

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ ВЗРЫВОМ ОБРАЗЦОВ ПЕСЧАНИКА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

К. Н. Лабинский ¹, А. Н. Медведев ²

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

² Уральский Федеральный Университет им. первого Президента
России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

Статья посвящена актуальному вопросу расчета параметров разрушения взрывом образцов вмещающих пород с глубоких горизонтов угольной шахты, знание которых требуется для оперативной корректировки технологии взрывных работ с учетом свойств пород, по которым проводится каждая выработка. Корректировка проводится с целью минимизации образования незапланированных полостей, требующих дополнительной забутовки, а также сверхнормативных объемов пылегазовых выбросов, способствующих ухудшению экологической обстановки в районе шахты. Приведены результаты лабораторного исследования влияния параметров детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) на скорость ударной волны в образцах выбросоопасного песчаника шахты им. А. А. Скочинского (г. Донецк). Установлена зависимость между относительной скоростью ударной волны в песчанике и его плотностью, плотностью и массой ВВ и относительным расстоянием от центра заряда. Предложен дискретный подход к определению нелинейной зависимости скорости распространения ударной волны в горной породе от параметров детонации. Разработан простой алгоритм и программа для построения кривой затухания ударной волны. Предложена методика расчета радиуса разрушения горной породы по результатам лабораторного эксперимента, которая может быть использована на практике для повышения эффективности, а также экологической безопасности горного производства.

Ключевые слова: параметры детонации; дискретный подход; радиус разрушения горной породы; экологическая безопасность.

1. Введение

Проблема борьбы с выбросами породы и газа на угольных шахтах возникла с развитием горных работ на глубинах 700 м и более при строительстве буровзрывным способом горных выработок по крепким песчаникам [1]. Решением этой сложной проблемы занимались многие ученые, и ее актуальность не уменьшается, так как глубина добычи полезных ископаемых постоянно возрастает [1–5].

В отличие от внезапных выбросов угля и газа, где газовый фактор является определяющим, выбросы песчаника не являются внезапными. На достигнутых к настоящему времени глубинах эксплуатации угольных месторождений они происходят только при взрывных работах, в момент производства взрыва. При этом размеры полости выброса могут намного превзойти проектные размеры выработки и привести к образованию полостей, требующих дополнительной забутовки [6, 7], что снижает общую эффективность горных работ. Кроме того, образуются

сверхнормативные объемы пылегазовых выбросов, которые, поступая на поверхность по вентиляционным выработкам, способствуют ухудшению экологической обстановки в районе шахты [8].

Объемы выброса породы определяются величиной динамических напряжений в массиве при взрыве, которые можно существенно снизить корректировкой технологии взрывных работ, в частности, подбором взрывчатого вещества (ВВ), массы одновременно взрываемого заряда в шпуре и на весь забой, схемы расположения и очередности взрывания шпуровых зарядов [1, 9–11].

Степень выбросоопасности пород неодинакова даже в пределах контура одной выработки. Изменение прочностных свойств и условий залегания выбросоопасных песчаников по простиранию может наблюдаться через 15–20 м. Частое изменение горно-геологических свойств пород, по которым проводится выработка, должно учитываться при выборе параметров буровзрывных работ для конкретных условий [1].

Разрушение горных пород взрывным способом происходит под воздействием ударной волны, которая продуцируется на границе раздела сред, ВВ – порода, и распространяется в массиве. При этом скорость ударной волны по мере удаления от заряда ВВ снижается вплоть до величины, численно равной скорости распространения продольной волны в разрушаемой породе, где ударная волна переходит в волну напряжений. Разрушение массива происходит за фронтом ударной волны до тех пор, пока массовая скорость разрушенных частиц превышает некоторое критическое значение. Взаимосвязь скорости ударной волны и массовой скорости потока частиц породы описывается уравнением ударной адиабаты для горной породы [12].

Актуальной является задача оперативного определения зависимости скорости затухания ударной волны от свойств породы в разрушаемом горном массиве с целью определения радиуса разрушения горных пород и обоснования оптимальных технологических показателей взрывных работ для снижения частоты проявления выброса породы и его интенсивности, что будет способствовать повышению эффективности горных работ и экологической безопасности.

В данной статье приведены результаты лабораторного исследования влияния параметров детонации заряда ВВ на скорость ударной волны в образцах выбросоопасного песчаника шахты им. А. А. Скочинского (г. Донецк). Установлена зависимость между относительной скоростью ударной волны в песчанике и его плотностью, плотностью и массой ВВ и относительным расстоянием от центра заряда. Предложен дискретный подход к определению нелинейной зависимости скорости распространения ударной волны в горной породе от параметров детонации. Разработаны простой алгоритм и программа для расчета кривой затухания ударной волны. Предложена методика расчета радиуса разрушения горной породы, которая может быть использована при проектировании и оперативной корректировке параметров взрывных работ.

2. Материалы и методы

Экспериментальное измерение скорости распространения ударной волны в горной породе возможно с использованием дискретных датчиков, фиксирующих момент прихода ударной волны к точке их расположения. Это позволяет достаточно просто определить среднюю скорость распространения ударной волны на участке между двумя произвольными датчиками. Однако изменение скорости носит нелинейный характер, поэтому при работе как с цифровыми, так и с аналоговыми датчиками необходимо интегрирование их показаний.

В лаборатории буровзрывных работ Донецкого национального технического университета (ДНТУ) были проведены эксперименты по измерению скорости распространения ударной волны в образцах выбросоопасного песчаника при использовании различных ВВ. Схема измерения скорости детонации ВВ и скорости ударной волны в образцах песчаника приведена на рис. 1.

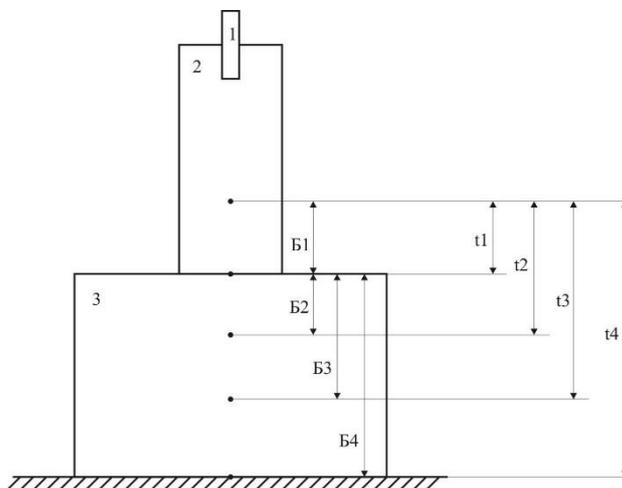


Рис. 1. Схема измерения скорости детонации ВВ и скорости ударной волны в образцах горной породы: 1 – электродетонатор; 2 – взрывчатое вещество; 3 – образец горной породы; Б1...Б4 – базы измерения скоростей между соответствующими датчиками; t1...t4 – время между срабатыванием соответствующих датчиков

При проведении измерений использовался измеритель интервалов времени ИИВ-16/496 УХЛ 4.2 (ТУУ 33.5-3169501990-001:2011, разработка ДНТУ). Абсолютная погрешность измерения интервалов времени в соответствии с ТУУ составляет $1,6 \cdot 10^{-8}$ с.

На жесткое горизонтальное основание устанавливались образцы испытуемой горной породы, в которой размещались ионизационные датчики, а сверху устанавливался заряд ВВ (рис. 2). Заряд помещался в цилиндрическую оболочку из полихлорвинила с внутренним диаметром 34 мм и толщиной стенок 1,5 мм. Масса заряда составляла 0,1 кг, плотность – 1100 кг/м^3 . Инициирование заряда осуществлялось электродетонатором ЭД-КЗ-ОП [13, 14]. Для каждого ВВ серия исследований состояла из нескольких независимых опытов (до 6).

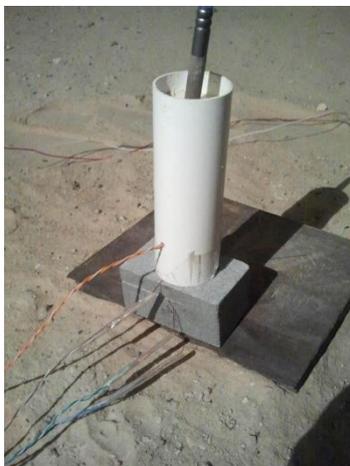


Рис. 2. Вид экспериментальной установки

3. Результаты

Результаты измерения скорости ударной волны в песчанике в зависимости от используемых зарядов различных ВВ представлены в табл. 1. Относительное расстояние R/r от границы раздела сред до точки измерения определялось по следующей формуле:

$$R/r = \frac{B_i}{r}, \quad (1)$$

где B_i – база измерения в песчанике Б2...Б4, м (рис. 1);

r – приведенный радиус заряда, м:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3m_{ВВ}}{4\pi\rho_{ВВ}}}, \quad (2)$$

где $m_{ВВ}$ – масса заряда ВВ, кг;

$\rho_{ВВ}$ – плотность патронирования ВВ, кг/м³.

Исследования показали, что при небольших массах заряда, по мере удаления от границы раздела ВВ – порода, наблюдается затухание скорости ударной волны, которое можно описать линейной зависимостью с величиной достоверности аппроксимации, равной коэффициенту парной корреляции $R^2 > 0,9$. Это позволяет с достаточной точностью определить начальную скорость ударной волны на границе раздела сред. Также следует отметить, что чем ниже начальная скорость ударной волны в песчанике, тем медленнее идет ее затухание по мере удаления от границы раздела ВВ – порода.

Таблица 1. Результаты измерения скорости ударной волны в песчанике

ВВ	R/r	V/C_p (среднее значение)	Относительная погрешность, %
Аммонит 6ЖВ	0,49	1,192	3,2
	0,54	1,131	2,7
	0,77	1,041	5,5
	1,24	0,871	0,9
	1,32	0,761	7,9
	1,34	0,860	6,1
Аммонит ПЖВ20	0,54	1,054	4,9
	1,19	0,863	5,7
Опытный образец ВВ IV класса	0,41	1,122	3,8
	1,43	0,990	6,1
Опытный образец ВВ V класса	0,43	0,939	6,4
	0,89	0,857	3,9

* V - абсолютное значение скорости ударной волны, C_p – скорость распространения продольной волны.

Анализ результатов измерений показывает, что увеличение числа датчиков (и, соответственно, баз измерений), располагаемых между плоскопараллельными пластинами образцов горной породы, существенно снижает точность определения скорости распространения ударной волны, что связано с искусственно создаваемыми границами раздела сред на стыке между пластинами. Поэтому целесообразно использовать минимальное количество датчиков, при котором наиболее адекватные результаты можно получить в ближней зоне заряда ВВ.

При проведении достаточного количества серий испытаний с различными ВВ мы получим набор линейных уравнений, описывающих различную скорость затухания ударной волны в породе в зависимости от начального значения скорости ударной волны на границе раздела сред. Это позволяет использовать для обработки результатов один из методов дискретного интегрирования – метод

трапеций. Зная, что характер затухания ударной волны описывается экспоненциальной функцией, можно разбить искомую кривую затухания на трапеции, каждая левая грань которых будет очередной начальной скоростью ударной волны при использовании разных ВВ. И в пределах одного участка можно использовать линейную зависимость затухания ударной волны до тех пор, пока ее значение не станет равным следующей, меньшей начальной скорости ударной волны на границе раздела сред при использовании другого ВВ. Таким образом, ширина каждой трапеции будет определяться углом наклона текущего линейного участка для уравнения затухания скорости ударной волны, ее начальным значением и следующим меньшим начальным значением.

При таком подходе можно получить точки излома, в которых будет изменяться уравнение затухания ударной волны в пределах каждой трапеции, что позволит по ним установить экспоненциальную зависимость затухания ударной волны.

Для каждой серии исследований с использованием одного ВВ необходимо определить коэффициенты A и B линейного уравнения $y = Ax + B$, описывающего затухание ударной волны в ближней к заряду зоне. Так как коэффициенты B показывают начальное значение скорости ударной волны, они будут формировать левую грань трапеций дискретного интегрирования. Порядок расположения трапеций будет определяться сортировкой коэффициентов B по убыванию, а ширина трапеций будет определяться с использованием соответствующего коэффициента A , описывающего линейное затухание ударной волны в пределах каждой трапеции.

Для автоматизации расчетов разработана и реализована компьютерная программа, функционал которой включает следующее: сначала открывается для чтения файл с данными, каждая строка которого обрабатывается отдельно, и значения рассчитанных коэффициентов A и B сохраняются и сортируются по убыванию значения коэффициента B . Затем рассчитывается ширина каждой трапеции, и координаты точек излома сохраняются в формате, удобном для импортирования в программу CurveExpert для Windows. Для увеличения числа точек в выходном файле добавляются координаты середины каждой трапеции и значения скорости ударной волны в этой точке. Далее генерируется график точек излома, пример которого представлен на рис. 3.

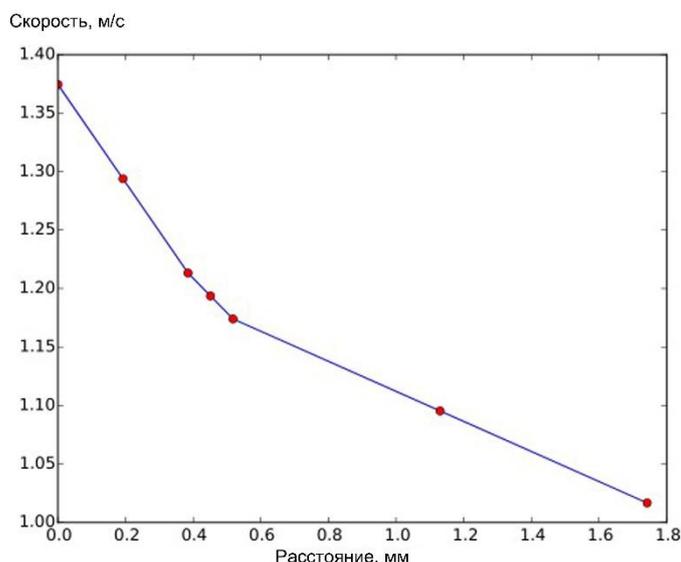


Рис. 3. График точек изломов при дискретном интегрировании скорости ударной волны в песчанике

Обработанные результаты экспериментов позволили установить экспоненциальную зависимость затухания скорости ударной волны в песчанике, которая имеет следующий вид:

$$\frac{V}{C_p} = 0,997 + 0,377 \cdot 0,227^{\frac{R/r}{1,07}} \quad (3)$$

График функции (3) представлен на рис. 4.

Задавая превышение скорости ударной волны над скоростью распространения продольной волны как условие разрушения породы, с учетом (3), можно установить зависимость, описывающую относительный радиус разрушения породы в диапазоне значений $V/C_p \geq 1,01$:

$$R/r = 6,6039 + 0,7216 \cdot \ln\left(\frac{V}{C_p} - 0,997\right). \quad (4)$$

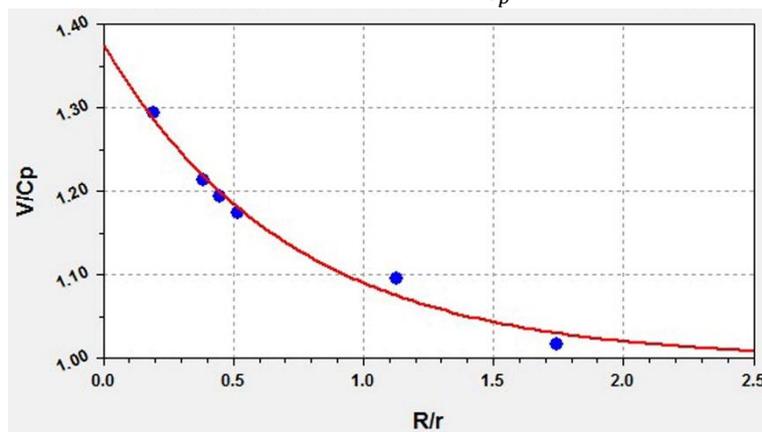


Рис. 4. График зависимости (3) относительной скорости ударной волны от относительного радиуса разрушения

Для исследованного песчаника радиусы разрушения шпуровыми зарядами различных ВВ с патронами диаметром 36 мм, определенные по зависимости (4), приведены в табл. 2.

Абсолютная погрешность измерения внутреннего диаметра трубы и массы заряда незначимо мала, поэтому погрешностью при расчете относительного радиуса разрушения можно пренебречь как не оказывающей влияние на результаты исследований.

Таблица 2. Радиусы разрушения выбороопасного песчаника в зависимости от используемых ВВ

ВВ	V/C_p на границе ВВ – порода	Радиус разрушения, мм
Аммонит 6ЖВ	1,3745	218
Аммонит ПЖВ20	1,2133	203
Опытный образец ВВ IV класса	1,1741	198
Опытный образец ВВ V класса	1,0168	139

4. Выводы

В результате лабораторных экспериментов с помощью предложенной методики изучена скорость затухания ударной волны в образцах выбороопасного песчаника горизонта 1 400 м шахты им. А. А. Скочинского (г. Донецк). Предложенный алгоритм позволяет определять радиус разрушения породы в зависимости от применяемого ВВ. Он может быть использован для проектирования и оперативной корректировки технологических показателей взрывных работ на отдельных горизонтах с целью повышения общей эффективности, а также экологической безопасности горного производства.

5. Список литературы

1. *Ефремов, Э. И.* Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах / Э. И. Ефремов, В. Н. Харитонов, И. А. Семенюк. – М. : Недра, 1979. – 253 с.
2. Залегание и строение выбросоопасных пород, 01.12.2020, электронный ресурс: – URL: <https://fccland.ru/vzryvnoe-razrushenie-porod/11824-zaleganie-i-stroenie-vybrosoopasnyh-porod.html> (Дата обращения: 18.04.2022).
3. *Sato, K.* The Occurrence and Mechanism of Outbursts in Sandstone / K. Sato, K. Itakura // Paper presented at the ISRM International Symposium, Pau, France, August 1989 (Published: August 30, 1989), Paper Number: ISRM-IS-1989-081.
4. Characterization of the Permeability and Acoustic Properties of an Outburst-Prone Sandstone / S. D. Butt, P. K. Frempong, C. Mukherjee, J. Upshall // J. of Applied Geophysics, Vol. 58, Issue 1 (2005). P. 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.04.002>.
5. Discussion of Sandstone Outburst Mechanism by Rock Drivage in Deep Mine Coal-Bearing Strata / G. J. Cheng // Advanced Materials Research 1092 – 1093 (March 2015): 1388–93, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1092-1093.1388>.
6. *Трощенко, В.В.* К вопросу о выбросах песчаников. 2011. – Электронный ресурс: – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-vybrosah-peschanikov> (Дата обращения: 18.04.2022).
7. *Формос, В. Ф.* К вопросу о прогнозировании выбросоопасности песчаников. В. Ф. Формос, Б. А. Лысиков, В. А. Бабичев // Проблемы горного давления. – 2018. – № 34–35. – С. 87–94. ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет».
8. Cleaner Production in Mining Industry: A Flowsheet for Underground Mining of Iron Ore Deposit / A. Medvedev, I. Sokolov, N. Gobov, A. Smirnov // SGEM 2014 Conference Proceedings. Vol.3. Exploration and Mining. Mineral Processing (STEF92 Technology Ltd., 2014). P. 85 – 90. – DOI 10.5593/sgem2014B13.
9. *Калякин, С. А.* Современные проблемы разрушения горных пород взрывом / С. А. Калякин, К. Н. Лабинский // Перспективы развития Восточного Донбасса. Ч. 1. Сб. науч. тр. Шахтинский ин-т ЮРГТУ (НПИ). – Новочеркасск, 2008. – С. 348 – 361.
10. Mathematical model of blasting schemes management in mining operations in presence of random disturbances / E. I. Kazakova, A. N. Medvedev, A. O. Kolomytseva, M. I. Demina // AIP Conference Proceedings 1906, 070010 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5012336>.
11. Blast Parameter Optimization Study Based on a Blast Crater Experiment / X. Zhang, H. Yi, H. Ma, Z. Shen // Shock and Vibration. Vol. 2018. Article ID 8031735; <https://doi.org/10.1155/2018/8031735>.
12. Физика взрыва / под ред. К. П Станюковича. – М. : Физматлит, 2004. – Т. 2.– 656 с.
13. ЭкспертВР. Электродетонаторы ЭД-КЗ-ОП, ЭД-КЗ-П, ЭД-КЗ-ПМ. – Электронный ресурс. URL: https://expertvr.ru/explosives/elektrodetonatory_ed-kz-op_ed-kz-p_ed-kz-pm/.
14. ГОСТ 21806-76. Электродетонаторы предохранительные короткозамедленного действия (Действующий. Ограничение срока действия снято Постановлением Госстандарта N 155 от 14.02.92).

Сведения об авторах:

Лабинский Константин Николаевич, д. т. н., доцент Донецкого технического университета, г. Донецк, Россия. Эл. почта: konstantin.labinskiy@gmail.com.

Медведев Александр Николаевич, канд. т. н., доцент, Уральский Федеральный Университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF DESTRUCTION BY EXPLOSION OF COAL MINE SANDSTONE SAMPLES IN A LABORATORY EXPERIMENT

K. N. Labinsky ¹, A. N. Medvedev ²

¹ Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

² Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia, Ekaterinburg, Russia

The article is devoted to the topical issue of calculating the explosion destruction parameters of samples of host rocks from deep horizons of a coal mine. Knowledge of these parameters is required for operational adjustment of blasting technology, taking into account the rocks properties on which each mining is carried out. The adjustment is carried out in order to minimize the generation of unplanned vesicles that require additional backfilling, as well as excess volumes of dust and gas emissions that contribute to the deterioration of the environmental situation in the mine area. The laboratory study results of the effect of the explosive charge detonation parameters on the shock wave velocity in explosive sandstone samples of the A.A. Skochinsky mine (Donetsk) are presented. The dependence between the relative velocity of the shock wave in sandstone and its density, the density and mass of explosives and the relative distance from the center of the charge is established. A discrete approach to determining the nonlinear dependence of the velocity of shock wave propagation in rock on the detonation parameters is proposed. A simple algorithm and a program for constructing a shock wave damping curve have been developed. An approach for calculating the radius of rock destruction based on the results of a laboratory experiment is proposed, which can be used in practice to improve the efficiency and environmental safety of mining production.

Key words: detonation parameters; discrete approach; surface rock radius of destruction; environmental safety.

References

1. *Efremov, E. I.* Vzryvnoe razrushenie vybrosoopasnyh porod v glubokih shahtah / E. I. Efremov, V. N. Haritonov, I. A. Semenyuk. – M. : Nedra, 1979. – 253 p.
2. Zaleganie i stroenie vybrosoopasnyh porod, 01.12.2020,: – URL: <https://fccland.ru/vzryvnoe-razrushenie-porod/11824-zaleganie-i-stroenie-vybrosoopasnyh-porod.html> (18.04.2022)
3. *Sato, K.* The Occurrence and Mechanism of Outbursts in Sandstone / K. Sato, K. Itakura // Paper presented at the ISRM International Symposium, Pau, France, August 1989 (Published: August 30, 1989), Paper Number: ISRM-IS-1989-081.
4. Characterization of the Permeability and Acoustic Properties of an Outburst-Prone Sandstone / S. D. Butt, P. K. Frempong, C. Mukherjee, J. Upshall // J. of Applied Geophysics, Vol. 58, Issue 1 (2005). P. 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.04.002>.
5. Discussion of Sandstone Outburst Mechanism by Rock Drivage in Deep Mine Coal-Bearing Strata / G. J. Cheng // Advanced Materials Research 1092 – 1093 (March 2015): 1388–93, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1092-1093.1388>.
6. *Troshchenko, V.V.* K voprosu o vybrosah peschanikov. 2011. – Elektronnyj resurs: – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-vybrosah-peschanikov> (18.04.2022).
7. *Formos, V. F.* K voprosu o prognozirovanii vybrosoopasnosti peschanikov. V. F. Forsmos, B. A. Lysikov, V. A. Babichev // Problemy gornogo davleniya. – 2018. – № 34–35. – P. 87–94.
8. Cleaner Production in Mining Industry: A Flowsheet for Underground Mining of Iron Ore Deposit / A. Medvedev, I. Sokolov, N. Gobov, A. Smirnov // SGEM 2014 Conference Proceedings. Vol.3. Exploration and Mining. Mineral Processing (STEF92 Technology Ltd., 2014). P. 85 – 90. – DOI 10.5593/sgem2014B13.
9. *Kalyakin, S. A.* Sovremennye problemy razrusheniya gornyh porod vzryvom / S. A. Kalyakin, K. N. Labinskij // Perspektivy razvitiya Vostochnogo Donbassa. CH. 1. Sb. nauch. tr. SHahtinskij in-t YURGTU (NPI). – Novocherkassk, 2008. – P. 348 – 361.
10. Mathematical model of blasting schemes management in mining operations in presence of random disturbances / E. I. Kazakova, A. N. Medvedev, A. O. Kolomytseva, M. I. Demina // AIP Conference Proceedings 1906, 070010 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5012336>.
11. Blast Parameter Optimization Study Based on a Blast Crater Experiment / X. Zhang, H. Yi, H. Ma, Z. Shen // Shock and Vibration. Vol. 2018. Article ID 8031735; <https://doi.org/10.1155/2018/8031735>.
12. Physics of explosion / K. P Stanyukovich. – M. : Fizmatlit, 2004. – T. 2.– 656 p.
13. EkspertVR. Elektrodetonatory ED-KZ-OP, ED-KZ-P, ED-KZ-PM. – Elektronnyj resurs. URL: https://expertvr.ru/explosives/elektrodetonatory_ed-kz-op_ed-kz-p_ed-kz-pm/.
14. GOST 21806-76. Elektrodetonatory predohranitel'nye korotkozamedlennogo dejstviya (Dejstvuyushchij. Ogranichenie sroka dejstviya snyato Postanovleniem Gosstandarta N 155 ot 14.02.92).