

УДК 622.235:539.3

Викторов Сергей Дмитриевич

профессор, доктор технических наук,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН,
111020, Москва, Крюковский тупик, д.4.
e-mail: viktorov_s@ipkonran.ru; viktorov_s@mail.ru

Закалинский Владимир Матвеевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН
e-mail: zakalinskiy_v@ipkonran.ru; vmzakal@mail.ru

Мингазов Рафаэль Якубович

ведущий инженер,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН
e-mail: mingazov_r@ipkonran.ru; ghost1064@yandex.ru

Шиповский Иван Евгеньевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова РАН
e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru; iv_ev@mail.ru

**К МЕТОДОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МИНИМИЗАЦИИ НЕГАТИВНЫХ
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ
И ЯВЛЕНИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ
ОСВОЕНИИ НЕДР***Аннотация:*

Совершенствование известных технологий буровзрывных работ при современных требованиях рыночной экономики и усложнения условий разработки месторождений требует новых научно-технических подходов на глубоких карьерах и рудниках при комплексном освоении недр. Представлен общий подход к решению современной проблемы, использующий анализ взрывного разрушения массивов горных пород и геомеханических факторов систем разработки твердых полезных ископаемых. В рамках разработки методологии обеспечения минимизации негативных геотехнологических рисков и явлений при комплексном освоении недр определено новое горно-физическое направление, отражающее причинно-следственные связи и закономерности взаимодействия геомеханики и взрывного разрушения массивов горных пород. Рассмотрение концептуальных вопросов данного приоритетного направления, имеющего различные горнотехнические приложения с реальным улучшением экономических показателей, позволило предложить соответствующую конструкцию заряда как средства увеличения доли потока энергии взрыва ВВ в определенном направлении. При этом достигается существенное повышение КПД направленного взрыва и сводится к минимуму его действие в обратном, «законтурном», направлении. На основании указанной взаимосвязи горнотехнических процессов и раскрытия связей и закономерностей на стыке различных горных наук разрабатывается методология и соответствующий инструментарий на базе с целью совершенствования техники и технологии в сложных геомеханических условиях разра-

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.021

Viktorov Sergey D.

Professor, Doctor of Engineering Sciences,
Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources, RAS,
111020 Moscow, 4 Kryukovskiy tupik
e-mail: viktorov_s@ipkonran.ru; viktorov_s@mail.ru

Zakalinsky Vladimir M.

Doctor of Engineering Sciences,
Leading Researcher,
Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources, RAS
e-mail: zakalinskiy_v@ipkonran.ru; vmzakal@mail.ru

Mingazov Rafael Ya.

Leading Engineer,
Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources, RAS
e-mail: mingazov_r@ipkonran.ru; ghost1064@yandex.ru

Shipovskii Ivan E.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources, RAS
e-mail: shipovskiy_i@ipkonran.ru; iv_ev@mail.ru

**ON THE METHODOLOGY
OF NEGATIVE EFFECTS MINIMIZATION
FOR GEOTECHNOLOGICAL RISKS
AND PHENOMENA IN THE COMPLEX
DEVELOPMENT OF SUBSURFACE
RESOURCES***Abstract:*

Improving known technology of drilling and blasting with existing modern requirements of market economy and with complication of the conditions of field development requires new scientific and technical approaches in the complex development of mineral resources in deep pits and mines. The article presents a general approach to solving this modern problem, using the analysis of the explosive destruction of rock massifs and geomechanical factors of solid mineral development systems. Within elaboration of methodologies minimizing geotechnical risks and phenomena in integrated development of depths, we defined a new mountain-physical direction of determining causal relationships and regularities for interaction of geomechanics and explosive destruction of rocks. Consideration of the conceptual issues of this priority area, which has various mining applications with a real improving potential in economic indicators, allowed us to propose an appropriate design of the charge as a mean of increasing the flow energy vector of the explosive in a certain direction. At the same time, a significant increase in the efficiency of the directed explosion is achieved and its effect in the reverse, "peripheral", direction is minimized. Based on the indicated interrelation of mining processes and the disclosure of relationships and regularities at the junction point of various mining sciences, a methodology and appropriate basic tools are developed to improve the technique and technology in complex geomechanical conditions of mineral development. Based on the results of the research, we propose a method of blasting operations to neutralize the influence of anomalies in the state of the massif while mining operations by the explosive method. The method

ботки полезных ископаемых. 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, скважинный заряд, массив горной породы, метод сглаженных частиц, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние (НДС), конфигурация пучка скважинных зарядов, геотехнологические явления.

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.

Key words: blast wave shape, downhole charge, rock mass, method of smoothed particles (SPH), computer simulation, stress-strain state (SSS/SDS), downhole charge beam configuration, geotechnological phenomena.

Введение

Горнодобывающая промышленность связана с разработкой полезных ископаемых, одним из важнейших технико-экономических условий эффективности которой является безопасность работ. Последняя имеет многофакторный характер, обусловленный разнообразием горнотехнических условий разработки месторождений. В современных рыночных условиях представляет особый интерес и актуальность, в частности, проблема обеспечения минимизации негативных геотехнологических рисков и явлений при комбинированной разработке твердых полезных ископаемых [1].

Решение этой проблемы на современном этапе невозможно без проведения исследований на основе подхода, при котором требование достижения одновременного сочетания безопасности и эффективности базируется на новых теоретических и экспериментальных новациях [2]. Актуальность этого очевидна при открытой и подземной разработках в условиях проявления удароопасных явлений, вызываемых техногенным воздействием на массив горной породы. Это обусловлено и тем, что практические задачи, например, оценки состояния горных выработок и сооружений требуют рассмотрения поведения массивов горных пород в широком диапазоне прилагаемых нагрузок и режимов нагружения, с выделением при этом главных процессов в этих системах.

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, вследствие чего в них могут инициироваться спонтанные динамические процессы. Так, известны многочисленные разновидности форм и масштабов воздействий на массив горных пород, приводящих к изменению его исходного состояния. Оно характерно тем, что параметры систем подземной и открытой разработок проектируются, основываясь на исходном состоянии 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].

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 на начальное состояние массива и изменяющие его. 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, зо-

ны 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 изменяющаяся, 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 также при разработке и рудных месторождений [5].

Основная часть

Практика добычи полезных ископаемых располагает различными способами решения вышеуказанной проблемы, в частности, направленным взрыванием, зачастую мелкомасштабно и своеобразно применяемым при разработке рудных месторождений. Каждая разновидность массового многорядного взрывания в масштабе контура блока неизбежно влечет изменение состояния массива за его пределами, что неизбежно вызывает последующую коррекцию его параметров. Своеобразие заключается в радикальности метода борьбы с этим явлением в виде образования специальной щели, то есть физического препятствия на пути влияющей на состояние массива взрывной волны. В этом случае, хотя направленность взрывного воздействия, безусловно, и имеет место при прохождении отраженной волны от границы щели по измененной части массива, она каждый раз ограничена пределами очередного взрыва.

Известны такие области и технологии применения способов направленного взрывания при

- образовании плотин, дамб, каналов и тому подобных хозяйственно-технических сооружений методами камерных зарядов или плоскими их системами;
- разработке месторождений полезных ископаемых.

В последнем случае это различные особенности вариантов систем разработки и инструментария, связанные с

- камуфлетным взрыванием, в частности, с камуфлетно-сотрясательным взрыванием на пластах, опасных по внезапным выбросам угля или газа с целью снижения давления горных пород, его дегазацией и предотвращением выбросов;

- с разработкой пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа, проведением вскрывающих выработок, бурением скважин через породу, заряданием их взрывчатым веществом и его взрыванием, бурением оконтуривающих скважин, при этом в них нагнетают водный раствор поверхностно-активного вещества в режиме гидрорыхления с целью снижения затрат на выемку угля и управления количеством выброшенного угля;

- разгрузкой удароопасных и структурно нарушенных участков рудных месторождений с целью повышения эффективности и безопасного ведения горных работ при их разработке. Для достижения направленного взрывного воздействия на зоны концентрации напряжений в горном массиве бурятся скважины, в них размещаются заряды ВВ и создаются вертикальные концентрированные заряды (ВКЗ) для управляемого в заданном направлении сотрясательного воздействия взрывом массива горных пород и разгрузки определенной его части;

- созданием разгрузочных щелей с помощью бурения разгрузочных скважин в стенках выработки и использованием энергии горного давления для разрушения межскважинных целиков. В результате бурения сближенных скважин в пределах области их влияния формируется разгруженная зона, что приводит к перемещению максимума сжимающих напряжений от контура выработки вглубь массива пород и образованию защитной зоны, препятствующей проявлению горного удара;

– разгрузкой породного массива в сопряжениях горных выработок, проведением вблизи них технологической выработки, сооружением разгрузочной щели путем бурения из технологической выработки серии рассредоточенных скважин, закладки разгрузочной щели, созданием компенсационных узлов и элементов податливости крепи ствола;

– с камуфлетным взрыванием, приведением при этом горных выработок, камер различного назначения и удароопасных участков массива горных пород в неудароопасное состояние, созданием защитной зоны с помощью камуфлетно-сотрясательного взрывания с применением заглубленных зарядов ВВ, расположенных в области концентрации напряжений впереди забоя, разрушающих или пластически деформирующих окружающую среду для разгрузки массива от горного давления, но не вызывающих остаточных деформаций на поверхности;

– с защитой выработок от горного давления, бурением опережающих скважин по горным породам на определенном расстоянии от проектного контура выработки, размещением в них зарядов ВВ, формированием зоны разрушенных пород камуфлетным взрыванием пород за контуром выработки и проведением выработки ствола.

Анализ этих технологий взаимодействия процессов с позиций системного подхода, общей концепции направленности вызывает, с одной стороны, необходимость конкретизации функционирования некоторых ее аспектов как сложной системы, с другой – разработки инструмента ее реализации с элементами универсальности. 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 научно-техническое направление, характеризующееся областью, технологией и способом применения в измененном массиве. Реализация этого нового горно-физического направления базируется на разработке соответствующего метода взрывных работ, отражающего причинно-следственные связи и закономерности взаимодействия геомеханики и взрывного разрушения массивов горных пород. Конкретизация сущности направления и способа его реализации определяется (достигается) двумя основополагающими аспектами:

– способом (инструментарием) воздействия на физические свойства материала горного массива, влияющим на геомеханическую ситуацию систем разработки месторождений полезных ископаемых или отражающимся на ней;

– непосредственным взрывным воздействием инструментария на трудно или невозможно достижимые при обычных способах проходки конструктивные элементы и параметры систем разработки, изменение которых скажется на их геомеханической обстановке.

При этом вклад в методологию обеспечения минимизации негативных явлений при комплексном освоении недр определяется решениями по конкретным ситуациям, в том числе из перечисленных выше. Для этого в ИПКОН РАН авторами разработан для патентования «Способ нейтрализации децентрализованными зарядами влияния аномалий состояния массива на горные разработки». *Вклад каждого из авторов носит творческий характер, начиная с коллективного обсуждения самой идеи проблемы и до распределения обязанностей по разносторонним аспектам и планам ее реализации.*

Теоретические предпосылки взрывных и горно-технологических работ горно-физического направления основываются на следующих принципах:

– взрывная квазистатическая фаза процесса взрыва до 60% энергии заряда распространяет свое действие на значительные расстояния и обуславливает, в частности, известный эффект предразрушения и его использование;

– достигается существенное расширение времени действия взрывного процесса на измененный массив сочетанием конструктивных особенностей способа и фактором подбора для него взрывчатых веществ с сильно растянутым импульсом взрыва, типа

простейших разновидностей игданита, удовлетворяющих требованиям горного производства;

– направленный заряд конструктивно отличается (характеризуется) такими универсальными свойствами, как технологичность исполнения, масштаб величины зарядов и характер их расположения; особенностями короткозамедленного взрывания, разнообразием конфигураций форм направленного развития взрывного процесса и другими возможностями при взаимодействии с геотехнологическими факторами измененного массива в интересах горного производства;

– изменяются, в режиме онлайн, отдельные параметры систем разработки с возможностью их влияния как на конструктивные особенности системы, так и на технологию в целом. Так, изменение порядка инициирования и некоторых других параметров взрыва при очистной отбойке слоев блока может существенно повлиять на технологию работ системы в целом.

Поскольку отсутствуют строгие теоретические решения, удовлетворяющие различным потребностям практики разработки месторождений, тем более опасным по геодинамическим явлениям, можно использовать комплексный подход их геомеханического обеспечения. Он включает как рассмотрение важнейших видов воздействия на рудный массив, угольный пласт и целики, так и аспекты и связи их взаимодействия на основе разработки принципиально новых научно-технических идей и предложений.

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. Актуальность проблемы можно показать на примере комбинированной открыто-подземной системы разработки угольного месторождения, в частности, на рудниках Горной Шории и разрезах Кузбасса.

В ИПКОН РАН для решения как проблемы в целом, так и для приведенного примера, выполнен комплекс исследований на базе компьютерного моделирования методом сглаженных частиц SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) [6], положительно зарекомендовавшим себя при решении задач геотехнической механики. Были сформулированы соответствующие упругопластические задачи механики сплошной среды, направленные на раскрытие причинно-следственных связей и закономерностей разновидностей форм динамических явлений на стыке геомеханики и взрывного разрушения горных пород [7, 8].

Сейсмоопасность сопутствует проведению взрывных работ на горных предприятиях, представляя реальную проблему, связанную с негативным воздействием взрывных работ на открытых разработках на подземные горные выработки (объекты), расположенные непосредственно под карьером при комплексной разработке одного и того же пластового угольного месторождения. Этим инициируется перераспределение напряжений в горном массиве с образованием зон различного напряженно-деформированного состояния в промежуточном массиве целика горной породы [9].

Результаты исследования легли в основу разработки нового метода взрывных работ по нейтрализации деконцентрированными зарядами влияния аномалий состояния массива на горные разработки. Метод включает механизм воздействия на аномальные состояния массива и соответствующий инструментарий, характеризующийся нетрадиционной конструкцией скважинного заряда с сочетанием его взрывных особенностей. Практика расчетов показала, что SPH метод может описывать динамические процессы в горном массиве с достаточной достоверностью. Рассчитывалось 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. Это позволило разработать достаточно универсальный метод нейтрализации деконцентрированными зарядами влияния аномалий

состояния массива на горные разработки. Широкое применение метода ознаменует новое научно-техническое направление в практике буровзрывных работ и в системах разработки месторождений полезных ископаемых.

Заключение

В рамках разработки методологии обеспечения минимизации негативных геотехнологических рисков и явлений при комплексном освоении недр определено новое горно-физическое направление, отражающее причинно-следственные связи и закономерности взаимодействия геомеханики и взрывного разрушения массивов горных пород.

На основании результатов исследований предложен метод взрывных работ по нейтрализации децентрированными зарядами влияния аномалий состояния массива на горные разработки. Метод включает механизм воздействия на аномальные состояния массива и соответствующий инструментарий, характеризующийся нетрадиционной конструкцией скважинного заряда с сочетанием его взрывных особенностей.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Викторов С.Д., Жариков И.Ф., Закалинский В.М., 2014. Взрывное разрушение горных пород при освоении недр. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 80 - 95.
2. Викторов С.Д., Гончаров С.А., Иофис М.А., Закалинский В.М., 2019. *Механика сдвига и разрушения горных пород*. Москва: РАН, 360 с.
3. Еременко А.А., 2013. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири. Новосибирск: ИГД СО РАН, 192 с.
4. Викторов С.Д., Закалинский В.М., Мингазов Р.Я., 2018. Механизм действия взрыва в способе снижения негативного сейсмического эффекта при комбинированной разработке полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S1, С. 102 - 111.
5. Кутузов Б.Н., Совмен В.К., Эквист Б.В., Вартанов В.Г., 2004. Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов. Москва: Изд-во МГГУ, 180 с.
6. Минеев С.П., Шиповский И.Е., Киселев В.В., Гулай А.А., 2015. Моделирование поведения выбросоопасного массива при взрывных работах в проводимой выработке. *Геотехнічна механіка*, № 123, С. 26 - 39.
7. Zhendong Leng, Jinshan Sun, Wenbo Lu, Xianqi Xie, Yongsheng Jia, Guisong Zhou, Ming Chen. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation. *Computers and Geotechnics*. Computers and Geotechnics. vol. 129, January 2021. doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103873.
8. Libersky L.D., Randles P.W. Smoothed Particle Hydrodynamics: Some recent implementations and applications. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 139, 1996, pp.375 - 408.
9. 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.

References

1. Trubetskoi K.N., Zakharov V.N., Viktorov S.D., Zharikov I.F., Zakalinskii V.M., 2014. *Vzryvnoe razrushenie gornykh porod pri osvoenii nedr* [Explosive destruction of rocks during development of subsurface resources]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3, pp. 80 - 95.
2. Viktorov S.D., Goncharov S.A., Iofis M.A., Zakalinskii V.M., 2019. *Mekhanika sdvizheniya i razrusheniya gornykh porod* [Mechanism of movement and destruction of rocks]. Moscow: RAN, 360 p.

3. Eremenko A.A., 2013. *Sovershenstvovanie tekhnologii burovzryvnykh работ na zhelezorudnykh mestorozhdeniyakh Zapadnoi Sibiri* [Improving of technology of drilling and blasting operations at iron ore deposits in Western Siberia]. Novosibirsk: IGD SO RAN, 192 p.
4. Viktorov S.D., Zakalinskii V.M., Mingazov R.Ya., 2018. *Mekhanizm deistviya vzryva v sposobe snizheniya negativnogo seismicheskogo effekta pri kombinirovannoi razrabotke poleznykh iskopaemykh* [Explosion mechanism in the method of reducing the negative seismic effect during combined development of minerals]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S1, pp. 102 - 111.
5. Kutuzov B.N., Sovmen V.K., Ekvist B.V., Vartanov V.G., 2004. *Bezopasnost' seismicheskogo i vozdushnogo vozdeistviya massovykh vzryvov* [Safety of seismic and air impact of mass explosions]. Moscow: Publ. MGGU, 180 p.
6. Mineev S.P., Shipovskii I.E., Kiselev V.V., Gulai A.A., 2015. *Modelirovanie povedeniya vybrosopasnogo massiva pri vzryvnykh rabotakh v provodimoi vyrabotke* [Behavior modeling of an outburst-prone massif during blasting operations by ongoing works]. *Geotekhnicheskamekhanika*, № 123, pp. 26 - 39.
7. Zhendong Leng, Jinshan Sun, Wenbo Lu, Xianqi Xie, Yongsheng Jia, Guisong Zhou, Ming Chen. Mechanism of the in-hole detonation wave interactions in dual initiation with electronic detonators in bench blasting operation. *Computers and Geotechnics*. *Computers and Geotechnics*. vol. 129, January 2021. doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103873.
8. 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.
9. 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.