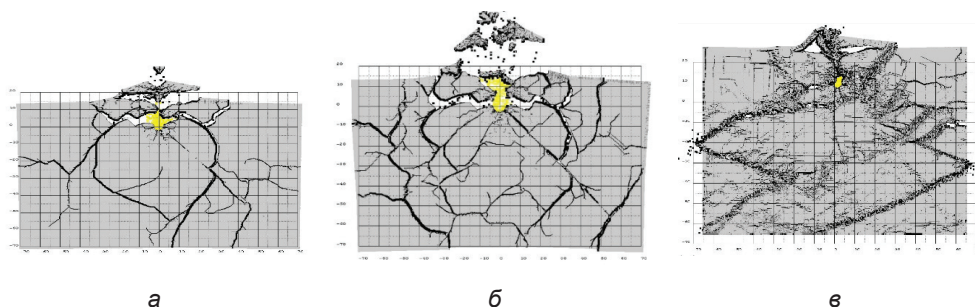


Рис. 1. Графическая интерпретация результатов расчетов локализации трещин на участке массива горных пород, изначально не имеющего трещин, при отсутствии внешнего давления, под воздействием энергии взрыва заряда низкоплотного ПВВ щадящего действия АС/ДТ-6 (а) и заряда бризантного ВВ-ТНТ (б) дробящего действия; (в) — при комбинированном воздействии внешнего давления и по двум направлениям и энергии взрыва шпурового заряда АС/ДТ-6

Fig. 1. Graphical interpretation of the results of calculations of crack localization in a section of a rock mass that initially has no cracks, in the absence of external pressure, under the influence of the explosion energy of a low-density PVV charge of gentle action AC/DT-6 (a) and a charge of high explosive explosive TNT (b) crushing action; (c) — when the combined effect of external pressure and in two directions and the explosion energy of the AS/DT-6 core charge

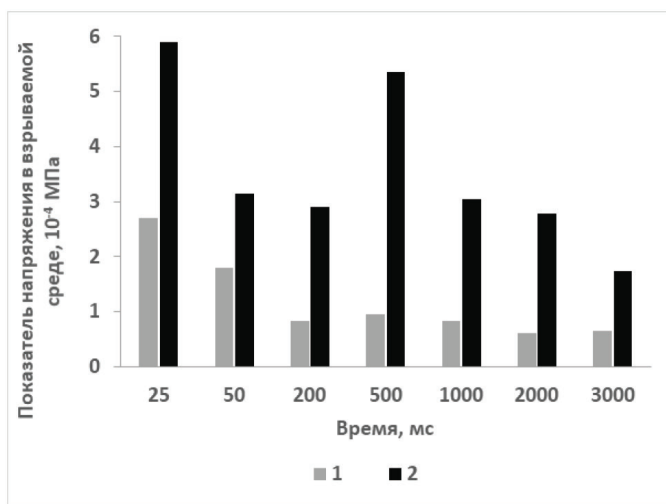


Рис. 2. Зависимости изменения во времени средних значений показателя напряженного состояния среды при отсутствии внешнего давления (1) и его наличии (2)

Fig. 2. Dependences of the change in time of the average values of the stress state of the medium in the absence of external pressure (1) and its presence (2)

лизации зон разрушения показывает, что под воздействием внешнего давления сформировались паттерны областей предразрушения и трещинообразования с определенной ориентацией по отношению к поверхности выработанного пространства массива. Наличие образо-

вавшихся в результате внешнего давления дефектов предразрушения на различных масштабных уровнях приводит к существенному сокращению зоны распространения радиальных трещин. При этом наблюдается увеличение содержания мелких фракций.

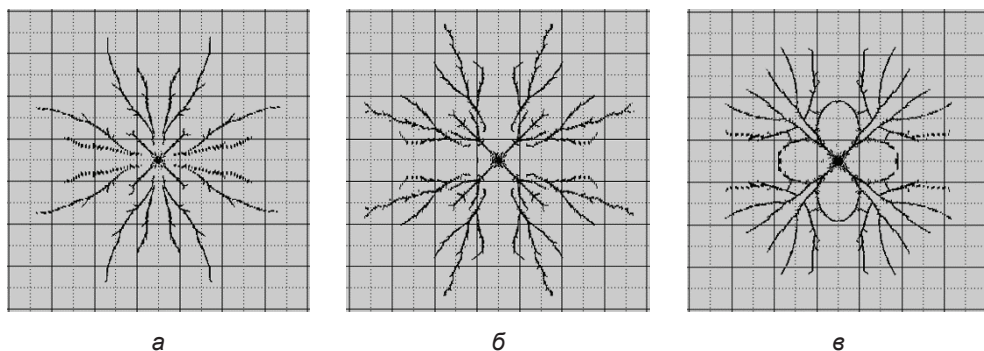


Рис. 3. Схемы осесимметричной модели монолитного массива с локализацией предразрушений под воздействием энергии взрыва заряда аммиачно-селитренного ВВ с плотностью 0,5 (а), 0,99 (б) и 1,2 (в), полученные методом SPH с учетом изменения скорости детонации и теплоты взрыва

Fig. 3. Schemes of an axisymmetric model of a monolithic array with localization of pre-destruction under the influence of the explosion energy of an ammonium nitrate explosive charge with a density of 0.5 (a), 0.99 (b) and 1.2 (c), obtained by the SPH method taking into account changes in the detonation velocity and explosion heat

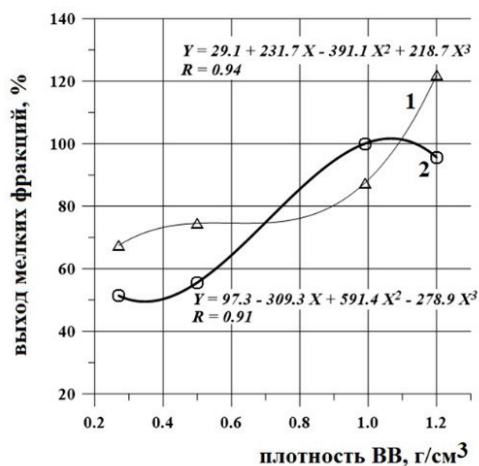


Рис. 4. Зависимость выхода мелких фракций от плотности аммиачно-селитренных эмульсионного (1) и гранулированного (2) ВВ, полученные методом SPH с учетом изменения скорости детонации и теплоты взрыва

Fig. 4. Dependence of the yield of small fractions on the density of ammonium nitrate emulsion (1) and granular (2) explosives obtained by the SPH method taking into account changes in the detonation rate and heat of explosion

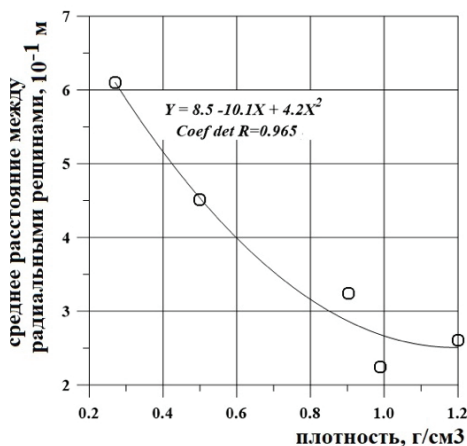


Рис. 5. Зависимость среднего расстояния между радиальными трещинами от плотности ВВ по результатам расчетов методом SPH с учетом влияния плотности аммиачно-селитренного ПВВ АС/ДТ-6 на скорость детонации и теплоту взрыва

Fig. 5. Dependence of the average distance between radial cracks on the density of explosives according to the results of calculations using the SPH method, taking into account the influence of the density of ammonium nitrate PVV AC/DT-6 on the detonation rate and the heat of explosion

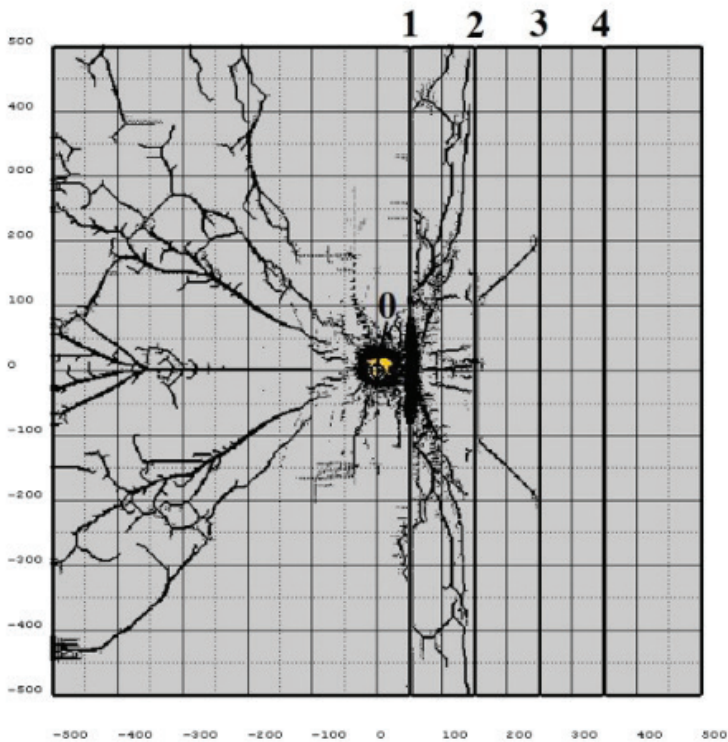


Рис. 6. Локализация разрушений в монолитном массиве (слева от зарядной полости) и в массиве с трещинами шириной 10 мм в результате воздействия взрыва АС/ДТ-6 диаметром 200 мм (справа): 0 – камуфлетная полость; 1, 2, 3, 4 – трещины шириной 10 мм
 Fig. 6. Localization of damage in a monolithic array (to the left of the charging cavity) and in an array with cracks 10 mm wide as a result of the impact of an explosion АС/DT-6 with a diameter of 200 mm (right): 0 – camouflage cavity; 1, 2, 3, 4 – cracks 10 mm wide

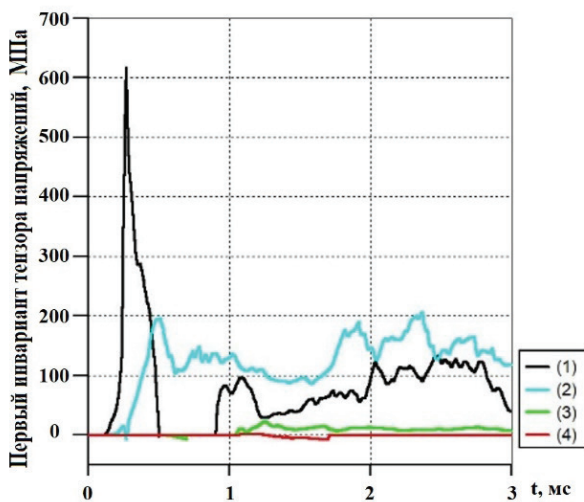


Рис. 7. Характер поведения давления в зависимости от расстояния до заряда: линия 1 – на границе зарядной полости и массива; 2 – в непосредственной близости от зарядной полости на расстоянии 0,5 м; 3 и 4 – в зоне между первой и второй трещинами на расстоянии более 1 м

Fig. 7. The nature of the pressure behavior depending on the distance to the charge: line 1 – at the boundary of the charging cavity and the array; 2 – in the immediate vicinity of the charging cavity at a distance of 0.5 m; 3 and 4 – in the zone between the first and second cracks at a distance of more than 1 m

Замена заряда АС/ДТ на ТНТ снижает значение среднего расстояния между вновь образованными трещинами в ближней зоне действия взрыва в 2,0 и 1,5 раза соответственно в ближней и дальней зоне действия взрыва. Кроме того, как показали результаты моделирования, применение бризантного ВВ дробящего действия (ТНТ) вместо АС/ДТ-6 приводит к увеличению в два раза выхода мелких фракций ненагруженного массива горных пород.

Как видно из рис. 2, показатель напряженного состояния в разрушаемом взрывом участке среды при совместном воздействии в два — три раза превысил средние значения первого инварианта тензора напряжений в массиве без внешнего воздействия. Кроме того, изменился характер его зависимости во времени. В случае отсутствия внешнего давления функция показателя напряженного состояния во взрывающей среде от времени монотонно и нелинейно убывает, а при комбинированном воздействии — может быть описана волновой функцией, имеющей зоны роста за счет взаимодействия прямых и отраженных волн напряжений от наведенных внешним давлением трещин. В рассмотренном нами случае наблюдается максимальный прирост интегрального давления в 1,8 раз через 0,5 мс с начала инициирования заряда. Что обусловлено эффектом взаимодействия, дифракцией прямых и отраженных от трещин волн, распространяемых в разрушаемой среде с определенной скоростью и частотой.

Расчеты с применением метода SPH осесимметричной модели монолитного массива с локализацией предразрушений (см. рис. 3) под воздействием энергии взрыва заряда аммиачно-селитренного ВВ с плотностью 0,5 (а), 0,99 (б) и 1,2 (в), полученные с учетом изменения скорости детонации и теплоты взрыва,

показали, что зависимость выхода мелких фракций от плотности эмульсионного и гранулированного аммиачно-селитренного ВВ могут быть описаны нелинейно возрастающими функциями (см. рис. 4). При этом средний размера куска нелинейно снижается (см. рис. 5).

Результаты моделирования действия взрыва одиночного заряда на монолитный массив с внешней свободной поверхностью и массив с трещинами показали принципиальное различие характера локализации трещин на разном расстоянии от заряда, в монолитном массиве и при наличии трещин, а также возникающих напряжений на различном расстоянии от заряда в зонах до и между трещинами (см. рис. 6). В трещиноватом участке массива расстояния, на которые распространяются трещины по оси, перпендикулярной линии простираения трещин, сокращается в 2 раза. Трещины, вновь образованные под воздействием энергии взрыва, дифракции прямых и отраженных волн напряжений, главным образом локализованы в зоне между трещинами 1 и 2. Установлено, что в зоне между трещинами значения тензора напряжений в 10 и более раз меньше, чем в массиве, непосредственно прилегающем к заряду ВВ (см. рис. 7). При этом в результате дифракции, взаимодействия прямых и отраженных волн в трещиноватом массиве зависимость первого инварианта тензора напряжений в зоне, непосредственно прилегающей к зарядной полости, имеет несколько максимумов (см. рис. 7, линии 1 и 2), что удлиняет разрушающее действие энергии взрыва.

Сопоставление с результатами предшествующих исследований [21–23] полученных нами данных в результате использования совместного численного моделирования методом сглаженных

частиц и физических экспериментов на композиционных имитационных моделях свидетельствует о том, что разработанная методика исследова-

ния обеспечивает достаточную достоверность выявленных зависимостей основных влияющих факторов на дробимость горных пород взрывом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов С. Д., Гончаров С. А., Иофис М. А., Закалинский В. М.* Механика сдвижения и разрушения горных пород / Под ред. акад. РАН К. Н. Трубецкого. — М.: РАН. — 2019, 360 с.

2. *Матва С. В., Кокин С. В., Литвин Ю. И., Протасов С. И., Корнев Г. Н., Федотенко В. С.* Совершенствование способов буровзрывной подготовки пород на предприятиях ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» // Уголь. — 2015. — № 12. — С. 24–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2015-12-24-31.

3. *Ефремовцев Н. Н., Ефремовцев П. Н.* Результаты исследования в производственных условиях влияния кинетики выделения энергии взрыва на дробимость горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 11. — С. 17–25.

4. *Захаров В. Н., Ефремовцев Н. Н., Федотенко В. С.* Исследование техногенного воздействия взрывного разрушения горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых открытым способом // Горная промышленность. — 2022. — № 6. — С. 61–68.

5. *Ефремовцев Н. Н., Лавров В. В., Савченко А. В.* Опыт применения композиционных имитационных моделей для оценки дробящего действия взрыва ВВ различной мощности // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву (Суздаль, 4–9 сентября 2022 г.). 2022. — С. 286–287.

6. *Макаров П. В., Евтушенко Е. П., Еремин М. О.* Эволюция напряженно-деформированного состояния горного массива с выработками. Математическое моделирование. — Томск: ИД Томского государственного университета, 2016. — 184 с.

7. *Стефанов Ю. П.* Некоторые особенности численного моделирования поведения упругохрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. — 2005. — Т. 8. — № 3. — С. 129–142.

8. *Monaghan J. J.* An introduction to SPH // *Comp Phys Comm.* 1988, vol. 48, pp. 89–96.

9. *Libersky L. D.* Smoothed Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications // *Comp Meth Appl Mech Eng.* 1996, vol. 139, pp. 375–408.

10. *Graya J. P., Monaghan J. J.* Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers // *J Volcanology Geotherm Res.* 2004, vol. 135, 2004, pp. 259–283.

11. *Шиповский И. Е.* Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ. — 2015. — Вып. 1(145). — С. 76–82.

12. *Шиповский И. Е.* Трехмерный расчет разрушения образцов с трещиной // *Геотехническая механика.* — 2014. — Вып. 20(1). — С. 20148.

13. *Потапов А. П., Роиз С. И., Петров И. Б.* Моделирование волновых процессов методом сглаженных частиц (SPH) // *Матем. моделирование.* — 2009. — Т. 21. — Вып. 7. — С. 20–28.

14. *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.

15. *Давыдов М. В., Кедринский В. К.* Моделирование разрушения жидких сред с использованием метода SPH М // *Ученые записки физического факультета.* — 2014. — Т. 5. — 145302.

16. *Кирсанов А. К.* Анализ программных продуктов для проектирования буровзрывных работ при отработке месторождений подземным способом // *Известия ТулГУ. Науки о Земле.* — 2023. — Вып. 2. — С. 249–259.

17. Тюпин В. Н., Игнатенко И. М., Азарков И. Б., Крючков И. С. Автоматизированный расчет параметров взрывных работ на основе показателя буримости трещиноватого массива при шарошечном бурении скважин на карьерах // Горный журнал. – 2021. – № 12. – С. 75–79. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.14.

18. Тарасютін В. М., Косенко А. В., Хоменко О. Є., Кононенко М. М. Експериментальні дослідження та розроблення методики розрахунку параметрів свердловинної гідромоніторної дезінтеграції масивів багатих залізних руд // ВІСТІ Донецького гірничого інституту. 2023, no. 1(52), pp. 86–96.

19. Xudong L., Kewei L., Yanyan S. Numerical investigation on blast-induced rock fragmentation with different stemming structures // Geomech. Geophys. Geo-energ. Geour. 2023, vol. 9(112). DOI: 10.1007/s40948-023-00654-9.

20. Jiang N., Lv K., Gao Z., Jia C., Ye L., Meng S., Su Q. Experimental study on mechanical properties of single fracture-hole red sandstone // Front Earth Sci. 2023, vol. 10, 1083689, pp. 1–5. DOI: 10.3389/feart.2022.1083689.

21. Рубцов В. К. Анализ дробления горных пород взрывом на открытых горных работах по негабаритной фракции : дисс ... канд. техн. наук: 05.00.00. – М., 1961. – 121 с.

22. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К. Физика взрывного разрушения горных пород. Физика разрушения и методы регулирования дробления скальных пород. – М: Моск. горный ин-т, 1970. – 177 с.

23. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. – Белгород: БелГУ, 2017. – 192 с. **УДК**

REFERENCES

1. Viktorov S. D., Goncharov S. A., Iofis M. A., Zakalinsky V. M. Mechanics of displacement and destruction of rocks. Ed. acad. RAS K. N. Trubetskoy, Moscow, RAS, 2019, 360 pp. [In Russ].

2. Matva S. V., Kokin S. V., Litvin Yu. I., Protasov S. I., Kornev G. N., Fedotenko V. S. Improvement of blast-hole drilling methods for rock mass preparation at the enterprises of “UK Kuzbassrazrezugol” OJSC. *Ugol’*. 2015, no. 12, pp. 24–32. [In Russ]. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2015-12-24-31>.

3. Efremovtsev N. N., Efremovtsev P. N. Results of a study under production conditions of the influence of the kinetics of explosion energy release on the crushability of rocks. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2015, no. 11(58s), pp. 17–25. [In Russ].

4. Zakharov V. N., Efremovtsev N. N., Fedotenko V. S. Study of the technogenic impact of explosive destruction of rocks during open-pit development of mineral deposits. *Mining*. 2022, no. 6, pp. 61–68. [In Russ].

5. Efremovtsev N. N., Lavrov V. V., Savchenko A. V. Experience in using compositional simulation models to assess the crushing effect of explosive explosions of various powers. *Abstracts of the XVI All-Russian Symposium on Combustion and Explosion*. 2022, pp. 286–287. [In Russ].

6. Makarov P. V., Yevtushenko Ye. P., Yeremin M. O. The evolution of the stress-strain state of rock massif with the workings. *Mathematical simulation*. 2016, 184 pp. [In Russ].

7. Stefanov Yu. P. Some features of numerical modeling of the behavior of elastic-brittle-plastic materials. *Phys Mesomech*. 2005, vol. 8, no. 3, pp. 129–142. [In Russ].

8. Monagan J. J. An introduction to SPH. *Comp Phys Comm*. 1988, vol. 48, pp. 89–96.

9. Libersky L. D. Smootred Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications. *Comp Meth Appl Mech Eng*. 1996, vol. 139, pp. 375–408.

10. Graya J. P., Monaghan J. J. Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers. *J Volcanology Geotherm Res*. 2004, vol. 135, pp. 259–283.

11. Shipovskii I. E. Calculation of brittle fracture of rock using a mesh-free method. *Scientific Bulletin of NSU*. 2015, vol. 1(145), pp. 76–82. [In Russ].

12. Shipovskii I. E. Three-dimensional calculation of fracture of samples with a crack. *Geotechnical mechanics*. 2014, issue 20(1), 20148. [In Russ].

13. Potapov A. P., Roiz S. I., Petrov I. B. Modeling of wave processes by the method of smoothed particles (SPH). *Matem. modeling*. 2009, vol. 21, issue 7, pp. 20–28. [In Russ].
14. Graya J. P. Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004, vol. 135, pp. 259–283.
15. Davydov M. V., Kedrinsky V. K. Modeling the destruction of liquid media using the SPH method M. *Scientists notes of the faculty of physics*. 2014, vol. 5, 145302. [In Russ].
16. Kirsanov A. K. Analysis of Software Products for Designing Drilling and Blasting Operations during Underground Field Development. *Izvestia TuSU. Earth sciences*. 2023, no. 2, pp. 249–259. [In Russ].
17. Tyupin V. N., Ignatenko I. M., Agarkov I. B., Kryuchkov I. S. Automated Calculation of Blasting Parameters Based on Fractured Massif Drillability Index during Mine Drilling. *Mining Journal*. 2021, no. 12, pp. 75–79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.14.
18. Tarasyutin V. M., Kosenko A. V., Khomenko O. E., Kononenko M. M. Experimental research and development of a method for calculating the parameters of borehole hydromonitor disintegration of rich iron ore in place. *News of the Donetsk Mining Institute*. 2023, no. 1(52), pp. 86–96. DOI.org/10.31474/1999-981X-2023-13.
19. Xudong Li, Kewei Liu, Yanyan Sha. Numerical investigation on blast-induced rock fragmentation with different stemming structures. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour*. 2023, vol. 9(112). DOI: 10.1007/s40948-023-00654-9.
20. Jiang N., Lv K., Gao Z., Jia C., Ye L., Meng S., Su Q. Experimental study on mechanical properties of single fracture-hole red sandstone. *Front Earth Sci*. 2023, vol. 10, 1083689, pp. 1–5. DOI: 10.3389/feart.2022.10836891.
21. Rubtsov V. K. Analysis of rock crushing by explosion in open-pit mining using oversized fraction: dissertation ... candidate of technical sciences. Sciences: 05.00.00. Moscow, 1961, 121 p. [In Russ].
22. Kutuzov B. N., Rubtsov V. K. Physics of explosive rock destruction. Physics of destruction and methods of regulating rock crushing. Moscow, Mining Institute, 1970, 177 p. [In Russ].
23. Tyupin V. N. Explosive and geomechanical processes in fractured, stressed rock masses. Belgorod, BelSU, 2017, 192 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ефремовцев Никита Николаевич*¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, noee7@mail.ru, ORCID 0000-0001-5797-1631;
*Шиповский Иван Евгениевич*¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, iv_ev@mail.ru, ORCID 0000-0002-7542-3900;
¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Москва, Крюковский тупик, д. 4.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Efremovtsev N. N., ORCID 0000-0001-5797-1631, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, noee7@mail.ru;
Shipovskii I. E., ORCID 0000-0002-7542-3900, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, e-mail: iv.ev@mail.ru.

Получена редакцией 05.10.2023; получена после рецензии 23.10.2023; принята к печати 10.11.2023.
 Received by the editors 05.10.2023; received after the review 23.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

