

search. Complex researches of negative influence of non-metallic quarries on the environment on the established factors of influence are completed. Rational technological schemes for implementation in quarries for the development of deposits of solid non-metallic minerals are defined.

**The originality.** Patterns of emission of harmful substances in the zone of influence of mining enterprises are installed.

**Practical implications.** The research was carried out in the course of carrying out the research work "Development of technological bases of ecologically safe extraction of minerals in technogenic-loaded mining regions of Ukraine". The obtained research results allow to significantly reduce the size of sanitary protection zones on non-metallic quarries.

**Keywords:** *deposits of non-metallic minerals, technological schemes, emissions of harmful substances.*

УДК 622.235:622.271

© А.А. Скачков, С.А. Жуков

## РАЗВИТИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ОБРАТНОМ ВЗРЫВАНИИ РЯДОВ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

© A. Skachkov, S. Zhukov

## DEVELOPMENT OF MODELING FRACTURE ROCK MASSES IN REVERSE SERIES WELL BLASTING EXPLOSIVES

Исследовано взаимодействие скважинных зарядов, расположенных в приконтурной зоне взрываемого уступа. Рассмотрено формирование напряженно-деформированного состояния породного массива и обоснована целесообразность разрушения пород с изменением порядка подрывания зарядов. В нечетных рядах заряды формируются по нормальному энергонасыщению, а в четных – ниже на 30-45%. Начинается инициирование взрыва в обратном относительно традиционного порядке – с уменьшенного заряда во втором ряду, затем с задержкой ближайшего полного заряда в первом, после чего – следующая пара и т.д. Затем инициируются заряды следующих пар рядов: от уменьшенных зарядов – к полным.

Досліджено взаємодію свердловинних зарядів, розташованих в приконтурній зоні уступу, що підривається. Розглянуто формування напружено-деформованого стану породного масиву й обґрунтовано доцільність руйнування порід зі зміною порядку підривання зарядів. У непарних рядах заряди формуються за нормальним енергонасиченням, а в парних – нижче на 30-45%. Починається ініціювання вибуху в зворотному щодо традиційного порядку – зі зменшеного заряду в другому ряді, потім, із затримкою, найближчого повного заряду в першому, після чого – наступної пари і т.д. Потім ініціюються заряди наступних пар рядів: від зменшених зарядів – до повних.

**Постановка проблемы.** Научные исследования и производственная практика ведения взрывных работ в карьерах свидетельствуют о том, что уступ горных пород наиболее неравномерно разрушается в зоне, прилегающей к откосу, в результате чего образуется горная масса с самой неоднородной кусковатостью [1-3]. Исключительно сложное напряженно-деформированное состояние массива в этой части при взаимодействии скважинных зарядов, которые подрываются в первом и втором рядах, является одной из главных причин неконтролируемого выхода негабаритной фракции при ведении взрывных работ, что негативно сказывается на технико-экономических показателях всего горнодобывающего производства, поэтому поиск путей решения данной задачи **является весьма актуальным** [3, 4], так как в свою очередь **способствует решению проблемы** повышения эффективности буровзрывных работ.

**Как показывает анализ последних исследований** по теории взрывного разрушения кристаллических массивов и практики БВР [2-4], **одним из наименее исследованных теоретически и нерешенных практически вопросов является** неравномерное влияние на формирование взрывом нагрузки краевой части уступа, оптимизировать что становится возможным при целенаправленном использовании эффектов развития динамической зоны разрушения, создаваемой силовыми полями взаимодействующих зарядов приконтурных рядов [4, 5]. В связи с этим **в исследования закладывалась идея** возможности целевого использования динамических эффектов, проявляющихся при взаимодействии взрыва скважинных зарядов, для решения чего **задачи исследования** формулировались согласно ей, а именно: заряды первого ряда скважин инициируются только после прохождения через них прямой и отраженной от откоса уступа волны взрыва зарядов второго ряда, образуя благодаря благоприятной суперпозиции взрывных волн оптимальную динамическую зону в соответствии с конкретными условиями.

**Изложение материала исследований.** Рассмотрим процесс взаимодействия пары смежных скважинных зарядов ВВ при инициировании их через определенное замедление и поведение горного массива, заключенного между ними. Причем первым подрывают скважинный заряд ВВ, начиная со второго ряда, а затем – смежный с ним заряд первого ряда. Через определенные интервалы аналогично производят подрыв остальных скважинных зарядов ВВ разной мощности [5].

Для решения поставленной задачи рассмотрим цилиндрическое тело (стержень), расположенное перпендикулярно по отношению к смежным рассматриваемым скважинным зарядам. Выбор формы тела, в нашем случае – не случайный, так как многие исследователи [1, 2] рассматривают поведение разрушаемого горного массива как совокупность упругих стержней.

Будем считать, что поперечный разрез цилиндрического тела – небольшой по отношению к его длине. Направим ось абсцисс по оси цилиндра, и будем считать, что в состоянии покоя тела находятся в точках  $x=0$  и  $x=l$ , где  $l$  – расстояние между зарядами. Пусть  $x$  – абсцисса некоторого сечения  $q$  тела, тогда последнее находится в покое. Обозначим через  $u(x,t)$  смещение этого сечения в

момент времени  $t$ , в момент детонации первого заряда. Тогда смещение  $q_1$  с абсциссой  $X+dx$  будет равно  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ . Тогда относительным удлинением

стержня при абсциссе  $X$  есть производная  $\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}$ .

Допуская, что цилиндрическое тело имеет колебания, можно вычислить возмущающую силу  $T$ , то есть:  $T=ES \frac{du}{dx}$ , где  $E$  – модуль Юнга,  $S$  – площадь поперечного сечения цилиндрического тела.

Возьмем элемент тела между двумя сечениями  $q$  и  $q_1$ , абсциссы которых в состоянии покоя соответственно равны  $x$  и  $x+dx$ . На этот элемент действуют возмущающие силы  $T_x$  и  $T_{x+dx}$ , которые направлены по оси  $OX$ . Результирующая этих сил равна:

$$T_{x+dx} - T_x = ES \frac{du}{dx} \Big|_{x+dx} - ES \frac{du}{dx} \Big|_x = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$$

и направлена также по оси абсцисс.

С другой стороны ускорение элемента равно  $d^2u/dt^2$ , в силу чего имеет место равенство:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность рассматриваемого тела.

Пусть

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

тогда, сократив на  $S dx$  выражение (1), получим дифференциальное уравнение продольных колебаний рассматриваемого цилиндрического тела:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда на цилиндрическое тело действует внешняя сила  $F(x,t)$  на единицу объема, тогда вместо уравнения (3) будем иметь:

$$\rho S dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx + F(x,t) \cdot S dx$$

откуда получаем:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho} F(x,t). \quad (4)$$

Мы получили уравнение вынужденных продольных колебаний рассматриваемого стержня. Согласно (4) прохождение по массиву волны напряжений после взрыва первого заряда вызывает вынужденные продольные колебания самого горного массива. Скорость распространения этих колебаний, совпадает со скоростью волн напряжений. Этот факт имеет важное значение для определения полной картины процесса разрушения при взаимодействии пары скважинных зарядов ВВ.

Следует отметить, что в динамике уравнения (4) недостаточно для отражения полной картины колебания цилиндрического тела. Необходимо еще задать начальные условия, а именно – задать смещение сечения цилиндрического тела и скорость в начальный момент времени

$$U \Big|_{t=0} = f(x), \quad \frac{du}{dt} \Big|_{t=0} = F(x),$$

где  $f(x)$ ,  $F(x)$  – заданные функции на  $(0, l)$ .

Кроме того, граничными условиями в рассматриваемом варианте являлись условия, что оба конца рассматриваемого тела (стержня) – подвижны.

Следовательно, от взрыва первого заряда ВВ в горный массив трансформируется волна напряжений, которая, в свою очередь, вызывает вынужденные продольные колебания массива, заключенного между двумя скважинами. Зародыши радиальных трещин в большом количестве возникают в направлении распространения вынужденных колебаний под давлением взрывных газов. При детонации смежного заряда ВВ волна напряжений распространяется в массиве, имеющем ориентированную напряженность с радиальными и тангенциальными нарушениями. Горный массив, заключенный между взаимодействующими зарядами, концентрирует напряжения, значения которых намного превышают напряжение на целике. Взрыв последующего заряда проявляется как начальный импульс дальнейшего наиболее благоприятного роста трещин.

О возможном разрушении среды под действием импульсных нагрузок при взаимодействии скважинных зарядов можно судить по законам распространения и рассеивания энергии волн напряжений в среде, обладающей детерминированными свойствами.

Энергия, переходящая в ударную волну  $W$  (рис. 1), может быть определена согласно [3] как часть  $W_0$  общей энергии ВВ, и выражается зависимостью:

$$W = \left( 1 - \frac{f}{(\kappa - 1)\rho Q} \cdot \frac{V_\infty}{V_0} \right) W_0 \quad (5)$$

где:  $f$  – прочностное сопротивление среды;  $V_0$  – начальный объем расширения газов;  $V_\infty$  – конечный объем расширения газов;  $\rho$  – плотность ВВ;  $Q$  – потенциальная энергия ВВ;  $W_0$  – энергия взрыва;  $\kappa$  – показатель изэнтропы (в начальной стадии расширения  $\kappa=3$ , в конечном –  $1,25 \div 1,4$ ).

Зоны пластических деформаций и прочностное сопротивление среды в оценке условий перехода энергии взрывчатого разложения ВВ в энергию ударной волны, имеют определяющее значение.

Прочностное сопротивление среды может быть определено как:

$f = P_0^{-k} P_k V_0 V_\infty^{-1} \kappa$ , где:  $P_0$  – начальное давление продуктов взрыва;  $P_k$  – давление, до которого расширение продуктов взрыва происходит по закону  $P_k V_k^3 = const = P_H V_0^3$ .

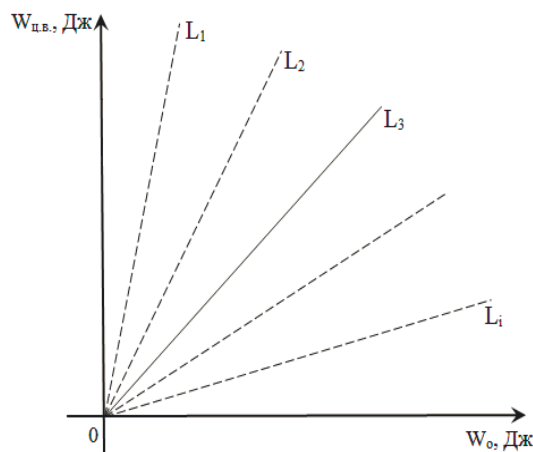


Рис. 1. Энергия, переходящая в ударную волну, как часть  $W_0$  общей энергии ВВ ( $0 < L_i < 1$ )

При взрыве заряда ВВ в разрушаемой среде существенная часть энергии взрыва теряется при переходе границы раздела «ВВ – среда» вследствие отражения детонационной волны от стенок зарядной камеры, благодаря чему часть продуктов взрыва до установления равновесия будет двигаться не к периферии, а к центру заряда.

При импульсных нагрузках горным породам свойственно квазиупругое поведение. Количество энергии, соответственно, отраженной от стенок зарядной камеры и прошедшей в среду (рис. 2,а), может быть определено с удовлетворительной для практических целей степенью погрешности как  $\bar{W}/W = 4\rho/\rho_c\rho_{BB}D$ , где:  $\bar{W}$  – упругая энергия среды;  $\rho_c$  – акустическая жесткость разрушаемой среды;  $\rho_{BB}D$  – акустический импеданс ВВ.

Энергия ударной волны (в дальнейшем трансформирующаяся в волну напряжений) определяется энергией взрывчатого разложения ВВ и условиями ее перехода в упругую энергию пород различной характеристики, что определяет возможное напряженное состояние среды и его длительность, благодаря которым волной производится работа. На рис. 2,б представлена зависимость энергии ударной волны от функции  $Qn(r,f)$ , где:  $r$  – расстояние от заряда ВВ;  $f$  – крепость горных пород по шкале проф. М.М. Протождяконова.

Энергия волны напряжения может быть определена как функция работы, совершаемой при смещении элементарной площадки на определенное расстояние в безграничной среде. Рассмотрим с этих позиций энергию ударной волны в зависимости от величины начального давления у стенки скважинного заряда.

Начальное уравнение энергии, проходящей через единицу площади в нормальном к фронту волны напряжений направлении за время  $t$ , может быть выражено как

$$W_0 = \int_0^t \sigma(r,t)V(r,t)dt, \quad (6)$$

где:  $\sigma(r,t)$  – максимальное напряжение на фронте волны;  $V(r,t)$  – скорость массового смещения породы.

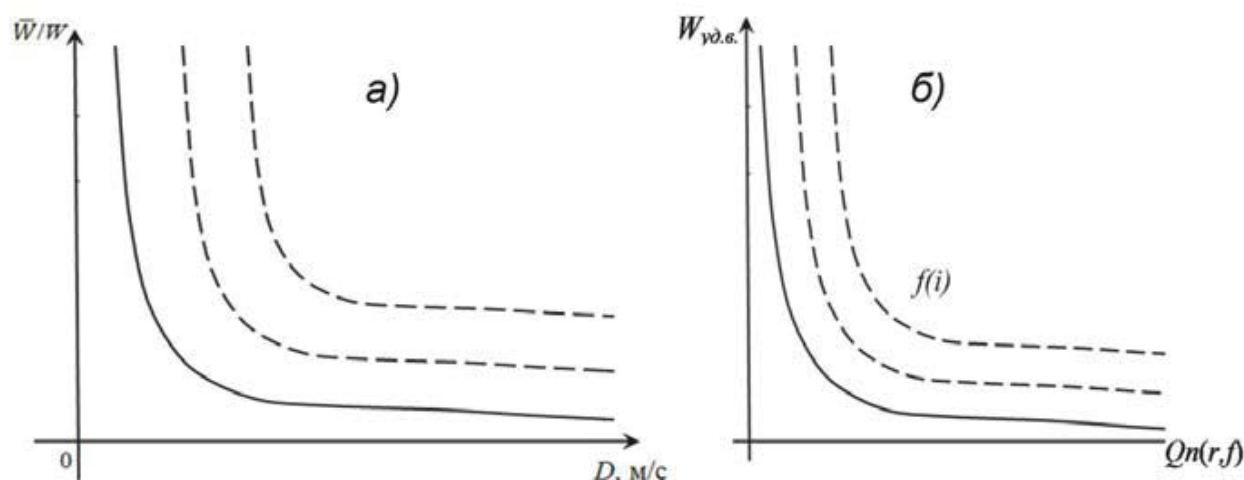


Рис. 2. Зависимость энергии, прошедшей в среду, от скорости детонации ВВ (а) и энергия ударной волны ( $i = 1, 2, 3$ ) (б)

Изменение скорости массового смещения и напряжения во времени с учетом максимального значения подчиняются экспоненциальному закону  $\Delta t = t - t_n$ , где  $t_n$  – время роста скорости массового смещения и напряжения во времени от 0 до max (рис. 3,а).

При квазиупругом поведении горных пород основные закономерности изменения параметров волн напряжений могут быть установлены в соответствии с законами теории упругости. В этом случае максимальное напряжение на фронте волны и скорость массового смещения породы могут быть связаны между собой зависимостью  $\sigma_{\max} = U\rho_c q$ . Тогда уравнение (6) примет вид

$$W_0 = \frac{q}{\rho_c} \int_0^t \sigma^2(r, t) dt.$$

На основании исследований, выполненных в работе [4], функция  $\sigma_{\max}(r)$  (рис. 3,б) определена как  $\sigma_{\max}(r) = P_0 R_0^2 / r^2$ , где:  $P_0$  – начальное давление на границе упругой зоны;  $R_0$  – начальный радиус скважины;  $r$  – расстояние от оси заряда до исследуемой точки;  $q$  – величина заряда.

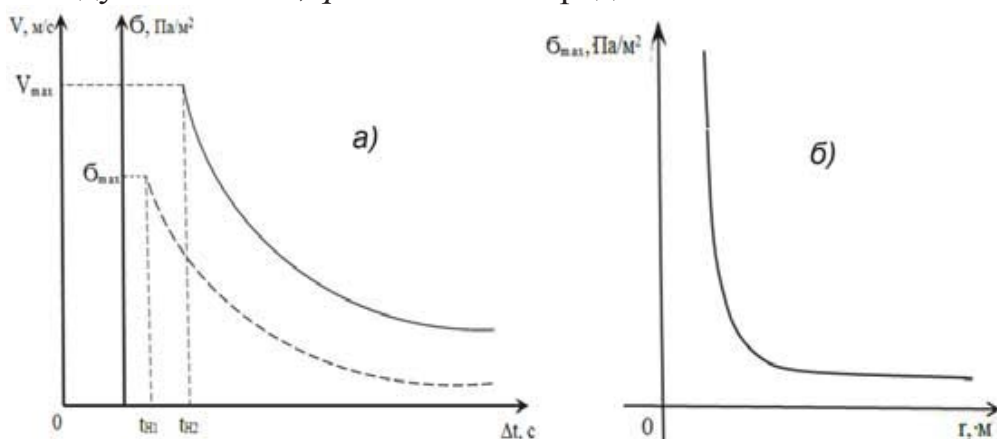


Рис. 3. Изменение скорости массового смещения и напряжения во времени (а); зависимость напряжения от расстояния взаимодействия (б)

Очевидно, что одним из направлений повышения эффективности взрывных работ в условиях карьеров является дальнейшее исследование и совершенствование методов управления энергией взрыва, основанных на временном и пространственно-динамическом взаимодействии скважинных зарядов ВВ. Согласно полученным результатам взрывание в режиме малых замедлений – наиболее эффективно и рационально с точки зрения энергетической картины разрушения приконтурного горного массива.

В зависимости между прочностными характеристиками разрушаемой среды и величиной накопленной потенциальной энергии величина  $K_i$  (рис. 4) определяется из условия  $K_i = f / \Pi_i$ , где  $\Pi_i$  – среднее значение пористости разрушаемого материала;  $f$  – коэффициент крепости по шкале М.М. Протодьяконова. Очевидно, что согласно этому условию величина  $K_i$  отвечает условию  $0 < K_i \leq 1$ .

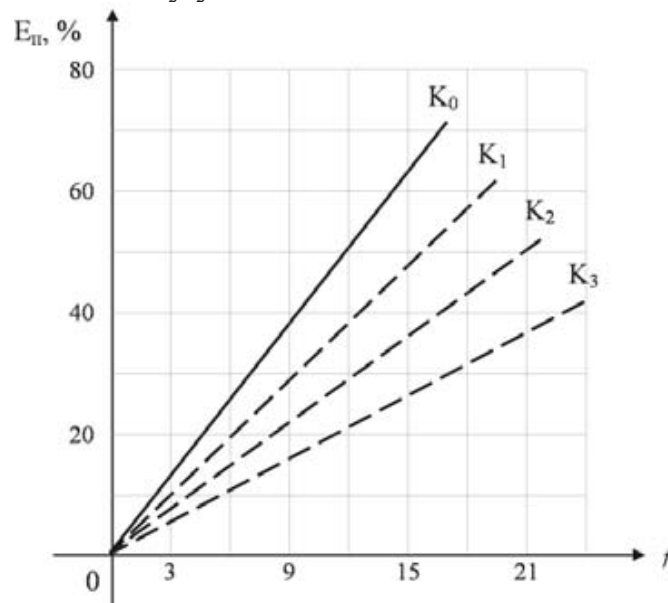


Рис. 4. Зависимость между прочностными характеристиками разрушаемой среды – крепостью пород ( $f$ ) и величиной накопленной потенциальной энергии

Максимальное накопление энергии при прочих равных условиях будет происходить в горных породах с пористостью, близкой к единице.

Анализируя изложенное, можно утверждать, что в определенных горно-геологических условиях рационально осуществлять взрывание взаимодействующих скважинных зарядов ВВ разной мощности, и при этом первым инициировать заряд меньшей мощности, как предполагается в способе ведения буровзрывных работ [5].

От взрыва первого заряда ВВ в горный массив трансформируется волна напряжений, вызывая вынужденные продольные колебания массива, заключенного между двумя скважинами. Зародыши радиальных трещин в большом количестве возникают в направлении распространения вынужденных колебаний под давлением взрывных газов. При детонации смежного более мощного заряда ВВ волна напряжений распространяется в массиве, имеющем ориентированную напряженность с радиальными и тангенциальными нарушениями. Горный массив, заключенный между взаимодействующими зарядами, концентрирует

напряжения, значения которых намного превышают напряжение на целике. Взрыв последующего заряда проявляется как начальный импульс дальнейшего наиболее благоприятного роста трещин и как следствие – более интенсивного процесса разрушения горной породы массива.

**Выводы:**

1. В рассматриваемом контексте для теории и практики ведения взрывных работ необходимо учитывать и уточнять особенности формирования и взаимодействия силовых полей противостоящих в смежных приконтурных ядах скважинных зарядов ВВ, взрывааемых в одной ступени замедления.

2. Подбором  $P(t)$  (величина импульса взрывной полости) в каждом из взаимодействующих зарядов можно регулировать процесс взрывного разрушения в зависимости от конкретных горно-геологических условий ведения взрывных работ. За счет изменения способов формирования и порядка взрывания зарядов ВВ в разрушаемом объеме можно влиять на процесс разрушения, зная особенности формирования силовых полей.

3. В определенных горно-геологических условиях рационально осуществлять взрывание взаимодействующих скважинных зарядов ВВ разной мощности и при этом первым инициировать заряд меньшей мощности, как предлагается в разработанных авторами способах ведения буровзрывных работ.

**Перечень ссылок**

1. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. -Новосибирск: Наука, 1977. -259с.
2. Григорян С.С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПММ, 1967. – Т.31. -С.157-245.
3. Азаркович А.Е., Тихомиров А.П. Современные промышленные ВВ, их оценка и условия рационального применения на карьерах. -М.: ЦНИИцветинформация, 1969. -97 с.
4. Власов О.Е., Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород под действием взрыва. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. -107 с.
5. Патент на винахід 103516 Україна. F42D 3/04. Спосіб виконання буровибухових робіт. А.А. Скачков, С.Є. Сергієнко та ін. (Україна) - № а201110513. Заявлено 30.08.11. Опубл. 10.04.12. Бюл. № 20.

**ABSTRACT**

**Purpose.** The main objective of the research is to determine the main factors influencing the properties of rocks on the spread of acoustic waves in them. And devoted to solving of an urgent issue, that is to reduce specific consumption of explosives for rock crushing by means of changing the order of work execution. This takes into account the strained-deformed state of the rock massif.

**The methods** of research are to analyze of geological data on the iron-ore deposits of Kryvbass, project documentation, production data of the mining enterprises and open pits, scientific publications and their subsequent synthesis and formulation of the developed provisions.

**Findings.** For the theory and practice of blasting operations, it is important to know the features of the formation and interaction of the power fields of borehole explosives blasting in one stage of deceleration. By selecting the magnitude of the impulse charge pulse in each of the interacting charges, it is possible to regulate the explosive loading process depending on the specific mining and geological conditions of blasting operations. In which the blasting block is formed by an even num-



ber of rows, furthermore, in all odd rows full-weight charges are formed according to data sheet values, while in even ones the charge weight is reduced by 30-45% and initiation of blasting is started with a reduced flank charge in the second row, then initiation passes on through delay to the nearest full charge in the first row, after that the following pair is involved in the process.

**Conclusions.** In certain geological and geomechanical conditions, it is rational to perform blasting of interacting well charges of varying power and, at the same time, initiate a charge of lower power, as suggested in the methods of drilling and blasting operations developed by the authors.

**The originality** is to determine the comprehensive approach in solution to the stated problem, and a number of the proprietary technical solutions.

**Practical implications.** Further development and manufacturing application of the research results will provide a significant reduction in the cost price of iron ore products by increasing the efficiency of drilling and blasting operations in the open pit.

**Keywords:** *ore, explosive destruction, open pit, explosive waves, blasting, borehole charges.*

УДК 622.271.3

© О.О. Шустов

## МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СУМІСНОЇ РОБОТИ БУНКЕРІВ- ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ У КОМПЛЕКСІ ЗІ СТРІЧКОВИМИ КОНВЕЄРАМИ

© O. Shustov

## MODELLING OF COLLABORATION PARAMETERS OF FEEDER- BREAKERS IN COMPLEX WITH BELT CONVEYORS

Виконаний огляд технологічних і конструктивних рішень зі створення перевантажувальних пристроїв для подальшого транспортування м'яких порід в складних гідрогеологічних умовах. Виконано математичне моделювання параметрів сумісної експлуатації бункера перевантажувача зі стрічковим конвеєром з метою дослідження оптимального циклу роботи комплексу обладнання. Встановлена залежність між об'ємом бункера та його конструктивними параметрами. Розрахована доцільна швидкість розвантаження бункера-перевантажувача, що дозволяє рівномірно розосередити гірничу масу уздовж стрічки конвеєра.

Выполнен обзор технологических и конструктивных решений по созданию перегрузочных устройств для дальнейшего транспортирования мягких пород в сложных гидрогеологических условиях. Выполнено математическое моделирование совместной эксплуатации бункера-перегрузочной машины с ленточным конвейером с целью исследования оптимального цикла работы комплекса оборудования. Установлена зависимость между объемом бункера и его конструктивными параметрами. Рассчитана целесообразная скорость разгрузки бункера-