

УДК 622.271:552. (470.6)

К КОНЦЕПЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.И. Комащенко, Е.Д. Воробьев, В.И. Сарычев, К.А. Головин

Выполнен анализ способов, методов, схем взрывания и средств их инициирования в обводненных массивах Криворожских месторождений. Сформулирована концепция о детонационных процессах при взрывании в обводненных условиях. Детализованы методы буровзрывных работ путем рационализации схем коммутации взрывной сети. Даны рекомендации по снижению удельного расхода ВВ при компактном развале горной массы обеспечении заданного качества дробления. Повышение эффективности буровзрывных работ при открытой разработке обводненных месторождений обеспечивается путем улучшения показателей взрывания на основе совершенствования конструкций скважинных зарядов и способов их инициирования.

Ключевые слова: горный, массив, порода, руда, скважина, буровзрывные работы, добыча, карьер, взрывание, разрушение, гранулометрический состав, детонация.

Оценка процессов разрушения горных пород взрывом основывается чаще всего на положениях теории разрушения, основанной на атомном механизме процесса [1].

В качестве предела принимается критическая интенсивность касательных или нормальных напряжений [2]. Так, в теории трещин А.А. Гриффитса [3] процесс хрупкого разрушения твердого тела зависит от развития в нем трещин, которые под влиянием напряжений приводят к хрупкому разрушению твердого тела.

В подавляющем большинстве теорий разрушения объектом исследования является однородная среда. Для неоднородных сред лучшие результаты дает статическая теория прочности, в которой разрушение рассматривается, реакция на критическое усилие на площадках, перпендикулярных главным осям тензора напряжений. Критерий прочности основан на оценке повреждений .

На качество и эффективность взрывных работ влияют свойства взрывчатых веществ, параметры взрывания учетом структурных особенностей массива и его физико-механических свойств [4].

Целью настоящего исследования является повышение эффективности взрывания зарядов ВВ в обводненных скважинах Криворожских карьеров. Она достигается совокупным использованием факторов замедления времени взрывания, качества дробления в зависимости от числа зарядов и коэффициента сближения скважин и удельного расхода ВВ [5].

Исследуется ориентация взрывной отбойки относительно главной оси анизотропии взрываеваемого массива, взаимодействие взрывных волн с

прослойками в массиве горных пород и влияние ориентации относительно основных систем трещин [6].

Для достижения цели используются результаты исследований полей напряженно-деформированного состояния в упругих, вязких, вязкоупругих средах, и труды по математической теории деформирования и разрушения [7].

При рассмотрении двумерных задач теории упругости и вязкости с различными простейшими граничными условиями среда принимается однородной и изотропной. Для однородной упругой среды решены основные задачи статической и динамической теории упругости в случае одномерной неоднородности.

Наибольшее развитие получила теория упругости периодически неоднородных сред, в частности, слоистых сред. Для сред с более сложной неоднородностью решен более узкий класс задач, которые сводятся к расчету возмущения однородного поля, вызванного одним и системой простейших включений, или к рассмотрению концентрации напряжений на границе включений [8].

Горные породы, в частности, железистые кварциты, имеют сложную структуру. Процесс взрывного воздействия в них является многофакторным процессом, чем объясняется тот факт, что точное аналитическое решение имеется лишь для наиболее простых моделей статического и динамического воздействия при дроблении и разрушении массива. Механизм же разрушения сложно-структурных массивов горных пород практически не изучен.

Анализ показывает, что при взрывном разрушении и дроблении, которые различаются лишь долей участия продуктов детонации зарядов ВВ, соседствуют основные направления: поршневое действие продуктов детонации ВВ в замкнутом пространстве; действие волн напряжений, распространяющихся от заряда к свободной поверхности и в объеме.

Фролов М.М., Боресков М.Ф., Суханов А.Ф. и др. рассматривают явление взрыва как процесс мгновенного перехода потенциальной энергии ВВ в механическую, вследствие чего происходит отделение части разрушаемого массива по боковой поверхности воронки отрыва с последующим перемещением и дроблением. Такой механизм соответствует разрушению относительно слабых горных пород, которые обладают способностью поглощения энергии волн напряжений. К таким породам относятся скальные породы вскрыши криворожских карьеров.

Сторонники второго направления считают, что разрушение при взрыве массивов горных пород происходит в основном за счет волн напряжений, например, А.Н. Ханукаев [9]. Баранов Е.Г. определил долю участия волн напряжений в общем объеме разрушения (80...90 %). К породам с таким механизмом разрушения относится большинство скальных пород, разрабатываемых карьерами ГОК Кривбасса [10].

Мельников Н.В., Покровский Г.И., Баранов Л.Н., Мец Ю.С. и др. отмечают, что соотношение между действием волн напряжений и давлением газов зависит от структурных свойств массивов горных породы, формы взрывного импульса и т.д.

Ханукаев А.Н. [9] уточнил, что процесс разрушения массивов взрывом определяется величиной акустической жесткости и подразделил массивы на группы: с малой акустической жесткостью, средней акустической жесткостью и большой акустической жесткостью. Такая классификация используется при расчете параметров взрывных работ.

Разрушение массивов горных пород с небольшой акустической жесткостью (грунты и слабые горные породы) связано с действием расширяющихся газов, при этом целесообразно использовать ВВ с малой скоростью детонации и значительным объемом образующихся газов.

Горные породы средней акустической жесткости разрушаются как от действия отраженной волны напряжений, так и от действия расширяющихся газов. Для таких горных пород эффективными могут быть взрывчатые вещества со средней скоростью детонации.

Породы с большими значениями акустической жесткости разрушаются под действием отраженных от свободной поверхности массива волн. Для разрушения таких пород целесообразно использовать взрывчатые вещества с высокими детонационными характеристиками.

Ефремов Э.И. [12] утверждает, что разрушение массива при взрыве протекает под совокупным воздействием продуктов детонации, волн разгрузки и ударных волн.

В начальной стадии основную роль играют расширяющиеся газообразные продукты детонации, находящиеся под высоким давлением. Вторая стадия процесса, как правило, связана с распространением отраженной волны от поверхности разрежения и ее взаимодействия с хвостовой частью бегущей волны сжатия, которая заканчивается на разделе массива и газовой полости после двукратного прохождения волны разрежения от поверхности. На третьей стадии действие ударных волн незначительно, дробление массива происходит за счет газообразных продуктов, путем проникновения газов в трещины, отделение и перемещение кусков породы от забоя.

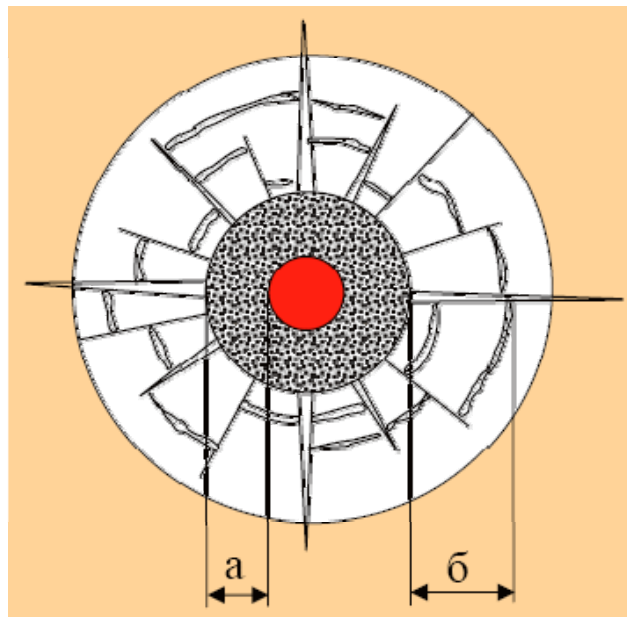
Первая зона (зона «а») – зона пластических деформаций и интенсивного дробления формируется под действием ударной волны.

Вторая зона (зона «б») – зона трещинообразования или зона основного разрушения формируется под действием волн напряжения (затрачивается около 74 % запаса энергии ВВ). За ними дальше следует третья зона – зона сейсмических колебаний, формируется под действием сейсмических волн (затрачивается около 1 % запаса энергии ВВ).

Схема действия взрывания заряда ВВ иллюстрируется рис. 1.

При взрывании в обводненных скважинах Криворожских карьеров с использованием неводоустойчивых взрывчатых веществ используют специальные технологии формирования зарядов ВВ. Обводненность месторождений изменяет механизм взрывания.

В крупноблочных горных породах важную роль играют волны напряжений. При взрывании в сухом массиве, действие ударной волны при взрыве ВВ вызывает измельчение и уплотнение массива вокруг заряда. В обводненном же массиве скорость продольной волны в водном промежутке равняется 1500 м/с/. Давление на стенки в обводненной скважине меньше, чем давление на контакте ВВ со стенками полости в сухой среде и увеличения объема зарядной полости не происходит.



**Рис. 1. Схема взрывного дробления породы с направлением развития радиальных и тангенциальных трещин:
а – зона интенсивного дробления; б – зона образования трещин**

При этом давление на стенки скважины почти в два раза больше, чем в обводненном массиве. Как следствие, объем зоны интенсивного дробления и выход мелких фракций в сухом массиве значительно выше [13].

В обводненных массивах пород напряжения с удалением от заряда ВВ затухают медленнее, чем в сухих массивах, дробление их менее качественное, что связано со снижением скорости действия детонации. Механизм взрывного разрушения определяется преимущественно структурными свойствами горных массивов, что определяет выбор эффективных взрывчатых веществ, средств инициирования и конструктивных видов зарядов [14].

С увеличением глубины разработки обводненность горных пород возрастает. Так, на достигнутых глубинах 250...350 м обводненность достигает 70...80 %. В этих условиях применение неводоустойчивых взрывчатых веществ становится невозможным из-за растворения аммиачной селитры в воде, расслоения зарядов ВВ и оседания их в скважинах. Поэтому в сильно обводненных карьерах, применяют специальные взрывчатые вещества.

Представляет интерес комбинированные заряды из водоустойчивых и неводоустойчивых ВВ. Нередко такие конструкции зарядов формируются без учета гидродинамического режима скважин. Применение водонепроницаемых полиэтиленовых оболочек не позволяет формировать эффективные конструкции зарядов, например, с воздушными, инертными и осевыми полостями.

Нами исследованы факторы обводненности скважин, скорости фильтрации и времени восстановления гидростатического уровня воды после её откачки из скважин.

По результатам этих исследований разработана классификация взрывааемых массивов по гидродинамическому режиму, с помощью которой можно рационализировать конструкции зарядов и планировать расход ВВ при разработке обводненных залежей.

Взрывное водопонижение с целью увеличения удельного веса неводоустойчивых взрывчатых веществ метод требует проведения дополнительного объема взрывных работ для образования водосточных емкостей, что повышает стоимость взрывных работ. Такие способы водопонижения могут быть успешно применены на рабочих площадках шириной не более 50 м. На карьерах Криворожских ГОК проведены промышленные исследования на предмет осушения взрывных скважин взрыванием донных зарядов. Несмотря на высокую эффективность осушения путем спользования специальных смесей, тампонирующих стенки скважин, этот метод не нашел широкого применения.

Не нашел широкого применения метод откачки воды из скважин с помощью специальных насосов.

С целью снижения сейсмического воздействия использованы схемы с короткозамедленным взрыванием зарядов ВВ, чем была доказана роль схем взрывания как одного из важнейших способов управления действием взрыва.

В основу классификации схем короткозамедленного взрывания [15] положена конфигурация фронта отбойки. Большинство схем взрывания имеют прямолинейную конфигурацию фронта отбойки, образующуюся в результате одновременного инициирования зарядов, расположенных по прямой линии, расстояние между которыми не превышает двойного радиуса разрушения. Угловая конфигурация фронта отбойки получается в результате последовательного короткозамедленного взрывания зарядов,

расположенных в одном ряду. Ломаная линия забоя в процессе взрыва создается при клиновых и трапециевидных схемах взрывания, используемых для направленного соударения взорванных масс. Дугообразная линия отбойки характерна для радиальных схем [16].

Одним из основных факторов, определяющих эффективность использования короткозамедленного взрывания, является интервал замедления между взрываемыми зарядами.

В основу определения времени замедления положены представления о механизме разрушения пород с применением короткозамедленного взрывания. Покровский Г.И. предложил определять интервал замедления из условия прохождения волны сжатия до свободной поверхности, ее отражения и прохождения до второго заряда. Ханукаев А.Н. [11] в определении интервала замедления исходит из предположения о развитии процесса разрушения при взрывании в такой последовательности: распространение волны напряжения от заряда и обратно, образование трещин, формирование новой свободной поверхности после смещения горной массы. Мосинец В.Н. [4] считает, что последующую серию зарядов следует взрывать сразу же после раскрытия трещин в среде от предыдущей серии зарядов до начала их обратного смыкания. Период замедления в этом случае должен быть равен времени нарастания трещин до максимального значения в объеме радиуса разрушения.

Определение интервалов по вышеприведенным методикам связано с определенными трудностями и дает лишь предварительный результат, который уточняется в процессе взрывных работ. С помощью схем взрывания можно управлять параметрами развала горной массы и коэффициентом разрыхления [17–18].

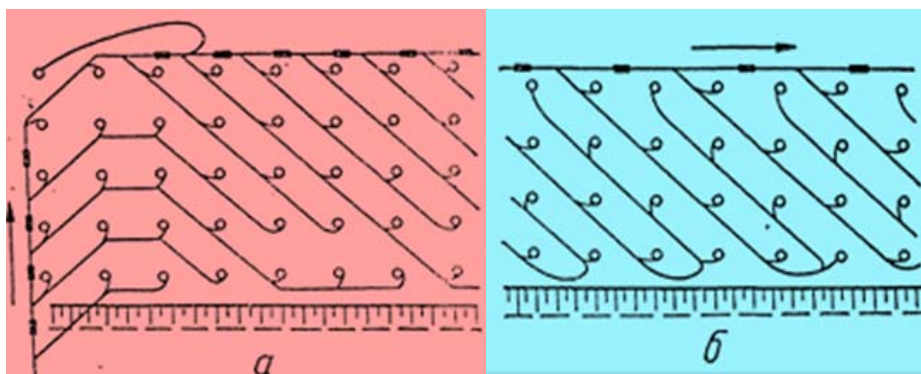


Рис. 2. Диагональные схемы: а – с трапециевидным врубом на фланге блока при увеличенной линии сопротивления; б – со встречным иницированием рядов зарядов

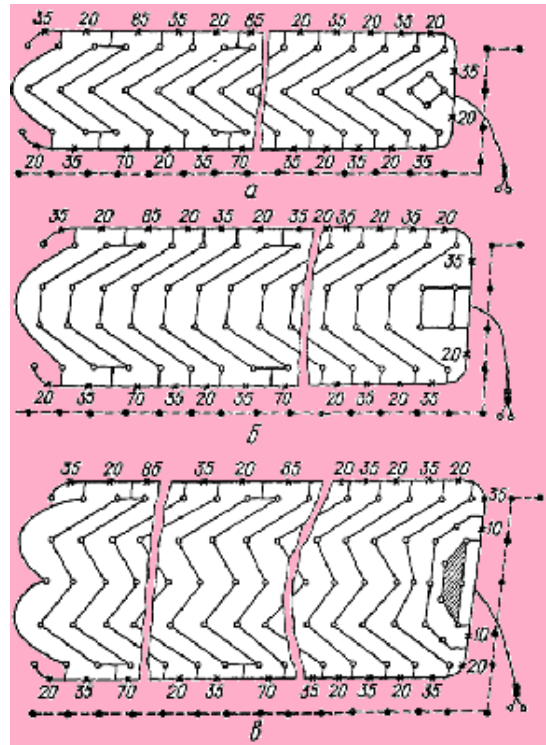


Рис.3. Схемы взрывания с управлением параметрами развала:
а – при трехрядном расположении скважин в блоке; б, в – то же
при четырех- и пятирядном расположении

Наиболее совершенны врубовые схемы коммутации, которые способствуют образованию новых свободных поверхностей, что позволяет увеличить соударение кусков породы, а также обеспечить компактный развал. Схемы с продольным врубом обычно применяются при проходке траншей. Применение схемы с поперечным (торцевым) врубом позволяет сократить ширину развала на 15...20 % при направленном взрыве. Клиновые и трапециевидные схемы, обычно применяют при взрывании трудно-взрываемых пород. С помощью диагональных схем уменьшают величину линии наименьшего сопротивления и тем самым улучшают качество взрывания. Считается, что наиболее эффективными схемами замедленного взрывания являются диагональные схемы с обратным инициированием диагональных рядов вдоль бровки уступа (рис. 2), а также и схемы взрывания, способствующие управлению параметрами развала горной массы и регулированию коэффициента разрыхления (рис. 3).

Авторами установлено, что наилучшие результаты с точки зрения развала и коэффициента разрыхления применительно к условиям карьеров Криворожских ГОК имеет место при 4–5-рядном взрывании.

При выборе схем взрывания основная роль отводится максимально допустимому интервалу времени замедления между смежными рядами скважинных зарядов ВВ. По многим рекомендациям этот показатель равен 100 мс.

Выводы

1. Показатели эффективности отбойки обводненных горных пород оптимизируются на основе концепции о детонационных процессах в скважинных зарядах.
2. В условиях карьеров Криворожских ГОК лучшие показатели отбойки обеспечивает схема с 4–5-рядным взрыванием.
3. Предлагаемая технология отбойки обводненных горных пород позволяет при обеспечении качества дробления снизить удельный расход на 12 % при компактном развале с коэффициентом разрыхления 1,2.

Список литературы

1. Комащенко В.И., Воробьев Е.Д., Белин В.А. Перспективы развития промышленных взрывчатых веществ и применения современных технологий взрывных работ с учетом экологической безопасности // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 157-168.
2. Trivino L., Mohanty B. Estimation of blast-induced damage through cross-hole seismometry in single-hole blasting experiments // Proceeding of 10-th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Fragblast 10. New Delhi. India. 2012. P. 685-695.
3. Комащенко В.И., Воробьев Е.Д., Волков Д.А. Потенциал повышения качества, надежности и экологической безопасности технологии взрывных работ на карьерах // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 1. С. 166-179.
4. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Разрушение горных пород взрывом. М.: Горная книга, 2009. Ч. 1. 471с.
5. Комащенко В.И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 1. С. 34-43.
6. Голик В.И., Комащенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // Горный журнал. 2017. № 3. С. 43-47.
7. Галкин В.В. Заряжание обводненных скважин неводоустойчивыми ВВ // Горный журнал. 1980. № 3. С. 40 - 45.
8. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. T. 10. № 17. P. 38105-38109.
9. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. М.: Госгортехиздат, 1962. 200 с.
10. Kachurin N., Komashchenko V., Morkun V. Environmental monitoring atmosphere of mining territories // Metallurgical and Mining Industry. 2015. T. 7. № 6. P. 595-598.

11. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Чайковский А.И. Механизированное зарядание взрывных скважин неводоустойчивыми ВВ для дробления обводненных пород // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1989. № 2. С. 41 - 42.

12. Numerical modeling of injection, stress and permeability enhancement during shear stimulation at the Desert Peak Enhanced Geothermal System / D. Dempsey, S. Kelkar, N. Davatzes, S. Hickman, D. Moos // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. № 78. 2015. P. 190–206.

13. Голик В.И., Комащенко В.И. Оптимизация проектов буровзрывных работ на карьерах с использованием компьютерных информационных систем // *Безопасность труда в промышленности*. 2016. № 7. С. 54-60.

14. Голик В.И., Комащенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015. № 4. С. 76-88.

15. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Баранник В.В. О механизме взрывного разрушения обводненных твердых сред // *Сб. научных трудов ИГТМ НАН Украины «Геотехническая механика»*. № 50. 2004. С. 107-114.

16. Комащенко В.И., Воробьев Е.Д., Лукьянов В.Г. Разработка технологии взрывных работ, уменьшающей вредное воздействие на окружающую среду // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 8. С. 33–40.

17. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, I. Gaponenko // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Т. 7. № 7. P. 383-387.

18. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, Z. Khasheva // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Т. 7. № 5. P. 401-405.

Виталий Иванович Комащенко, д-р техн. наук, проф., komashchenko@inbox.ru, Россия, Белгород, Белгородский национальный исследовательский университет,

Воробьев Евгений Дмитриевич, канд. техн. наук, доц., vorobev@bsu.edu.ru, Россия, Белгород, Белгородский национальный исследовательский университет,

Сарычев Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., sarychevy@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Головин Константин Александрович, д-р техн. наук, зав. кафедрой, sarychevy@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TO THE CONCEPT OF ENVIRONMENTALLY RATIONAL EXPLOSIVE DESTRUCTION
OF ROCKS DURING OPEN DEVELOPMENT OF DEPOSITS

V.I. Komashchenko, E.D. Vorobiev, V.I. Sarychev, K.A. Golovin

Analyzing methods of blasting schemes and means of their initiation in the flooded massifs of Krivorozhsky deposits is carried out. The concept of detonation processes during explosion in flooded conditions is formulated. Drilling and blasting methods are detailed by streamlining blast network switching schemes. Recommendations are given on reducing the specific consumption of explosives in case of compact rock mass collapse ensuring a given crushing quality. An increase in the efficiency of drilling and blasting operations during the open development of irrigated deposits is ensured by improving the blasting rates by improving the design of well charges and the methods for initiating them.

Key words: massif, rock, ore, well, blasting, mining, quarry, blasting, destruction, particle size distribution, detonation.

Komashchenko Vitalyi Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, komashchenko@inbox.ru, Russia, Belgorod, Belgorod National Research University,

Vorobiev Evgenyi Dmitrievich, candidate of technical sciences, docent, vorobiev@bsu.edu.ru, Russia, Belgorod, Belgorod National Research University,

Sarychev Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, sarychevy@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Golovin Kostantin Alexandrovich, doctor of technical sciences, head of chair, sarychevy@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

Reference

1. Komashchenko V.I., Vorobyov E.D., Belin V.A. Prospects for the development of industrial explosives and the use of modern blasting technologies taking into account environmental safety // Bulletin of Tula State University. Earth sciences. 2017. No. 3. P. 157-168.
2. Trivino L., Mohanty B. Estimation of blast-induced damage through cross-hole seismometry in single-hole blasting experiments // Proceeding of 10-th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Fragblast 10. New Delhi. India 2012. P. 685-695.
3. Komashchenko V.I., Vorobyov E.D., Volkov D.A. The potential of improving the quality, reliability and environmental safety of blasting technology in quarries // Bulletin of Tula State University. Earth sciences. 2018. No. 1. S. 166-179.
4. Kutuzov B.N. Methods of blasting // Destruction of rocks by explosion. M.: Mountain book. 2009. Part 1. 471s.
5. Komashchenko V.I. The development of explosive technology that reduces the harmful effects on the environment // Bulletin of the Tula State University. Earth sciences. 2016. No. 1. S. 34-43.
6. Golik V.I., Komashchenko V.I. Ferrous quartzite enrichment waste as a raw material for additional extraction of metals and use as filling mixtures // Gorny Zhurnal. 2017. No. 3. P. 43-47.
7. Galkin V.V. Charging flooded wells with non-water-resistant explosives // Mining Journal. 1980. No. 3. P. 40 - 45.

8. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. 2015.Vol. 10. No. 17. P. 38105-38109.
9. Hanukaev A.N. The energy of stress waves during the destruction of rocks by an explosion. M.: Gosgortekhzdat. 1962.200 p.
10. Kachurin N., Komashchenko V., Morkun V. Environmental monitoring atmosphere of mining territories // Metallurgical and Mining Industry. 2015.Vol. 7. No. 6. P. 595-598.
11. Efremov E.I., Petrenko V.D., Tchaikovskiy A.I. Mechanized loading of blast holes with non-water-resistant explosives for crushing waterlogged rocks // Metallurgical and mining industry. 1989. No. 2. P. 41 - 42.
12. Numerical modeling of injection, stress and permeability enhancement during shear stimulation at the Desert Peak Enhanced Geothermal System / D. Dempsey, S. Kelkar, N. Davatzes, S. Hickman, D. Moos // International Journal of Rock Mechanics and mining science. No. 78. 2015. R. 190–206.
13. Golik V.I., Komashchenko V.I. Optimization of drilling and blasting projects in quarries using computer information systems // Occupational Safety in Industry. 2016. No. 7. P. 54-60.
14. Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. The concept of combining technologies for the development of ore deposits // Bulletin of Tula State University. Earth sciences. 2015. No. 4. P. 76-88.
15. Efremov E.I., Nikiforova V.A., Barannik V.V. On the mechanism of explosive destruction of flooded solid media // Sat. scientific works of IGTM NAS of Ukraine, "Geotechnical mechanics". No. 50. 2004. S. 107-114.
16. Komashchenko V.I., Vorobiev E.D., Lukyanov V.G. Development of blasting technology that reduces the harmful effects on the environment // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering. 2017.V. 328. No. 8. P. 33–40.
17. Improving the effectiveness of explosive breaking on the bade of new methods of borehole charges initiation in quarries / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, I. Gaponenko // Metallurgical and Mining Industry. 2015.Vol. 7. No. 7. P. 383-387.
18. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, Z. Khasheva // Metallurgical and Mining Industry. 2015.Vol. 7. No. 5. P. 401-405.