

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ ДЕКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ РАЗНООБРАЗНЫХ УСЛОВИЙ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сергей Дмитриевич Викторов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, профессор, доктор технических наук, viktorov_s@ipkonran.ru (victorov_s@mail.ru)

Владимир Матвеевич Закалинский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, доктор технических наук, +7 (495) 360-85-28, zakalinskiy_v@ipkonran.ru (vmzakal@mail.ru)

Андрей Андреевич Еременко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией ИГД СО РАН, eremenko@ngs.ru

Иван Евгеньевич Шиповский

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, +7 (999) 963-10-38, shipovskiy_i@ipkonran.ru (iv_ev@mail.ru)

Рафаэль Якубович Мингазов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, Россия, Москва, Крюковский тупик, д.4, ведущий инженер, +7 (909) 935-92-03, mingazov_r@ipkonran.ru (ghost1064@yandex.ru)

Современные требования рыночной экономики и усложнения условий разработки месторождений требуют новых научно-технических подходов на глубоких карьерах и рудниках при комплексном освоении недр. Как известно, господствующая в горном деле парадигма в буровзрывных работах связана с техникой бурения скважин и шпуров круглой в сечении формы (полости) с размещением в ней взрывчатого вещества. Однако в горной науке и практике разнообразие условий горного производства издавна требует создания способов разрушения горных пород с асимметрией распределения энергии взрыва в пространстве и максимальной ее концентрацией в определенных направлениях. В этой связи рассмотрено концептуальное направление, базирующееся на принципиально новом механизме действия взрыва известных групп параллельно-сближенных скважинных зарядов, позволяющих эффективно расширить их использование в различных горнотехнических приложениях. Разработка нового механизма действия взрывного процесса с применением компьютерной программы и численного моделирования расчетов позволили использовать изменение формы и конструкции заряда как средство увеличения доли потока энергии взрыва ВВ в определенном направлении.

Показана конструкция деконцентрированного заряда как средство увеличения доли потока энергии взрыва ВВ в заданном направлении, что влечет существенное повышение КПД направленного взрыва и, в частности, сводит к минимуму его действие в обратном, «законтурном», направлении. По результатам исследований предложен метод взрывных работ по нейтрализации взрывным методом влияния аномалий состояния массива на горные разработки. Метод включает соответствующий инструментарий, характеризующийся нетрадиционной конструкцией скважинного заряда и использующий механизм воздействия на аномальные состояния массива с сочетанием его взрывных особенностей.

Ключевые слова: форма взрывной волны, взрывчатые вещества, скважинный заряд, массив горной породы, программирование, численное моделирование, метод сглаженных частиц, напряженно деформированное состояние (НДС), конфигурация пучка скважинных зарядов, геотехнологические условия

DEVELOPMENT OF THE MECHANISM OF ACTION OF DECONCENTRATED CHARGES OF VARIOUS SHAPES FOR VARIOUS MINING CONDITIONS

Sergey D. Viktorov

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Doctor of Technical Sciences, Professor, victorov_s@mail.ru

Vladimir M. Zakalinsky

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Doctor of Technical Sciences, vmzakal@mail.ru

Andrey A. Eremenko

Institution of Science N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630091, Russian Federation, Novosibirsk, Krasny Prospekt 54, Doctor of Technical Sciences, eremenko@ngs.ru

Ivan E. Shipovskii

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, iv_ev@mail.ru

Rafael Ya. Mingazov

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 111020, Russian Federation, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, Lead Engineer, ghost1064@yandex.ru

The modern requirements of the market economy and the increasing complexity of the field development conditions require new scientific and technical approaches in deep quarries and mines in the complex development of subsurface resources. As you know, the dominant mining paradigm in drilling and blasting is associated with the technique of drilling wells and boreholes of a circular shape (cavity) with the placement of explosives in it. However, in mining science and practice, the variety of mining conditions has long required the creation of methods for the destruction of rocks with an asymmetry in the distribution of explosion energy in space and its maximum concentration in certain directions. In this regard, we consider a conceptual direction based on a fundamentally new mechanism of action of the explosion of known groups of parallel-converged borehole charges, which effectively expand their use in various mining applications. The development of a new

mechanism of action of the explosive process with the use of a computer program and numerical simulation of calculations made it possible to use the change in the shape and design of the charge as a means of increasing the share of the energy flow of the explosive explosion in a certain direction. The design of the deconcentrated charge is shown as a means of increasing the fraction of the energy flow of the explosive explosion in a given direction, which leads to a significant increase in the efficiency of the directed explosion and, in particular, minimizes its action in the opposite, "legit", direction. Based on the results of the research, a method of blasting operations is proposed to neutralize the influence of anomalies in the state of the massif on mining operations by the explosive method. The method includes the appropriate tools, characterized by an unconventional design of the borehole charge and using a mechanism for influencing the anomalous states of the array with a combination of its explosive features.

Keywords: blast wave shape, explosives, downhole charge, rock mass, programming, numerical simulation, smoothed particle method, stress-strain state (VAT), downhole charge beam configuration, geotechnological conditions

Введение

Усложнения условий разработки месторождений при современных рыночных отношениях требуют инновационных геотехнологий на основе разработки новых идей и научно-технических подходов при комплексном освоении недр [1]. Как известно, господствующая в горном деле парадигма в буровзрывных работах, связанная с техникой бурения скважин и шпуров круглой в сечении формы (полости), определяет соответствующее, практически строго симметричное направление потока энергии взрыва вокруг скважинного заряда с размещенным в нем взрывчатым веществом. Однако разнообразие условий горного производства издавна требует в горной науке и практике создания способов разрушения горных пород с асимметрией распределения энергии взрыва в пространстве и максимальной ее концентрацией в определенных направлениях. В этой связи рассмотрен аспект концептуального направления, базирующийся на новом механизме действия взрыва известных групп параллельно-сближенных скважинных зарядов, позволяющих эффективно расширить их использование в различных горнотехнических приложениях [2, 3].

Актуальность этого направления очевидна при открытой и подземной разработке, в частности, в условиях проявления удароопасных явлений, вызываемых техногенным воздействием на массив горной породы, и в других проблемных ситуациях. Практические задачи требуют оценки влияния на конструктивные параметры систем подземной и открытой разработки поведения массивов горных пород в широком диапазоне прилагаемых нагрузок и режимов нагружения. Известно, что проведение выработок в рудных залежах, угольных пластах и на месторождениях других полезных ископаемых сопряжено с нарушением равновесия массивов горных пород, в результате чего последние деформируются, происходит их сдвигание, в следствие чего в них могут инициироваться спонтанные динамические процессы. Так, известны многочисленные разновидности форм и масштабов воздействий на массив горных пород, приводящие к изменению его исходного состояния. Оно характерно тем, что параметры систем

подземной и открытой разработки проектируются исходя из исходного состояния массивов полезных ископаемых, так как предусмотреть в горном деле заранее различные ситуации, носящие, как правило, случайный характер, практически невозможно. Это создает проблему взаимодействия и адаптации основных процессов горного производства к условиям измененного состояния массива. Формы и виды воздействий носят статический и динамический характер [3, 4].

Методы и материалы

Естественное состояние массива горных пород в процессе разработки полезных ископаемых претерпевает совокупность различного рода техногенных воздействий, важнейшими из которых при ведении горных работ являются сдвигание массива и непосредственное воздействие взрывных работ. В массиве происходят разнообразные, не связанные с взрывными работами процессы, присущие различным структурно-геологическим и горнотехническим особенностям, влияющие и изменяющие его начальное состояние. Известны многочисленные разновидности форм динамических явлений, относящиеся к геомеханике, приводящие, в конечном счете, к изменению физического состояния горного массива. Сюда можно отнести такие, сказывающиеся на несущей способности массива (целика) факторы, как выбросоопасность массива, зоны повышенного горного давления, области разгрузки, трещины и разломы горных пород, территории опасного влияния подземных работ, места обрушения горных пород, провалов на земной поверхности, а также разработки с гидроразрывами и гидрорыхлением угольных пластов, и так далее. В результате появляется непредсказуемость, существенно изменяющая, например, характер склонности к обрушению исходного состояния массивов горных пород и углей. Возникает концентрация напряжений и деформаций в определенных местах и, как следствие, давление горных пород, что создает дегазацию и связанную с ней проблему внезапных выбросов угля и газов. Подобные явления, с учетом специфики и условий разработки, имеют место так же при разработке и рудных месторождений. В зависимости от состояния массива и характера направленного взрывания в процессе отработки действующего или подготовки нового горизонта в измененном массиве до начала ведения очистных горных работ, без специальной проходки комплекса подводящих выработок, непосредственно в выработках технологического назначения (штреки, орты, квершлагги и т.п.). формируют буровые камеры или заходки. При этом буровые камеры формируются в процессе отработки действующего или подготовки нового горизонта в выработках технологического назначения до начала ведения в проблемном массиве очистных горных работ на расстояниях друг от друга, соответствующим конкретным ситуациям.

Это обуславливает необходимость анализа выделенных главных процессов в этих системах и факторов воздействия на них с целью определения условий их оптимального взаимодействия.

Анализ технологий взаимодействия процессов вызывает, с одной стороны, необходимость конкретизации функционирования некоторых ее аспектов как

сложной системы, с другой - разработки инструмента ее реализации с элементами универсальности. Концептуальная разработка данного направления осуществляется на базе развития совместного с ИГД СО РАН, ВостНИГРИ и внедрения на горных предприятиях ОАО «Евразруда», ОАО «Сибгипроруда», ОАО «Запсибгеология» способа отбойки сближенными скважинными зарядами [4, 5]. Взаимосвязь рассматриваемых процессов основывается на использовании сочетаний характерных особенностей целенаправленного взрывного воздействия (управления) и критериев оценки состояния массива в разные пространственно-временные периоды. Это определяет базовые требования к инструментарию воздействия, основу которого представляет идея его направленного действия конструктивно в рамках единого (одного) заряда. Для его эффективного взаимодействия с геотехнологическими факторами в разнообразных условиях решения задач горного производства ему должны быть присущи такие особенности как универсальность, технологичность, масштабность, особенности короткозамедленного взрывания, разнообразие конфигураций форм направленного развития взрывного процесса [6].

Используя подход механики сплошной среды, в рамках модели упругопластического тела сформулирована представляющая практический интерес крайняя задача взрывного разрушения горных пород. В ИПКОН РАН для решения выдвигаемых практикой горного производства задач проблемного характера используется компьютерное моделирование методом сглаженных частиц (Smooth Particle Hydrodynamics) [7, 8], положительно зарекомендовавшим себя при решении динамических задач геотехнической механики. Численно исследовалась динамика процесса действия на горную породу импульса взрыва при порядном короткозамедленном инициировании рядов сближенных зарядов различных конфигураций с целью достижения эффекта последовательного нарастания энергии суммарной волны нагружения в направлении проблемного горного массива.

Механизм способа взрыва заряда характеризуется рядом таких конкретных инструментов управления воздействием, как: варианты направлений потока энергии взрыва в зависимости от характера аномалий состояния массива; ориентации выпуклости формы (дуги) рядности заряда(ов) в сторону проблемного массива; схемы последовательности инициирования рядов скважинных зарядов; выбор взрывчатых веществ с определенными параметрами, и др. Совокупное действие этих факторов образует взрывную волну существенно продолжительного в заданном направлении действия с эффектом масштабного управления взрывом практически единого заряда [9, 10].

В теоретическом плане в процессе действия взрывной волны в горной породе выполняются законы сохранения массы, импульса и энергии. Законы сохранения массы и импульса связывают между собой четыре параметра фронта взрывной волны: D - скорость распространения волны по нетронутому массиву горной породы; u - скачок массовой скорости, равный скорости движения сжатого вещества относительно исходного состояния горной породы; p - давление; V - удельный объем, или плотность $\rho = 1/V$. Продукты детонации взрывчатого вещества расширяются, разгружаясь практически до нулевого давления, при

этом воздействуя соответствующим образом на за скважинный горный массив. Горная порода при этом приобретает дополнительную скорость в направлении движения взрывной волны. Из анализа представленных ниже материалов исследования, в этой связи, объяснима существенная разница измеряемых параметров фронта взрывной волны в противоположных граничных точках в сравниваемых модельных образцах конструкций зарядов [11, 12]. Представленные ниже табличные данные и закономерности базируются на численном решении динамических задач геомеханики методом сглаженных частиц SPH, в том числе на исследовании внутрискважинных детонационных волн и их различных аспектов взаимодействий.

Результаты

Результаты в виде физических величин (параметров волны напряжения) - массовой скорости и давления на фронте волны фиксировались в четырех противоположных точках контура «взрывания», что представлено в таблице 1, в которой приведены данные замеров во временной точке взрывания 3,5 мс из временного интервала замеряемого процесса от 0 до 4 мс и на рисунках 1, 2, 3. На рис. 1 в качестве примера показан фрагмент одного компьютерного эксперимента.

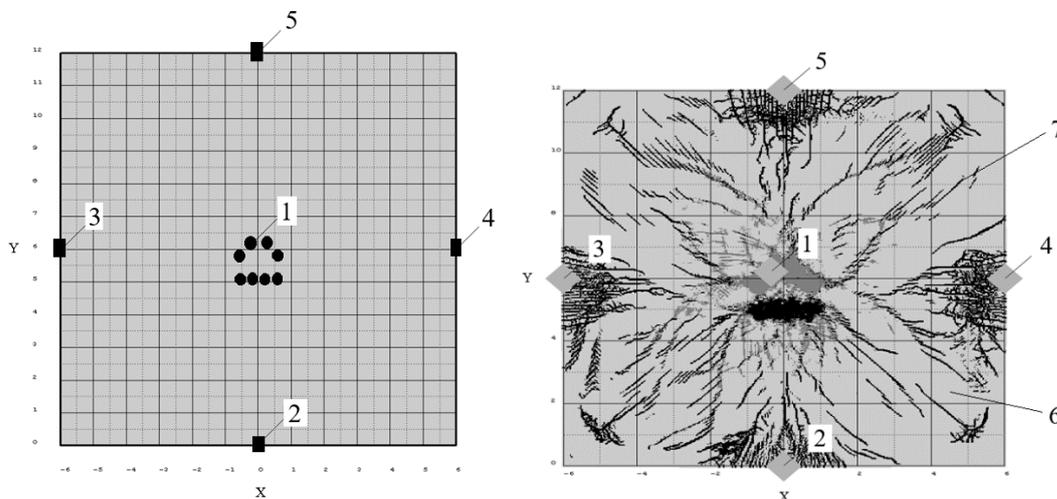


Рис. 1. Фрагмент компьютерного эксперимента: конфигурация двухрядного пучка с направлением параболического ряда зарядов вверх и под ним линейного ряда, где 2, 3, 4, 5- точки замеров, 1- скважины и одновременно точка замера, 6- порода; 7- разрушенная порода

На рис. 2 на одном из графиков показан характер изменения давления в противоположных точках модельного взрыва сравниваемых зарядов (слева одинарный заряд, справа пучок из четырех линейно-сближенных зарядов) при их одновременном в данном случае взрывании.

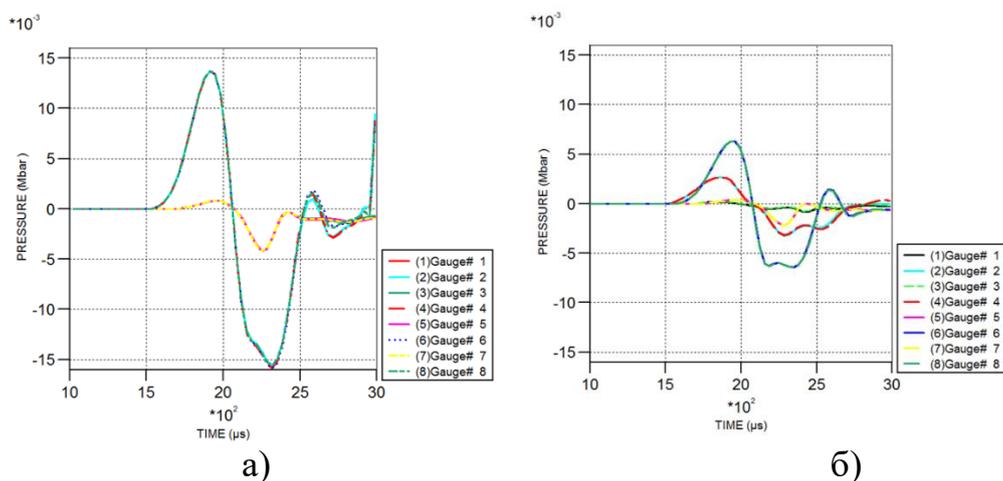


Рис.2. Зависимости давления от времени взрыва различных зарядов: Gauge 1-8 линии замеров, характеризующих сравнительную разницу отклонений величин давления в одинаковых точках замера

На рис. 3 дан сводный график изменения скорости смещения в зависимости от общего времени действия взрыва для одиночного заряда и некоторых пучковых конфигураций с разновременным взрыванием между рядами в одной из характерных точек наблюдения.

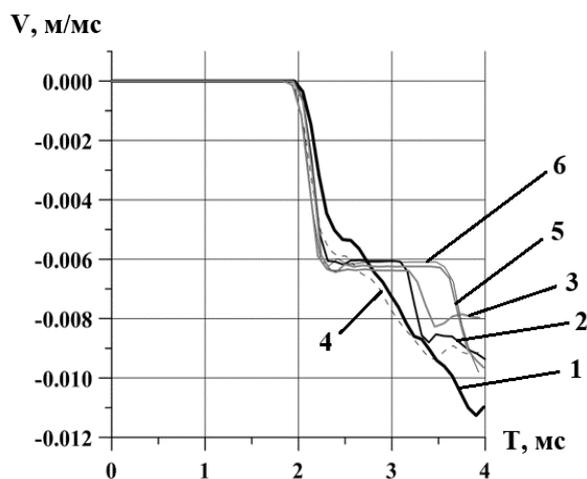


Рис. 3. Сводный график изменения скорости смещения в зависимости от общего времени действия взрыва для одиночного заряда и некоторых пучковых конфигураций

На нем: 1- линия для одинарного заряда, 2- для пучка, в котором верхний ряд с задержкой 50 мкс, а нижний линейный ряд с его одновременной детонацией, 3- ряды линейных зарядов, 4- выпуклый пучок однорядной параболической формы, 5- пучки, где два верхних заряда взрываются мгновенно, а два ряда нижних с задержкой 50 мкс, 6- вогнутый пучок однорядной параболической формы.

Обсуждение

На основе критериев сравнительной оценки массовой скорости, давления на фронте волны, вертикальной скорости, давления в горном массиве (тензорное напряжение), «взрыванием» зарядов в противоположных точках их контуров выполнен анализ полученных результатов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Показатели компьютерного экспериментального исследования

№№ эксперимента взрыва заряда определенной формы	Характерное время измерения $T = 3,5$ мс								
	Скорость смещения в периферийной точке заряда №2, $V, 10^{-3}$, м/мс	Скорость смещения в периферийной точке заряда №5, $V, 10^{-3}$, м/мс	Скорость смещения в периферийной точке заряда №3, $V, 10^{-3}$, м/мс	Скорость смещения в периферийной точке заряда, №4, $V, 10^{-3}$, м/мс	Давление в центре заряда в точке №1, МПа	Давление в периферийной точке №2 заряда, МПа	Давление в точке в периферийной точке №5 заряда, МПа	Давление в периферийной точке №3 заряда, МПа	Давление в периферийной точке №4 заряда, МПа
№1 (одинарный скважинный заряд)	-9	8	-7	8	3414,21	0,4	-0,36	-0,2	0,5
№2 линейный	-9,6	9	-6,4	7	3402,77	0,02	1,3	-0,2	-0,3
№3 параболическая	-6	9,3	-6,4	7	2100	0,11	-0,35	-0,25	-0,35
№4 линейный (взрывается первым) и парабола (через -50мкс)	-12	11	-15	13	2068,18	0	0,2	0	-1,26
линейный (взрывается первым) и парабола (через +50мкс)	-8,4	13	-11	11	2597,22	0,45	1,867	0	0,2
линейный (взрывается первым) и парабола (через -300 мкс)	-12	10,4	-13,8	13	1320	1,5	0	-0,4	-0,6
линейный (взрывается первым) и парабола (через +300 мкс)	-9,2	13,2	-12,2	12,2	2754,32	0,7	1,5	-0,05	-0,2

Эти данные, наглядно демонстрируя наличие асимметричного и симметричного эффектов, легли в основу механизма действия направленного импульса взрыва заряда различной конфигурации, что представляет основу реальной возможности направленного взрывания и возможностей способа.

Заключение

Установлено, что направленным короткозамедленным взрыванием достигается эффект последовательно нарастающего увеличения (наложении) параметров (фронта) суммарной взрывной волны сближенных зарядов в заданном направлении. При этом использование взрывчатых составов с растянутым импульсом взрыва и умеренным или низким начальным давлением продуктов взрыва типа игданита или разработанных на их базе разновидностей низко- или средне бризантных взрывчатых веществ позволит увеличить данный эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Викторов С.Д., Жариков И.Ф., Закалинский В.М. Взрывное разрушение горных пород при освоении недр // Сетевое периодическое научное издание «проблемы недропользования». – 2014. – № 3. – С. 80-95.
2. Викторов С.Д. Механика сдвижения и разрушения горных пород. / С.Д. Викторов, С.А. Гончаров, М.А. Иофис, В.М. Закалинский /Отв. ред. акад. РАН К.Н. Трубецкой; Ин-т проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН. – М.: РАН. – 2019. – 360 с.
3. Викторов С.Д. Технология крупномасштабной взрывной отбойки на удароопасных рудных месторождениях Сибири / С.Д. Викторов, А.А. Еременко, В.М. Закалинский, И.В. Машуков. – Новосибирск: Наука. – 2005. – 212 с.
4. Еременко А.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири / А.А. Еременко. — Новосибирск: Наука. – 2013. – 192 с.
5. Курленя М.В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М.В. Курленя, В.М. Серяков, А.А. Еременко. – Новосибирск, 2005. – 264 с.
6. Галченко Ю.П. Об эффекте кумуляции при разрушении горных пород децентрированными зарядами. Записки Горного института. – С.-Петербург. – 2007. – Т.171. – С. 167-174. ISSN 0135-3500.
7. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ. Днепропетровск. – Вып. 1 (145), 2015. – С. 76-82.
8. Changping Yi, Daniel Johansson, Ulf Nyberg, Ali Beyglou. Stress Wave Interaction Between Two Adjacent Blast Holes. Rock Mech Rock Eng. 2016. 49. pp.1803–1812. DOI 10.1007/s00603-015-0876-x.
9. Sang Ho Cho, Katsuhiko Kaneko. Rock Fragmentation Control in Blasting. Materials Transactions, Vol. 45, No. 5. 2004. pp. 1722-1730.
10. Simha KRY, Ramesh M. Borehole excitation by oscillating/moving pressure band. In: Fragblast 9, Proceedings of the 9th international symposium on rock fragmentation by blasting. Madrid. Spain. 2009. pp. 427–435.
11. XinPing Li, JunLin Lv, JunHong Huang, Yi Luo, TingTing Liu. Numerical Simulation Research of Smooth Wall Blasting Using the Timing Sequence Control Method under Different Primary Blast Hole Shapes. Shock and Vibration. Hindawi. 2019. pp. 1070-9622. <https://doi.org/10.1155/2019/2425904>.
12. Pengchang Sun, Wenbo Lu, Haoran Hu, Yuzhu Zhang, Ming Chen, Peng Yan. Bayesian Approach to Predict Blast-Induced Damage of High Rock Slope Using Vibration and Sonic Data. Sensors. 2021. 21(7). pp. 1424-8220; <https://doi.org/10.3390/s21072473>.

© С. Д. Викторов, В. М. Закалинский, А. А. Еременко,
И. Е. Шиповский, Р. Я. Мингазов, 2021