

УДК 504.06:622.271:622.235

Долгова Т.И., д-р техн. наук, профессор,
Юрченко А.А., канд. техн. наук,
Павличенко А.В., канд. биол. наук, доцент
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННЫХ
ЗАРЯДОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ МАССОВЫХ
ВЗРЫВОВ В КАРЬЕРАХ**

Долгова Т.И., д-р техн. наук, профессор,
Юрченко А.А., канд. техн. наук,
Павличенко А.В., канд. біол. наук, доцент
(Державний ВНЗ «НГУ»)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СВЕРДЛОВИНИХ ЗАРЯДІВ
НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ МАСОВИХ ВИБУХІВ В КАР'ЄРАХ**

Dolgova T.I., D.Sc. (Tech.), Professor,
Yurchenko A.A., Ph.D. (Tech.),
Pavlichenko A.V., Ph.D. (Biol.), Senior Lecturer
(State H E I «NMU»)

**INVESTIGATION OF IMPACT OF BOREHOLE CHARGE PARAMETERS
ON ECOLOGICAL SAFETY OF MASS EXPLOSIONS IN THE QUARRIES**

Аннотация. Добыча железной руды ведётся преимущественно открытым способом, что требует проведения массовых взрывов в карьерах, которые сопровождаются выбросами в атмосферу пыли и вредных газов, существенно снижающими экологическую безопасность региона.

Экологическая опасность массовых взрывов в карьерах определяется, в первую очередь, уровнем приземных концентраций загрязняющих веществ, включая пыль, на границе или за пределами санитарно-защитной зоны этих карьеров. Приведены результаты исследований на математической модели влияния параметров скважинных зарядов на технологические и экологические показатели результатов взрыва. Для получения математической модели использованы методы планирования промышленных экспериментов.

Ключевые слова: железорудный карьер, массовый взрыв, экологическая безопасность.

Введение. Качество массового взрыва в карьере определяется технологическими и экологическими показателями. Технологические показатели определяются, прежде всего, степенью дробления взорванной горной массы при минимальном выходе негабарита и отсутствии переизмельчения. Размеры кусков разрушенного горного массива должны быть как можно ближе к нормируемому значению. Экологические показатели определяются объёмом и высотой выброса пылегазового облака [1-4].

Анализ исследований и публикаций. Известно и апробировано в промышленности большое количество способов и средств борьбы с пылью и вредными газами при массовых взрывах в карьерах, которые подразделяются на три

основные группы: организационные, технологические и инженерно-технические [4, 5]. Однако, для управления массовым взрывом, как правило, используют один из рекомендованных технологами способов. Причем зачастую применяемые способы не уменьшают выбросы, а только позволяют интенсивнее их рассеять в атмосфере. Используемые при этом оценочные эмпирические выражения описывают зависимость технологических и экологических результатов взрыва зачастую от одного из параметров, например, количества взорванного взрывчатого вещества (ВВ).

В настоящей работе предпринята попытка комплексного подхода к применению инженерно-технических мероприятий по снижению пылегазовых выбросов при массовых взрывах в железорудных карьерах. В связи с тем, что проведение исследований влияния параметров скважинных зарядов на качество массового взрыва в натуральных условиях весьма сложно по техническим и организационным причинам, исследования проводили на разработанной математической модели управления качеством массового взрыва.

Основная часть. Сущность предлагаемого подхода заключается в том, что в условиях существующей технологии ведения взрывных работ на основе проведения планируемого промышленного эксперимента определяют значения параметров скважинных зарядов, при которых обеспечивается выполнение технологических требований добычи горной массы при минимальных пылегазовых выбросах в атмосферу [5, 6]. При этом массовый взрыв рассматривается как объект управления с регулируемыми входными и измеряемыми выходными параметрами, что позволяет при решении задач его оптимизации использовать хорошо развитый математический аппарат современной теории управления. Такой подход к решению задач управления массовым взрывом позволяет получить его математическую модель в виде аналитических зависимостей исследуемых выходных параметров от задаваемых входных [7].

В качестве входных регулируемых параметров нами приняты: удельный заряд взрывчатого вещества (q), диаметр скважин ($d_{ск}$), соотношение длины забойки (L_3) и ВВ (L_6) в скважине (l_3) (рис.1).

В качестве выходных параметров, которые характеризуют качество массового взрыва с технологической и экологической сторон, принимаем средний размер кусков взорванной горной массы (K_c) и высоту выброса пылегазового облака (H).



Рисунок 1 – Блок-схема массового взрыва как объекта управления

При выборе диапазона изменения удельного заряда для рассматриваемого карьера с существующей крепостью горных пород и их трещиноватостью руководствуются тем, что верхний предел должен обеспечивать рыхление без переизмельчения горной массы и не должно быть перехода в заряд выброса, а нижний предел не должен перейти в камуфлетное действие при взрыве.

Известен ряд аналитических зависимостей, в соответствии с которыми можно рассчитать требуемый удельный заряд (расход ВВ), коррелированный со свойствами пород. Так, для условий Кривбасса при взрывании пород средней крепости удельный расход ВВ составляет $q=0,4-0,8$ кг/м³. Поскольку при взрыве 1 кг ВВ в атмосферу выбрасывается до 1000 дм³ вредных газов, то увеличение удельного заряда должно также ограничиваться и экологическим показателем – интенсивностью пылегазовых выбросов в атмосферу.

При выборе диапазона изменения диаметра скважин руководствуются результатами экспериментальных исследований, согласно которым максимальная высота и время подъема выбрасываемых газов и пыли в значительной мере зависит от диаметра применяемых зарядов и в меньшей мере от типа используемого ВВ [8]. При этом диаметр буровых скважин, в зависимости от типа применяемого бурового оборудования, составляет 105; 220; 250 или 320 мм.

Максимальную высоту подъема пылегазового облака можно рассчитать по эмпирической формуле [8]

$$H = 1160 \cdot d_{ск}^2 \quad (1)$$

где $d_{ск}$ – диаметр скважины, м.

При выборе длины забойки руководствуются тем положением, что отношение длины забойки к диаметру скважины должно быть постоянным и равным примерно 20 [8]. При этом должно обеспечиваться соблюдение критерия

$$Q^{1/3} l_3 = const, \quad (2)$$

где Q – масса заряда в скважине, кг; l_3 – длина забойки, м.

Для иллюстрации предложенной выше модели воспользуемся данными промышленных экспериментов при массовых взрывах в карьерах, которые позволяют приближенно определить высоту выброса пылегазового облака H по формуле (1), а также средний размер кусков взорванной горной массы K_c (рис. 2), по принятому значению одного из входных параметров для условий конкретного карьера. При этом нами принята нормируемая (минимальная) высота подъема пылегазового облака – 50 м, а нормируемый размер кусков горной массы после разрушения – 200 мм.

Для оценки экологического и технологического качества массового взрыва в карьере нами предложен показатель в виде

$$\Phi = \left| \frac{H - H_H}{H_H} \right| + \left| \frac{K_C - K_{CH}}{K_{CH}} \right|, \quad (3)$$

где Φ – показатель качества взрыва; H – высота подъёма пылегазового облака, м; H_H – нормируемая (минимальная) высота пылегазового облака, м; K_C – средний размер кусков горной массы после разрушения взрывом, мм; K_{CH} – нормируемое значение среднего размера кусков взорванной горной массы, мм.

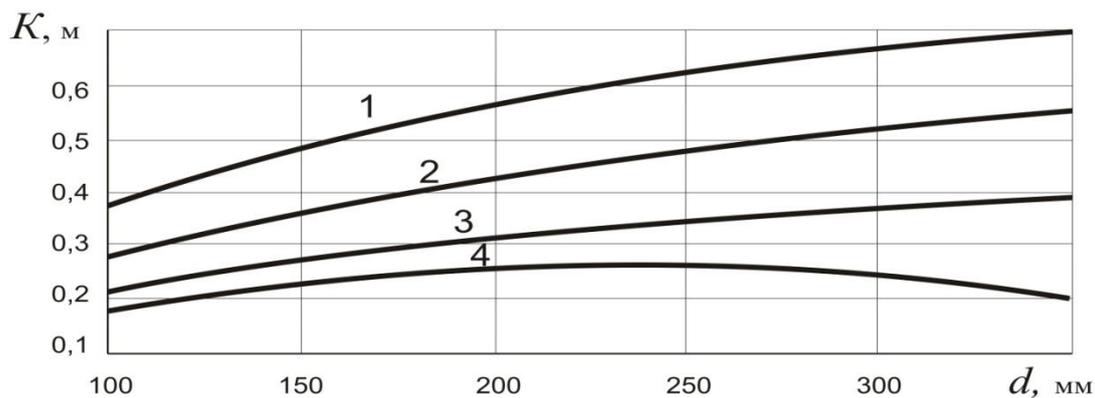


Рисунок 2 – Зависимость средневзвешенного линейного размера в породе, разрыхленной взрывом, от диаметра скважины для разных типов пород: 1 – весьма крупноблочные породы; 2 – практически монолитные; 3 – крупноблочные; 4 – среднеблочные

Определение оптимальных параметров скважинных зарядов, при которых показатель качества массового взрыва Φ будет наилучшим (минимальным), можно осуществить с помощью методов математической статистики (Адлер, Ю.П., 1969). Эти методы позволяют при неполном знании внутренних связей исследуемого процесса, путём проведения экспериментов, определить аналитическую зависимость показателя Φ от входных регулируемых параметров q , $d_{ск}$, l_3 . Исследования полученной зависимости на экстремум (минимум) позволяют определить значения q , $d_{ск}$, l_3 , при которых достигается наилучшее значение Φ , при которых высота пылегазового облака будет минимальна, а средний размер кусков горной массы не будет противоречить требованиям технологии добычи.

Перед проведением факторного эксперимента необходимо установить диапазон варьирования параметров скважинных зарядов. Определяют максимальное значение каждого параметра в натуральных единицах измерения, что в кодированных значениях параметра соответствует +1. Аналогично минимальное значение каждого параметра соответствует -1, а среднее значение называют нулевым уровнем, что в кодированном выражении соответствует 0. С учётом этого выбираем следующие диапазоны варьирования (ограничения) входных регулируемых параметров модели:

удельный расход ВВ: верхний уровень – 0,8 кг/м³ (+1);
 нулевой уровень – 0,7 кг/м³ (0);
 нижний уровень – 0,6 кг/м³ (-1);

шаг варьирования – 0,1 кг/м³ (Δq);
 диаметр скважин: верхний уровень – 320 мм (+1);
 нулевой уровень – 212,5 мм (0);
 нижний уровень – 105 мм (-1);
 шаг варьирования – 107,5 мм (Δd);
 соотношение заполнения скважины забойкой и ВВ:
 верхний уровень – 3 (+1);
 нулевой уровень – 2,5 (0);
 нижний уровень – 2,0 (-1);
 шаг варьирования – 0,5 (Δl_3).

Полный факторный эксперимент (ПФЭ) предусматривает проведение 2^k опытов, где k – количество варьируемых входных параметров (факторов).

В работе [7] получена аналитическая зависимость показателя качества взрыва от значений параметров скважинных зарядов в виде

$$\Phi = 1.206 + 0,14\bar{q} + 0,185\bar{d}_{ск} - 0,067\bar{l}_3 + 0,041\bar{q}\bar{d}_{ск} - 0,054\bar{q}\bar{l}_3 + 0,046\bar{d}_{ск}\bar{l}_3 + 0,028\bar{q}\bar{d}_{ск}\bar{l}_3 \quad (4)$$

Для перехода с кодированных значений факторов в натуральные и наоборот используют зависимости перехода

$$\begin{aligned} \bar{q} \cdot \Delta q &= q - q_0; \\ \bar{d} \cdot \Delta d &= d - d_0; \\ \bar{l}_3 \cdot \Delta l_3 &= l_3 - l_{30}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\bar{q}, \bar{d}_{ск}, \bar{l}_3$ – кодированные значения факторов; $\Delta q, \Delta d_{ск}, \Delta l_3$ – шаги варьирования факторов; $q_0, d_{ск0}, l_{30}$ – нулевые значения факторов.

В натуральных значениях входных параметров выражение (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi &= -0,732 + 3,402q - 0,00272d_{ск} - 1,04l_3 + 0,00328qd_{ск} - \\ &- 1,535ql_3 - 0,001d_{ск}l_3 + 0,000213qd_{ск}l_3. \end{aligned} \quad (6)$$

В работе [7] приведены результаты исследований зависимости (6) на экстремум, которые позволили определить оптимальные значения параметров скважинных зарядов. Установлено, что при значении удельного заряда ВВ $q=0,65$ кг/м³, при диаметре скважин $d_{ск}=105$ мм и соотношении длины забойки к длине заряда $l_3=3$ будет достигнута минимальная высота ПГО, а средний размер кусков взорванной горной массы наиболее близок к нормируемому. Показатель качества массового взрыва (3) при этом будет равен 0,859.

В связи с тем, что выражение (6) является функцией трёх переменных, его геометрическая интерпретация невозможна из-за многомерности пространства. Для обеспечения этой возможности фиксируем одну из переменных в оптималь-

ном её значении. При выборе параметра, который стабилизируется в его оптимальном значении, руководствуются тем, что из входных параметров непрерывно можем изменять удельный заряд (q) и соотношение длины забойки и ВВ в скважине (l_3). Диаметр скважины ($d_{ск}$) может изменяться в дискретном режиме в зависимости от диаметра бурового инструмента применяемого оборудования. Найденное оптимальное его значение равно -1 , то есть 105 мм. В этом случае выражение (6) примет вид

$$\Phi = -1,977 + 5,09q + 0,922l_3 - 1,64ql_3. \quad (7)$$

В графическом виде эта зависимость представлена на рис. 3 и представляет собой поверхность со слабо выраженной нелинейностью. При этом оптимальное значение параметров скважин в исследуемом диапазоне их изменения находятся в зоне снижения диаметра скважин и удельного заряда ВВ при увеличении отношения длины забойки к длине заряда. Графическое представление полученной зависимости наглядно иллюстрирует зону оптимальных параметров скважинных зарядов.

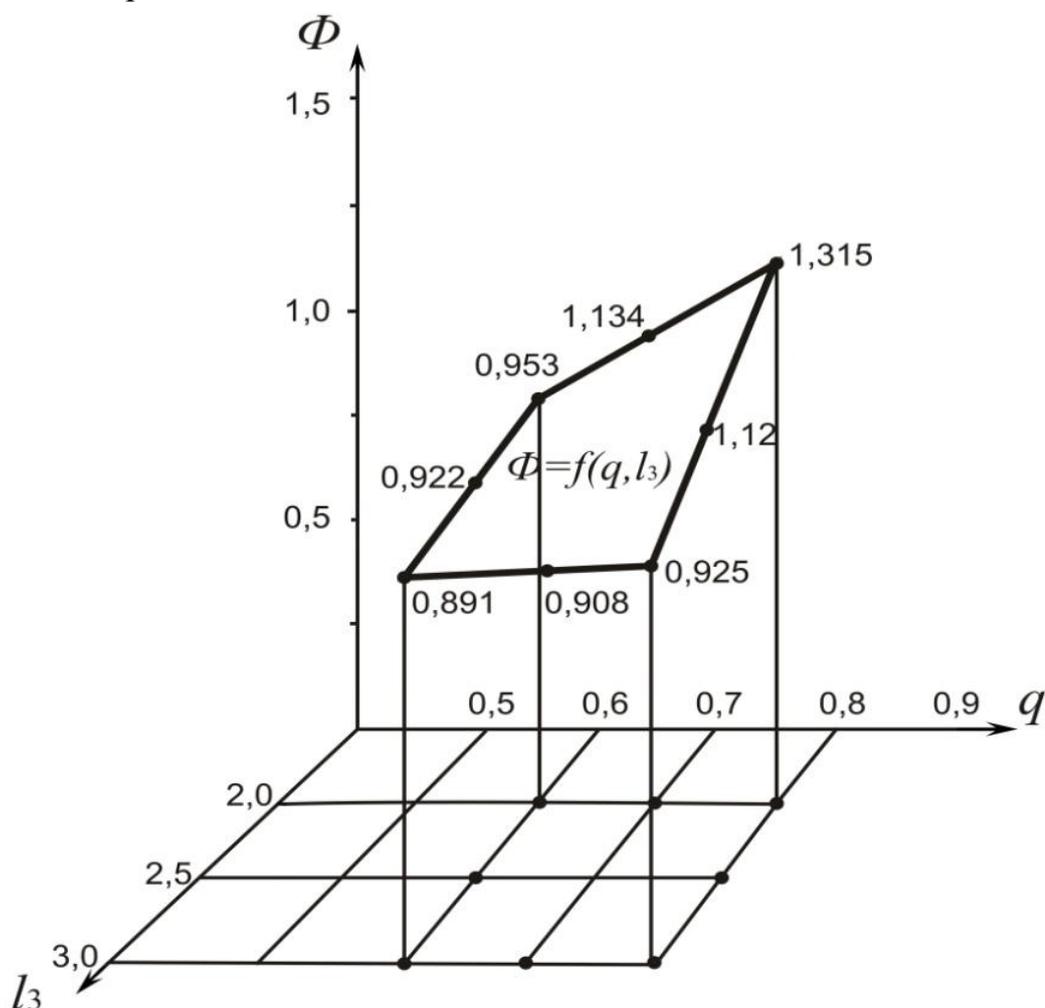


Рисунок 3 – Значения показателя качества взрыва в диапазоне изменения входных параметров

Поскольку установлено, что с уменьшением диаметра скважин показатель качества массового взрыва улучшается, то окончательно можно считать оптимальным его значением равным 105 мм, то есть минимальное значение, которое может обеспечить буровое оборудование.

В таком случае влияние удельного заряда ВВ и соотношения длины забойки к длине заряда ВВ в скважине можно исследовать с помощью выражения (7). Для этого при постоянных значениях одного из входных параметров системы рассчитываем значение показателя качества массового взрыва при изменении другого параметра.

Результаты расчётов показателя качества взрыва при изменении соотношения длины забойки к длине заряда при постоянных значениях удельного заряда ВВ приведены в табл. 1 и на рис. 4. Результаты расчётов показателя качества взрыва при изменении значений удельного заряда ВВ при постоянных значениях соотношения длины забойки к длине заряда представлены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 1 – Значения показателя качества массового взрыва при изменении соотношения длины заряда ВВ в скважине для постоянных значений удельного заряда

Удельный заряд ВВ, кг/м ³	Соотношение длины забойки к длине заряда, l_3	Показатель качества массового взрыва, Φ
0,6	2,0	0,953
	2,5	0,922
	3,0	0,891
0,7	2,0	1,134
	2,5	1,021
	3,0	0,908
0,8	2,0	1,315
	2,5	1,120
	3,0	0,925

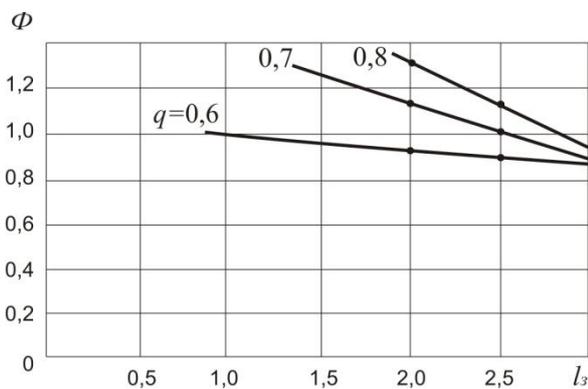


Рисунок 4 – Значения показателя качества массового взрыва при изменении соотношения длины забойки к длине заряда

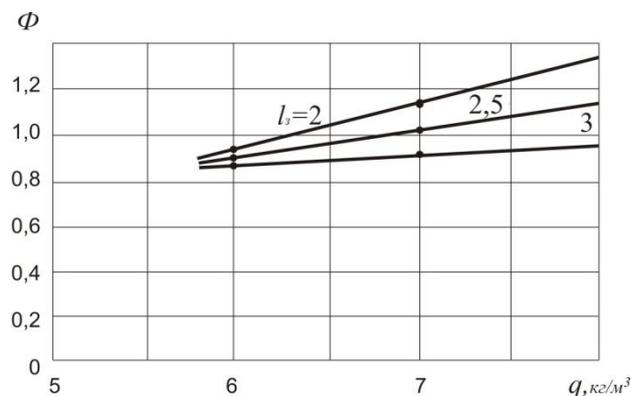


Рисунок 5 – Значения показателя качества массового взрыва при изменении удельного заряда ВВ

Таблица 2 – Значения показателя качества массового взрыва при изменении значений удельного заряда для постоянных соотношений длины заряда ВВ в скважине

Соотношение длины заряда к длине забойки	Удельный заряд ВВ, кг/м ³	Показатель качества массового взрыва
2,0	6	0,953
	7	1,134
	8	1,315
2,5	6	0,922
	7	1,021
	8	1,120
3,0	6	0,891
	7	0,908
	8	0,925

Выводы. Предложенный метод оптимизации параметров скважинных зарядов при проведении массовых взрывов в карьерах позволяет для конкретных условий горного массива (крепости, трещиноватости, условий взрывания и т. д.) путём проведения промышленного эксперимента установить рациональные значения удельного заряда ВВ, диаметра скважин и соотношение длины заряда взрывчатки к длине забойки в скважине. При этих значениях параметров показатели качества массового взрыва с технологической и экологической сторон наилучшие.

Проведенные исследования позволили, кроме этого, оценить в качественном и количественном отношении влияние этих параметров на качество массового взрыва и его экологическую безопасность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние типов ВВ на интенсивность взрывного разрушения известняков и доломитов / Э.И. Ефремов, И.Л. Кратковский, А.В. Пономарев [и др.]// Сб. науч. тр. Нац. горн. акад. Украины – 2001. – Т.3 – №11. – С. 20-23.
2. Ефремов, Э.И. Особенности и методы взрывного разрушения обводненных горных пород / Э.И. Ефремов // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2010. – № 2. – С. 153-158.
3. Ефремов, Э.И. Опыт использования простейших ВВ на карьерах Украины / Э.И. Ефремов // *Украинский союз инженеров горняков. Информационный бюллетень* – 2010 – №4. – С. 9–11.
4. Способы и средства повышения экологической безопасности массовых взрывов в железорудных карьерах по пылевому фактору: моногр. / В.Е. Колесник, А.А. Юрченко, А.А. Литвиненко, А.В. Павличенко. - Днепропетровск: Литограф, 2014. – 112 с.
5. Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises/ Т. Kholodenko, Ye. Ustimenko, L. Pidkamenna, and A. Pavlychenko // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. The Netherlands: CRC Press / Balkema, 2014. Pp. 255-260.*
6. Козловская, Т.Ф. Пути снижения уровня экологической опасности в районах добычи полезных ископаемых открытым способом. / Т.Ф. Козловская, В.Н. Чебенко // *Вісник КНУ ім. М. Остроградського.* – 2010. – № 6(65). Ч. 1. – С. 163-168.
7. Юрченко, А.А. Физические процессы выброса пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах / А.А. Юрченко // *Науковий вісник НГУ.* – 2010. – № 2. – С. 85-88.
8. Колесник, В.Е. Методы оценки экологической опасности выбросов пыли при массовых взрывах в железорудных карьерах. / В.Е. Колесник, Ю.В. Бучавый, А.А. Юрченко // *Науковий вісник НГУ.* – 2011. – № 5. – С. 113-120.

REFERENCES

1. Yefremov, E.I., Kratkovsky, I.L., Ponomarev, A.V. and Nikolenko, E.V. (2001), "Influence of explosives of different types on intensity of limestone and dolomite explosive destruction", *Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnoy gornoy akademii Ukrainy*, vol. 3, no. 11, pp. 20-23.
2. Yefremov, E.I. (2010), "Features and methods of the explosive destruction of flooded rocks", *Metalurgicheskaya i gornorudnaya promydhennost* [Metallurgical and Mining Industry], no. 2, pp. 153-158.
3. Yefremov, E.I. (2010), "Experience of Use of Simple Explosives in Open-Cast Mines of Ukraine", *Ukrainskiy soyuz inzhenerov gornyukov. Informatsionnyy byuleten*, no. 4, pp. 9-11.
4. Kolesnik, V.Ye., Yurchenko, A.A., Litvinenko, A.A. and Pavlichenko, A.V. (2014), *Sposoby i sredstva povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti massovykh vzryvov v zhelezorudnykh karerakh po pylevomu faktoru* [Ways and means to enhance the environmental safety of massive explosions in quarries for iron dust factor], Litograf, Dnipropetrovsk, Ukraine.
5. Kholodenko, T., Ustimenko, Ye., Pidkamenna, L., and Pavlychenko, A. (2014), "Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises", *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining, The Netherlands: CRC Press / Balkema*, pp. 255-260
6. Kozlovskaya, T.F. and Chebenko, B.N. (2010), "Ways to reduce the level of environmental danger in regions of the open pit mining", *Visnyk Kryvorizkogo natsionalnogo universitetu im. M. Ostrogradskogo*, no.6(65), vol. 1, pp. 163-168.
7. Yurchenko, A.A. (2010), "Physical processes in the emission of dust and gas clouds in the mass explosions in quarries", *Naukovyy visnyk Natsionalnogo gornogo universytetu*, no. 2, pp. 85-88.
8. Kolesnik, V.Ye., Buchavyu, Yu.V. and Yurchenko, A.A. (2011), "Methods of estimation of environmental threat from dust emission during mass explosion in iron-ore opencast mine", *Naukovyy visnyk Natsionalnogo gornogo universytetu*, no. 5, pp. 113-120.

Об авторах

Долгова Татьяна Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, kafedra_ecology@ukr.net.

Юрченко Аннета Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, kafedra_ecology@ukr.net.

Павличенко Артем Владимирович, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, kafedra_ecology@ukr.net.

About the authors

Dolgova Tatyana Ivanovna, Doctor of Technical Science (D.Sc.), Professor of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», SHEI «NMU», Dnipropetrovs'k, Ukraine, kafedra_ecology@ukr.net.

Yurchenko Anneta Anatolievna, Candidate of Technical Sciences, associate professor of ecology department, State Higher Educational Institution "National Mining University", SHEI "NMU", Dnipropetrovs'k, Ukraine, kafedra_ecology@ukr.net.

Pavlichenko Artem Vladimirovich, Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, associate professor of ecology department, State Higher Educational Institution "National Mining University", SHEI "NMU", Dnipropetrovs'k, Ukraine, kafedra_ecology@ukr.net.

Анотація. Видобуток залізної руди ведеться переважно відкритим способом, що вимагає проведення масових вибухів в кар'єрах, які супроводжуються викидами в атмосферу пилу і шкідливих газів, що істотно знижують екологічну безпеку регіону.

Екологічна небезпека масових вибухів в кар'єрах визначається, в першу чергу, рівнем приземних концентрацій забруднюючих речовин, включаючи пил, на границі або за межами санітарно-захисної зони цих кар'єрів. Наведено результати досліджень на математичній моделі впливу параметрів свердловинних зарядів на технологічні та екологічні показники результатів вибуху. Для отримання математичної моделі використано методи планування промислових експериментів.

Ключові слова: залізорудний кар'єр, масовий вибух, екологічна безпека.

Abstract. Iron ore is mainly mined by opencast method with massive explosions in the quarries, which are accompanied by emissions of dust and harmful gases and significant degradation of environmental safety in the region.

Environmental hazard of mass explosions in quarries is estimated primarily by level of near-surface concentrations of contaminants including dust on the border with or outside of the sanitary protection zone of the quarries.

Impact of the borehole charge parameters on technological and environmental results of the explosions were studied by a mathematical model with taking into account methods of industrial experiments planning.

Keywords: iron-ore quarry, massive explosion, environmental safety.

Статья поступила в редакцию 30.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком

УДК 614.89

Чеберячко С.И., канд. техн. наук,
Яворская Е.А., канд. техн. наук
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

**К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ ФИЛЬТРА
ПРОТИВОПЫЛЕВОГО РЕСПИРАТОРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
МАКСИМАЛЬНОЙ ПЫЛЕЕМКОСТИ**

Чеберячко С. И., канд. техн. наук,
Яворська О.О., канд. техн. наук,
(Державний ВНЗ «НГУ»)

**ДО ПИТАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ УПАКОВКИ ФІЛЬТРА
ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПИРАТОРІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
МАКСИМАЛЬНОЇ ПИЛОЄМНОСТІ**

Cheberyachko S.I., PhD. (Tech.),
Yavorskaya Ye.A., PhD. (Tech.)
(State N E I «NMU»)

**ON THE ISSUE OF DENSITY DISTRIBUTION IN THE FILTER PACKAGE
OF DUST MASK FOR MAXIMUM DUST CAPACITY**

Аннотация. В статье приведена методика расчета изменения плотности упаковки волокон по толщине противопылевого фильтра для условий горных предприятий. Установлены основные закономерности для определения их параметров, которые обеспечат минимальный перепад давления при максимальной пылеемкости. Определены условия существования оптимального распределения плотности упаковки волокон, для минимального роста перепада давления фильтровальных слоев. Доказано, что с увеличением времени запыления фильтров возникает необходимость в уменьшении плотности упаковки начальных слоев фильтрующего материала, а для обеспечения необходимой защитной эффективности - плотность упаковки волокон нижних слоев необходимо повышать.