ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
GIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;3:113-124

УДК 622.235:539.3 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-113-124

КОНЦЕПЦИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ И ГЕОМЕХАНИКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

С.Д. Викторов[1], В.М. Закалинский[1], И.Е. Шиповский[1], Р.Я. Мингазов[1]

[1] Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия, e-mail: vmzakal@mail.ru

Аннотация: Определены способы эффективного и безопасного решения конкретных технологических задач производства при разработке и ведении горных работ на больших глубинах. Рассмотрен один из аспектов нового концептуального подхода для решения задач горного производства, связанных со сложными условиями разработки месторождений полезных ископаемых, в частности, проявлениями сейсмовзрывного эффекта и газо-удародинамических явлений, вызываемых техногенным воздействием. В основу подхода положено изучение взаимодействия исследований на стыке специальностей «Геомеханика» и «Разрушение горных пород», что позволяет использовать аналоги теоретического и экспериментального характера и соответствующий инструментарий одной из них в методологии эффективного применения приемов и методов другой. Научная новизна заключается в разработке математических моделей процессов деформирования и разрушения геоматериалов на различном масштабном уровне при воздействии статических и динамических нагрузок, воспроизводящих натурные условия. Показано, что взрывное воздействие зарядов рассмотренных конструкций по-разному влияет на напряженно-деформированное состояние окружающего горного массива, что позволяет проводить подбор технологических параметров заряда путем проведения модельных расчетов на предмет снижения негативного воздействия на геосреду взрывных работ.

Ключевые слова: открытые горные работы, шахтные выработки, математическое моделирование, метод сглаженных частиц (SPH), синергетика, взрывная волна, конструкция зарядов, взрывные работы, сейсмограммы.

Для цитирования: *Викторов С. Д., Закалинский В. М., Шиповский И. Е., Мингазов Р. Я.* Концепция синергетического взаимодействия процессов взрывного разрушения и геомеханики при разработке месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 3. – С. 113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-113-124.

Concept of synergetic interaction between rock breakage and geomechanics processes in mineral mining

S.D. Viktorov[1], V.M. Zakalinsky[1], I.E. Shipovskiy[1], R.Ya. Mingazov[1]

[1] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: vmzakal@mail.ru

Abstract: The purpose of the study is to develop, on the basis of the theory and practice of controlling the action of an explosion in various mining technical conditions, an idea of the concept consis-

© С.Д. Викторов, В.М. Закалинский, И.Е. Шиповский, Р.Я. Мингазов. 2019.

ting in elaboration of theoretical prerequisites and geomechanical support of new methods for deep-level rock breakage. In addition, our task was to determine how to effectively and safely solve specific technological production problems in mining at great depths. One of the aspects of the new conceptual approach for solving the problems of mining in complicated conditions, in particular, under induced seismic events and gas-dynamic phenomena is considered. The approach is based on interconnecting the geomechanics and rock fracture research, which allows the use of theoretical and experimental analogies and efficient interchange of appropriate instrumentations of the two methodologies. The scientific novelty of the research consists in development of mathematical models of rock deformation and failure at different scales under the influence of static and dynamic loads reproducing natural conditions. The modeling has shown shown that the explosion load of various design charges has different effect on stress-strain state of surrounding rock mass, which allows selecting charge design parameters such that mitigate blasting impact on geo-environment.

Key words: open pit mining, underground mining, mathematical modeling, smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, synergetics, blast wave, charge design, blasting, seismogram.

For citation: Viktorov S. D., Zakalinsky V. M., Shipovskiy I. E., Mingazov R. Ya. Concept of synergetic interaction between rock breakage and geomechanics processes in mineral mining. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;3:113-24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-113-124.

Развитие горнодобывающей промышленности, связанное с разработкой полезных ископаемых, должно гарантировать как безопасность, так и технико-экономическую эффективность. Решение этой проблемы на современном этапе невозможно без проведения исследований на основе подхода, при котором требование достижения одновременного сочетания безопасности и эффективности должно происходить на базе новых теоретических новаций при выборе систем и способов горной инженерии в сложных условиях разработки месторождений полезных ископаемых [1]. Актуальность этого очевидна при открытой и подземной разработке в условиях проявления удароопасных явлений, вызываемых техногенным воздействием на массив горной породы. Это обусловлено и тем, что практические задачи оценки состояния горных выработок и сооружений требуют рассмотрения поведения массивов горных пород в широком диапазоне прилагаемых нагрузок и режимов нагружения, с выделением главного процесса в этой системе.

Как известно, 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 сдвижение, в следствие чего в них могут инициироваться спонтанные динамические процессы. Существенной, а чаще и основной причиной запуска таких процессов, является промышленное взрывное разрушение горных пород, рассматриваемое как главный технологический способ отделения горной породы от горного массива при добыче полезных ископаемых.

Поскольку строгие теоретические решения, удовлетворяющие разноплановым и разнохарактерным потребностям практики разработки месторождений, опасных по геодинамическим явлениям, отсутствуют, предлагается использовать комплексный подход их геомеханического обеспечения. Он включает рассмотрение важнейших видов воздействия на рудный массив, угольный пласт и целики, их аспекты, связи и взаимодействие [2]. В простейшем варианте это тождественно описанию поведения массива при техногенном воздействии и управлении им.

Комплексный подход базируется в данном случае на гипотезе о возможности использования в горной инженерии результатов известного междисциплинарного подхода обобщения достижений методологий в сходных (близких) научных исследованиях. Суть его выражается свойствами интегративности дисциплин, основанной на переносе методов и технологий, близких по характеру исследований, из одной дисциплины в другую, синтезе полученных в рамках различных научных дисциплин результатов, что в совокупности способствует решению актуальных горных научно-технических проблем [3—5]. При этом научная новизна нового подхода затрагивает смену существующей парадигмы во взаимоотношениях двух специальностей в горной науке, обосновывая принципиально новую концепцию синергизма «взрывного разрушения» и «геомеханики» в сложных условиях разработки месторождений полезных ископаемых.

Анализ факторов различной природы происхождения исходит из позиций поиска оценки их взаимодействия в форме математической аналогии с определением функциональных составляющих. Для этого выполняется систематизация важнейших видов воздействий на массив рудных, угольных месторождений и целиков с отражением их отклика как динамических систем с выделением определяющих причинно-следственных связей.

Прослеживается соподчиненность соответствующих структурных составляющих, определенной математической функциональной зависимости с зависимыми и независимыми членами. В дальнейшем эта зависимость используется при оценке адекватности выбираемых моделей на основе сопоставления теоретических выводов и результатов полученных методами междисциплинарных дисциплин.

Одной из значимых независимых структурных составляющих техногенных воздействий является фактор взрывных работ, косвенно или напрямую влияющий в процессе производства на напряженно-деформированное состояние массива горных пород, что особо актуально открытой и подземной разработке полезных ископаемых на разрезах Кузбасса, рудниках Горной Шории и некоторых других регионов [5—7].

Вполне конкретной является сейсмическая форма техногенного воздействия, заключающаяся в последствиях проведения взрывных работ, производимых на рудных карьерах и угольных разрезах, влияющих на состояние расположенных под ними шахтных объектов и выработок подземной разработки полезных ископаемых. Здесь стоит задача исследования влияния интенсивности сейсмовзрывной волны и свойств целика между открытыми и подземными работами на сохранность горных выработок и безопасность производственного персонала [8—11]. Представляет интерес и разновидность этого воздействия, связанная с влиянием проходки взрывным способом выработки на расположенный вблизи угольной пласт, склонный к внезапному выбросу угля и газа. Есть еще и форма сейсмического воздействия другой природы, связанная с естественными землетрясениями, провоцирующими развитие горных ударов, оползней и толчков при разработке полезных ископаемых, реагирующих на такие явления.

Анализ представленных форм показывает, что они, имея общие характерные признаки в части происхождения и последствий, представляют собой систему «воздействие — реакция», которая, в свете концепции, де-факто обозначает главный фактор, вызывающий сейсмические и динамические явления, их интенсивность и формы проявления — взрывные работы.

На этом фоне в развитие выше означенной гипотезы были использованы аналогии при трактовке результатов модельных экспериментов отдельных научных исследований.

Отметим, что речь идет не о разработке теории, отражающей все варианты решения проблемы, а о привлечении некоторых фрагментов теоретического характера и моделирования из других научных дисциплин к освещению отдельных событий в симбиозе горных дисциплин «Геомеханика» и «Разрушение горных пород».

В этой связи ниже рассмотрим применительно к нашей концепции некоторые примеры моделирования, представляющие определенный научный и практический интерес.

Взрывные работы, проводимые в промышленных масштабах на горных предприятиях и в строительстве, могут вызывать негативное сейсмическое воздействие на окружающую среду. Они инициируют перераспределение напряжений в горном массиве, образуя зоны различного напряженно-деформированного состояния горной породы. Процесс формирования этих зон обусловлен сложными взаимодействиями между деформациями породы, повреждением массива и другими физическими явлениями, вызванными техногенным воздействием. Сейсмическому воздействию подвергается как инфраструктура действующего предприятия, так и находящиеся поблизости жилые, производственные и социальные объекты самого различного назначения. Сейсмоопасность сопутствует проведению взрывных работ на горных предприятиях, представляя реальную проблему, когда при массовых взрывах расход взрывчатых веществ составляет сотни и тысячи тонн.

Одна из таких проблем связана с негативным воздействием взрывных работ на открытых разработках на подземные горные выработки (объекты), расположенные непосредственно под дном карьера при комплексной разработке одного и того же пластового угольного месторождения [12]. Такая проблема имеет место, например, при совместном ведении подземных и открытых горных работ, когда сейсмовзрывные волны при массовых взрывах на разрезе «Заречный» воздействуют на подземные горные выработки нижерасположенной угольной шахты «Талдинская-Западная-2» ОАО «СУЭК-Кузбасс».

В настоящее время решение основывается на снижении интенсивности взрывных работ в карьере (разрезе) за счет использования различных технологических средств и приемов, например, путем дробления крупномасштабного взрыва на ряд мелкомасштабных. Это в целом существенно снижает технико-экономические показатели работы разрезов, в частности, из-за недоиспользования ресурсов мощной импортной техники. Несмотря на известные достижения в науке и практике в этой области сложность учета многообразия различных горнотехнических условий в увязке со способами крепления и обеспечением устойчивости горных выработок и сооружений, требует изыскания новых подходов с обоснованием и разработкой сейсмобезопасных параметров буровзрывных работ [17].

В результате анализа известных междисциплинарных теоретических предпосылок и расчетных методов механики сплошной среды была предложена новая идея в буровзрывных работах по снижению негативного влияния взрывных работ на карьере на шахтные горные выработки [17]. Положенная в основу новой концепции она развивает принцип масштабного эффекта достижения одинаковой степени дробления при любых объемах и условиях крупномасштабного взрывания на базе анализа и

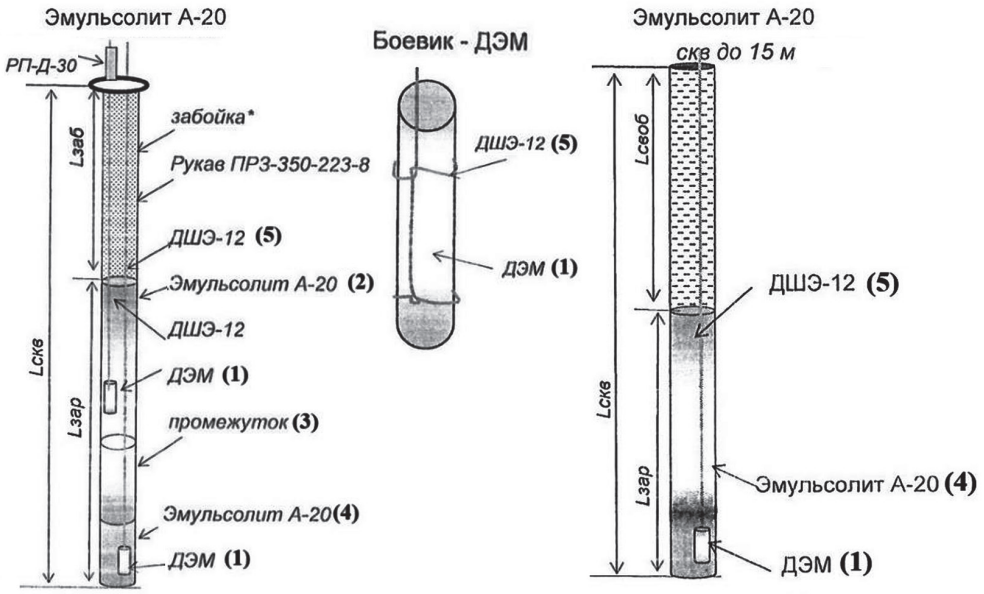

Рис. 1. Расположения элементов конструкций скважинных зарядов экспериментального (слева) и штатного (справа): 1 — детонаторы; 2 — верхний основной скважинный заряд; 3 — воздушный или инертный (древесные опилки, мелкая дробленая порода, песок и т.д.) промежуток; 4 — донный заряд; 5 — детонирующий шнур

Fig. 1. The location of the elements of the structures of the downhole charges of the experimental (left) and standard (right): 1 — detonators; 2 — upper main borehole charge; 3 — air or inert (sawdust, fine crushed rock, sand, etc.) gap; 4 — bottom charge; 5 — detonating cord

преобразования известной зависимости величины заряда от объема взрываемого горного массива.

На рис. 1 представлена конструкция скважинного заряда в эксперименте при массовых взрывах на разрезе «Заречный», под которым располагались подземные горные выработки нижерасположенной угольной шахты «Талдинская-Западная-2». Она характеризуется включением в конструкцию обычного скважинного заряда новых элементов, позволяющих в совокупности достичь принципиально нового эффекта. На фоне общих положительных результатов экспериментальных исследований действия массовых взрывов этих зарядов остановимся на некоторых его «узких местах».

Особенность конструкции в том, что разделение изначально сплошной колонки штатного скважинного заряда на две его разновеликие и расположенные на строго определенном расстоянии друг от друга колонковые части предполагает также и строго разновременное короткозамедленное взрывание. Эффект действия взрыва частей напрямую зависит от степени достижения этих условий. Эффект нового заряда связан не столько с качеством дробления горной массы, которое в данном случае в основном зависит от величины практически одинаковой для обоих вариантов общей энергии скважинных зарядов, сколько с его сейсмовзрывным направленным действием. Отсюда актуальность исследований в этом направлении, начиная с постановки соответствующих задач, в частности, связанной с влиянием на него элементов инициирования, способных изменять замедление между взрывами в широких пределах.

В дальнейшем здесь намечено изучение заданных во взрывном процессе параметров, связанных с экспериментами и методами компьютерного моделирования.

Применяемые сегодня системы короткозамедленного инициирования имеют существенные недостатки [13]:

• отсутствует возможность прямой инструментальной проверки элементов и смонтированной взрывной сети непосредственно на месте взрывных работ;

• системы чувствительны к влаге (поэтому запрещается обрезать излишки трубки-волновода, что ведет к ее перерасходу);

• срок хранения элементов ограничен двумя годами (например, для системы «Нонель»);

• возможность повреждения трубки-волновода при опускании боевика в скважину, заряжании и забойке заряда, что в условиях обводненности и отсутствия инструментальной проверки целости трубки чревато нарушением работы системы и даже отказом;

• большое число промежуточных капсюлей-детонаторов (КД) в соединительных блоках снижает надежность системы, поскольку увеличивает число ее элементов;

• наличие дополнительных (промежуточных) КД удорожает систему по сравнению с электровзрывной сетью;

• низкая точность исполнения инициирования взрывов (особенно системы «СИНВ»).

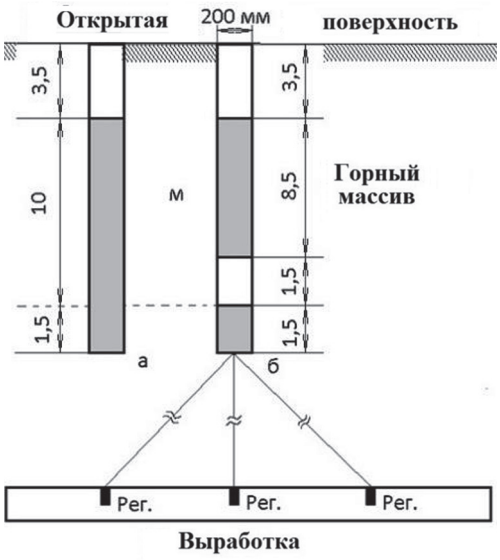

Рис. 2. Конструкции заряда: сплошной заряд (штатный) (а); рассредоточенный заряд с воздушным промежутком (б). Рег. — регистраторы сейсмоприемников (геофоны) для записи сейсмовзрывной волны в натурных условиях

Fig. 2. Charge designs: continuous charge (standard) (a); dispersed charge with air gap (b). Reg. — seismic receivers (geophones) for recording seismic blast waves in natural conditions

В связи с планированием использования на практике предложенной схемы буро-взрывных работ (БВР) представляет интерес проведение компьютерного моделирования действия простейшей конструкции заряда взрывчатого вещества (ВВ) в горнотехнической ситуации, воспроизводящей основные свойства прототипа, для выявления особенностей новой конструкции заряда в сравнении с ее штатным аналогом.

Схема рассматриваемых зарядов представлена на рис. 2, где показан вид сплошного (рис. 2, *а*) и рассредоточенного (рис. 2, *б*) зарядов, действие которых моделируется при численных расчетах для определения наиболее сейсмобезопасной конструкции заряда.

Полагаем, что в массиве горной породы на глубине 200 м расположена протяженная выемка высотой 5 м.

На дневной поверхности над выработкой проводится отбойка уступа посредством массового взрыва скважинных зарядов ВВ. Требуется определить влияние в процессе взрывных работ конструктивного промежутка между двумя зарядами, разброса времени их относительного срабатывания и отклика геосреды в рамках основной технологической задачи.

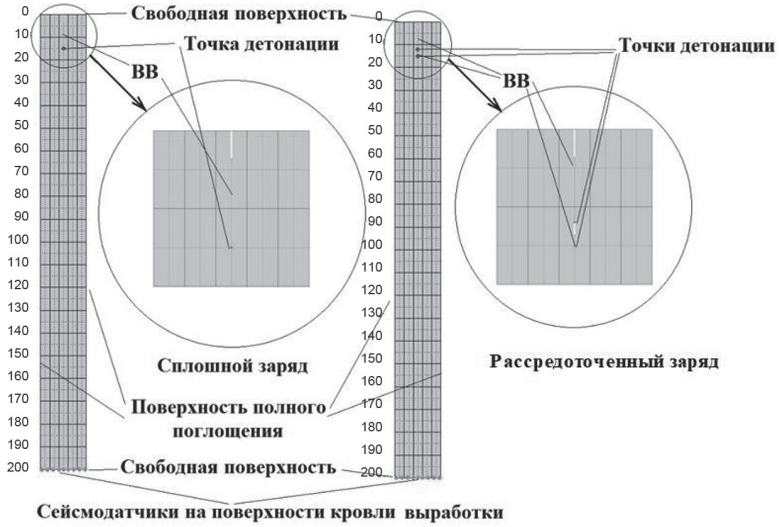

Рис. 3. Исходная конфигурация поставленной задачи
Fig. 3. The initial configuration of the task

Для описания процесса взрыва заряда ВВ и воздействия продуктов детонации на горную породу рассматривается задача, физическая постановка которой формулируется следующим образом (рис. 3).

Цилиндрический заряд взрывается в скважине диаметром 20 см. Продукты детонации (ПД) ВВ взаимодействуют со стенкой скважины. Задача рассматривается в осесимметричной постановке, когда все искомые функции не зависят от угла φ цилиндрической системы координат *r*, *z*, φ. Горная порода представляется как изотропная упругопластичекая среда [16].

Для решения поставленной краевой задачи применяется метод сглаженных частиц SPH [14], положительно зарекомендовавший себя при решении задач геотехнической механики [15—17]. Практика расчетов показывает, что SPH-метод может описывать динамические процессы в горном массиве с достаточной достоверностью. Рассчитывается изменение напряженно-деформированного состояния горного массива, подверженного техногенному воздействию при взрывных работах от начала детонации заряда до выхода волны возмущения на свободную поверхность кровли выработки и записи изменения виброскорости в контрольных датчиках на кровле.

Рассмотрим некоторые результаты расчета. На рис. 4 показано движение волны детонации вдоль оси заряда с шагом по времени 0,6 мс в течение процесса взрыва ВВ. Видно, что после взрыва всего заряда ВВ давление в продуктах

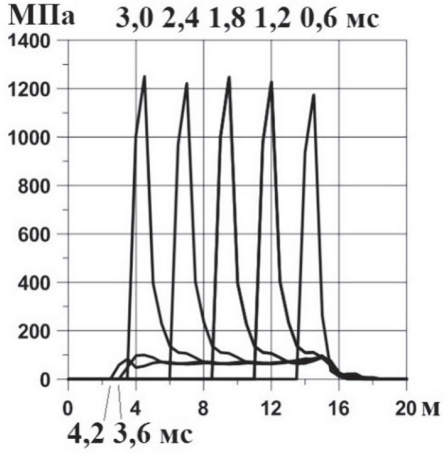

Рис. 4. Движение волны детонации вдоль оси заряда. Шаг по времени 0,6 мс
Fig. 4. The movement of the detonation wave along the axis of the charge. Time step 0,6 ms

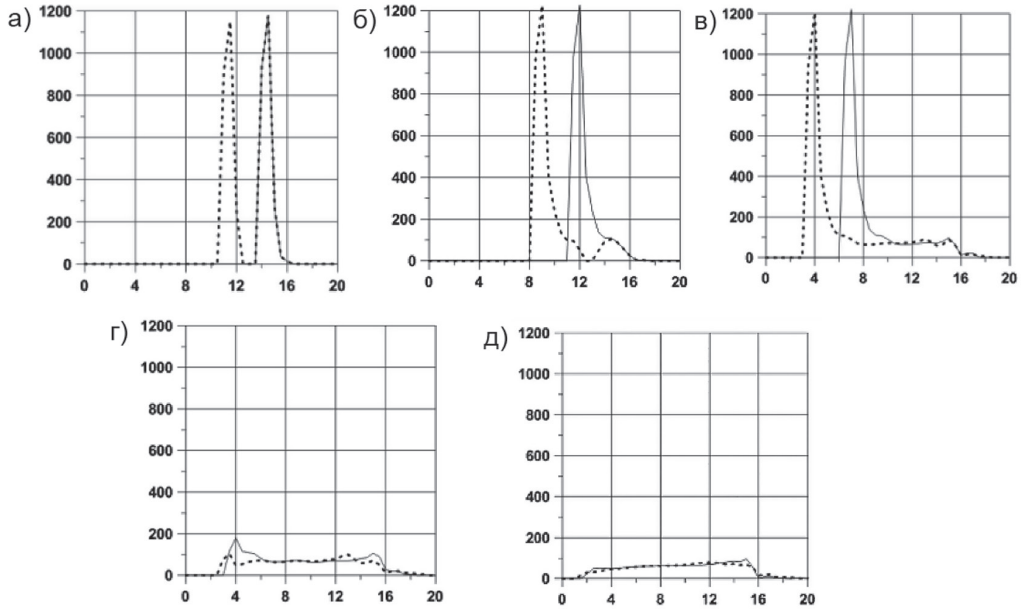

Рис. 5. Импульс давления и развитие волн детонации в сплошном заряде (сплошная линия) в сравнении с рассредоточенным зарядом (пунктирная линия). Ось абсцисс — расстояние от дневной поверхности, м; ось ординат — давление, МПа. Время после инициирования: 0,6 мс (а); 1,2 мс (б); 1,8 мс (в); 2,4 мс (г); 3,0 мс (д)

Fig. 5. Pressure impulse and detonation wave development in a continuous charge (solid line) compared to a dispersed charge (dashed line). The abscissa axis is the distance from the day surface, m; Y-axis — pressure, MPa. Time after initiation: 0.6 ms (a); 1.2 ms (b); 1.8 ms (c); 2.4 ms (d); 3.0 ms (e)

детонации резко падает. На рис. 5 показана хронограмма движения волны детонации вдоль оси сплошного (линия сплошная) и рассредоточенного (пунктир) зарядов.

На рис. 6 показаны результаты расчета распространения возмущения, вызванного взрывом сплошного заряда (сплошная линия) и взрывом рассредоточенного заряда (пунктирная линия), в моменты времени 60 мс и 80 мс после начала детонации заряда ВВ. При выходе волны детонации на свободную поверхность (0,5 м) давление падает

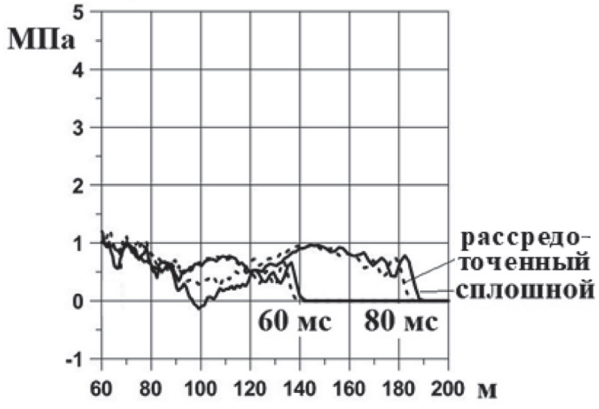

Рис. 6. Движение волны сжатия вдоль оси вглубь массива горной породы

Fig. 6. The movement of the compression wave along the axis deep into the rock massive

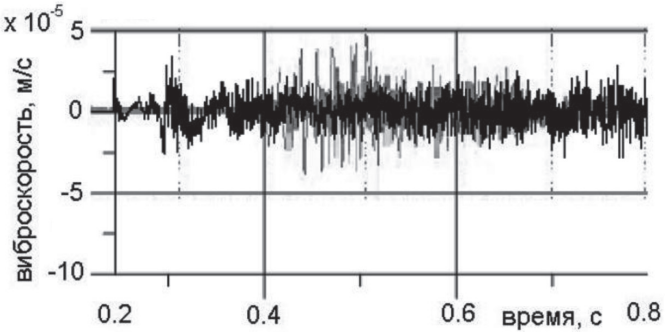

Рис. 7. Сопоставление рассчитанного сигнала в модельном датчике (черный цвет), расположенном на линии оси заряда с экспериментально полученным графиком виброскорости в сейсмоприемнике (линии темно-серого и светло-серого цвета)

Fig. 7. Comparison of the calculated signal in the model sensor (black) located on the charge axis line with the experimentally obtained vibration velocity graph in the geophone (gray and light gray lines)

до нуля, а на контакте с породой (15 м) амплитуда импульса давления уменьшается на три порядка. К моменту времени около 90 мс возмущение достигает поверхности кровли выработки, на которой установлены расчетные датчики регистрации сейсмосигналов, моделирующие промышленные регистраторы сейсмоприемников (геофоны) для записи сейсмовзрывной волны в натурных условиях.

На рис. 7 представлено сопоставление компьютерного моделирования рассчитанной сейсмограммы для сплошного заряда (черный цвет) с графиками виброскорости, зарегистрированными в промышленном эксперименте (темно-серый цвет — опытный взрыв, светло-серый — штатный взрыв) [1].

Из рис. 7 видно, что наблюдается близкое совпадение величины амплитуды колебаний, что говорит о возможности получения достаточно достоверных результатов предложенным вычислительным подходом для расчета состояния горного массива при взрывных работах, а также для оценки сейсмовоздействий, вызванных техногенными работами на подземных и наземных объектах горнодобывающего производства.

Проведенное компьютерное моделирование показывает образование и распространение упругих волн, вызванных взрывным воздействием, и связанное с

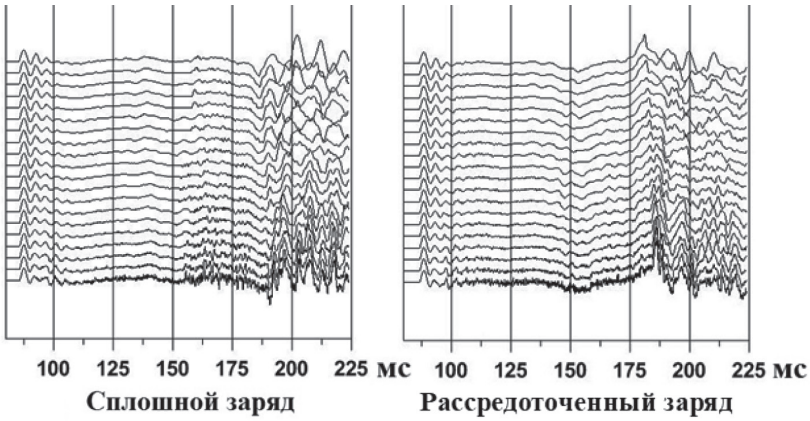

Рис. 8. Расчетные сейсмограммы виброскорости для сплошного и рассредоточенного зарядов

Fig. 8. Calculated vibration velocity seismograms for continuous and dispersed charges

ним перераспределение интенсивности напряжений в горном массиве. В течение всего расчета от начала инициирования зарядов записываются значения скоростей колебаний частиц горной породы в местах расположения датчиков, и они интерпретируются как сейсмограммы. На рис. 8 представлены показания датчиков в виде сейсмограмм для сплошного заряда в сравнении с рассредоточенным.

Можно видеть, что разные заряды образуют кластеры разной формы, в зависимости от взаимодействия волн возмущения, инициируемых взрывом. По их характеристикам можно оценить сейсмические события в массиве горной породы, вызванные взрывом, в зависимости от конструктивного типа заряда. Таким образом, компьютерное моделирование определяет вид отклика геосреды, в зависимости от типа применяемого заряда. Данный вычислительный подход основан на использовании неоднократно протестированного на решении геотехнических задач программного обеспечения, что позволяет исключать возникновение ошибок при задании технологических параметров заряда и контролировать процесс проведения взрывных работ. Следует отметить, что новый подход, затрагивающий смену существующей парадигмы во взаимоотношениях различных специальностей в горной науке, опережает подобные зарубежные исследования [18—20].

Выводы

Результаты моделирования показывают, что взрывное воздействие зарядов рассмотренных конструкций по-разному влияет на напряженно-деформированное состояние окружающего горного массива, что позволяет проводить подбор технологических параметров заряда путем проведения модельных расчетов на предмет снижения негативного воздействия взрывных работ на геосреду.

Установленная связь между взрывным действием зарядов различных конструкций и интенсивностью сейсмического излучения определяет предпосылки использования результатов данного исследования как основы сейсмического мониторинга.

Расчетами установлено, что выбранный вычислительный подход может адекватно оценивать сейсмический эффект взрыва зарядов различных конструкций, прогнозируя последствия их применения. Оптимизируя конкретную конструкцию заряда под определенные горнотехнические условия, можно значительно улучшить показатели по сейсмической составляющей в зоне проведения БВР.

Рассмотренные расчетный подход и концепция синергетического взаимодействия процессов взрывного разрушения и геомеханики при разработке месторождений полезных ископаемых обозначают дальнейшую перспективу развития горной науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов С. Д., Захаров В. Н., Закалинский В. М.* Снижение сейсмического воздействия массовых взрывов в карьере на устойчивость породного массива и подземных сооружений при комбинированной разработке угольных месторождений // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 59—64.

2. *Трубецкой К. Н., Викторов С. Д., Закалинский В. М., Осокин А. А.* Крупномасштабное взрывное разрушение массивов горных пород: состояние и перспективы применения // Горный журнал. — 2016. — № 10. — С. 64—69.

3. *Жариков И. Ф.* Аналитический метод прогнозирования результатов взрывного перемещения взрывных работ // Взрывное дело. — 2015. — № 114/71. — С. 71—83.

4. *Ракишев Б. Р., Мухамеджанов Е. Б., Ауэзова А. М.* Рациональные параметры расположения зарядов в уступе // Взрывное дело. — 2009. — № 102/59. — С. 17—26.

5. *Ракишев Б. Р.* Автоматизированное проектирование и производство массовых взрывов на карьерах. — Алматы: Гылым, 2016. — 340 с.

6. *Каплунов Д. Р., Мельник В. В., Рыльникова М. В.* Комплексное освоение недр: учеб. пособие. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. — 333 с.

7. *Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П.* О содержании понятия «масштаб отбойки» при освоении недр // Горный журнал. — 2009. — № 5. — С. 5—8.

8. *Козырев С. А., Кстянский В. Н., Аленичее И. А.* Оценка взаимодействия скважинных зарядов при различных интервалах замедлений между ними // Взрывное дело. — 2017. — № 117/74. — С. 60—75.

9. *Рубцов С. К., Шеметов П. А.* Управление взрывным воздействием на горный массив. — Ташкент: Фан, 2011. — 398 с.

10. *Кутузов Б. Н., Совмен В. К., Эквист Б. В., Вартанов В. Г.* Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 180 с.

11. *Цейтлин Я. И., Смолий Н. И.* Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. — М.: Недра, 1981. — 192 с.

12. *Мосинец В. Н.* Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.

13. *Рубцов С. К., Ершов В. П., Сидоров Е. Ю.* Сравнительный анализ применения неэлектрических систем инициирования на горнодобывающих предприятиях // Горный вестник Узбекистана. — 2005. — № 2. — С. 61—65.

14. *Libersky L. D., Randles P. W.* Smootred Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol. 139, 1996, pp. 375—408.

15. *Graya J. P. Monaghan J. J.* Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers // Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 135, 2004, pp. 259—283.

16. *Wilkins, Mark L.* Computer simulation of dynamic phenomena, Berlin-Heidelberg: Springer. Verlag, 1999, 246 p.

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

18. *Pradeep K. Singh, M. P. Roy, Amalendu Sinha*. Controlled Blasting for Safe and Efficient Mining Operations at Rampura Agucha Mine in India / 8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. China, 2014, pp. 137—151.

19. *Haibao Yi, Haitao Yang, Li Ming, Han Bin, Zheng Lujing*. Study on Open-Pit Precision Control Blasting of Easily Weathered Rock and its Application / 8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. — China, 2014, pp. 157—160.

20. *Y. Duan, D. Xiong, L. Yao, F. Wang, G. Xu*. Advanced Technology for Setting Out of Blastholes and Measurements while Drilling / 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Australia, 2015, pp. 593—598. ГИАБ

REFERENCES

1. Viktorov S. D., Zakharov V. N., Zakalinskiy V. M. Combustion of seismic effects on explosive structures and underground structures in the combined development of coal deposits. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 12, pp. 59—64. [In Russ].

2. Trubetskoy K. N., Viktorov S. D., Zakalinskiy V. M., Osokin A. A. Large-scale explosive destruction of rock massifs: state and application prospects. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 10, pp. 64—69. [In Russ].

3. Zharikov I. F. Analytical method for predicting the results of explosive movement of blasting. *Vzryvnoe delo*. 2015, no 114/71, pp. 71—83. [In Russ].

4. Rakishev B. R., Mukhamedzhanov E. B., Auezova A. M. Rational parameters of the location of charges in the ledge. *Vzryvnoe delo*. 2009, no 102/59, pp. 17—26. [In Russ].

5. Rakishev B. R. *Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstvo massovykh vzryvov na kar'erakh* [Automated design and production of mass explosions in open pits]. Almaty, Gylym, 2016, 340 p.

6. Kaplunov D. R., Mel'nik V. V., Ryl'nikova M. V. *Kompleksnoe osvoenie nedr*: uchebnoe posobie [Integrated development of the subsoil: Educational aid], Tula, Izd-vo TulGU, 2016, 333 p.

7. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. On the content of the concept of «breaking rate» during the development of subsoil. *Gornyy zhurnal*. 2009, no 5, pp. 5—8. [In Russ].

8. Kozyrev S.A., Kstyanskiy V.N., Alenichee I.A. Evaluation of the interaction of downhole charges at different intervals of decelerations between them. *Vzryvnoe delo*. 2017, no 117/74, pp. 60—75. [In Russ].

9. *Rubtsov S.K., Shemetov P.A. Upravlenie vzryvnym vozdeystviem na gornyy massiv* [Control of explosive effects on the mountain range], Tashkent, Fan, 2011, 398 p.

10. Kutuzov B.N., Sovmen V.K., Ekvist B.V., Vartanov V.G. *Bezopasnost' seysmicheskogo i vozdushnogo vozdeystviya massovykh vzryvov* [Safety of seismic and airborne mass explosions], Moscow, Izd-vo MGGU, 2004, 180 p.

11. Tseytlin Ya.I., Smoliy N.I. *Seysmicheskie i udarnye vozdushnye volny promyshlennykh vzryvov* [Seismic and shock air waves of industrial explosions], Moscow, Nedra, 1981, 192 p.

12. Mosinets V.N. *Drobyashchee i seysmicheskoe deystvie vzryva v gornykh porodakh* [The crushing and seismic action of an explosion in rocks], Moscow, Nedra, 1976, 271 p.

13. Rubtsov S.K., Ershov V.P., Sidorov E.Yu. Comparative analysis of the use of non-electric initiation systems in mining enterprises. *Gornyy vestnik Uzbekistana*. 2005, no 2, pp. 61—65.

14. Libersky L.D., Randles P.W. Smootred Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 139, 1996, pp. 375—408.

15. Graya J.P. Monaghan J.J. Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers. J*ournal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, vol. 135, pp. 259—283.

16. Wilkins, Mark L. *Computer simulation of dynamic phenomena*, Berlin-Heidelberg: Springer. Verlag, 1999, 246 p.

17. Shipovskiy I.E. Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code. *Nauchnyy vestnik NGU*. 2015, no 1 (145), pp. 76—82. [In Russ].

18. Pradeep K. Singh, M. P. Roy, Amalendu Sinha. Controlled Blasting for Safe and Efficient Mining Operations at Rampura Agucha Mine in India. *8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2014, pp. 137—151.

19. Haibao Yi, Haitao Yang, Li Ming, Han Bin, Zheng Lujing. Study on Open-Pit Precision Control Blasting of Easily Weathered Rock and its Application. *8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. China, 2014, pp. 157—160.

20. Y. Duan, D. Xiong, L. Yao, F. Wang, G. Xu. Advanced Technology for Setting Out of Blastholes and Measurements while Drilling. *11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Australia, 2015, pp. 593—598.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Викторов Сергей Дмитриевич[1] — доктор технических наук,
профессор, заместитель директора по научной работе,
e-mail: victorov_s@mail.ru,
Закалинский Владимир Матвеевич[1] — доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: vmzakal@mail.ru,
Шиповский Иван Евгеньевич[1] — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: iv_ev@mail.ru,
Мингазов Рафаэль Якубович[1] — ведущий инженер,
e-mail: ghost1064@yandex.ru,
[1] Институт проблем комплексного освоения недр РАН.
Для контактов: Закалинский В.М., e-mail: vmzakal@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.D. Viktorov[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
Deputy Director for Research, e-mail: victorov_s@mail.ru,
V.M. Zakalinsky[1], Doctor of Technical Sciences,
Leading Researcher, e-mail: vmzakal@mail.ru,
I.E. Shipovskiy[1], Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: iv_ev@mail.ru,
R.Ya. Mingazov[1], Leading Engineer, e-mail: ghost1064@yandex.ru.
Corresponding author: V.M. Zakalinsky, e-mail: vmzakal@mail.ru.