

Определение напряженного состояния массива горных пород взрывным и виброакустическим методом

В.Н. Тюпин¹, К.Б. Пономаренко^{1, 2}✉

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация

² ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород, Российская Федерация

✉ ponomarenkokb@yandex.ru

Резюме: С целью обеспечения безопасности в «Участковом откаточном штреке» на горизонте –250 м шахты им. Губкина АО «КМАруда» выполнены: оценка склонности массива пород к горным ударам виброакустическим методом, а также определение напряженного состояния массива горных пород взрывным методом. В результате проведения экспериментальных исследований виброакустическим методом установлено снижение напряженного состояния массива с 17,5–92,5 МПа (у контура выработки) до 10–30 МПа на расстоянии 1,8 м от борта выработки. Взрывным методом при проходке «Участкового откаточного штрека» установлено, что НС горного массива в районе забоев врубовых и вспомогательных шпуров составляет 21,9–33,5 МПа, в районе забоев отбойных и оконтуривающих шпуров 55,7–65,1 МПа. Взрывной и виброакустический методы определения напряженного состояния массива схожи по физике процесса. При воздействии продуктов детонации или бурового инструмента совместно со статическим горным давлением происходит разрушение определенного объема массива горных пород. Чем больше статическое горное давление, тем больше объем разрушения при одинаковых динамических нагрузках. Учитывая увеличение напряженного состояния от центра к контуру в плоскости забоя выработки, по теоретической формуле проведена численная оценка напряженного состояния на контуре выработки после взрыва врубовых, вспомогательных и отбойных шпуров. Расчеты по формуле и экспериментальные данные совпадают, что указывает на создание остаточных напряжений в массиве за счет последовательного взрывания комплектов шпуровых зарядов взрывчатых веществ.

Ключевые слова: горный массив, натурные измерения, физико-механические свойства горных пород, напряженное состояние массива, взрывной метод, виброакустический метод, взрывные остаточные напряжения

Благодарности: Авторы выражают благодарность Ю.В. Малюкину и коллективу службы геологии шахты им. Губкина комбината «КМАруда» за сопровождение и помощь при проведении экспериментальных работ. Также хотелось бы выразить искреннюю благодарность коллективу ООО «ИНГЕО»: Ю.С. Погорелову, Ю.В. Талецкому и Б.Я. Адигамову за многолетнее плодотворное сотрудничество, предоставление оборудования и помощь в обсуждении результатов исследования.

Для цитирования: Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б. Определение напряженного состояния массива горных пород взрывным и виброакустическим методом. *Горная промышленность*. 2024;(6):34–40. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-34-40>

Assessment of the stress state of a rock mass using the blasting and vibroacoustic methods

V.N. Tyupin¹, K.B. Ponomarenko^{1, 2}✉

¹ Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation

² JSC VIOGEM, Belgorod, Russian Federation

✉ ponomarenkokb@yandex.ru

Abstract: In order to ensure safety at the level of –250 m in the Gubkin mine of KMAruda, the following activities were performed: assessment of the rock mass susceptibility to rock bumps using the vibroacoustic method, as well as determination of the stress state of the rock mass with the blasting method. As the result of experimental studies using the vibroacoustic method, a decrease of the stress state of the rock mass was found to vary from 17.5–92.5 MPa (at the entry contour) to 10–30 MPa at the distance of 1.8 m from the wall. The blasting method used at the level of –250 m of the Gubkin mine revealed that the stress state of the rock mass at the bottoms of the cutting and auxiliary holes is 21.9–33.5 MPa, while at the bottoms of the outer and trimming holes it varies within 55.7–65.1 MPa. The blasting and vibroacoustic methods for determining the stress state of the rock mass are similar in the physics of the process. When exposed to the detonation products or the drilling tools combined with the static rock pressure, a certain volume of rock mass is destroyed. The greater the static rock pressure, the greater the volume of destruction

is under the same dynamic loads. Taking into account an increase of the stress state from the center towards the outline for the rock face plane, a numerical assessment of the stress state at the entry contour after blasting of the cutting, auxiliary and outer holes was carried out based on a theoretical formula. The calculations using the formula and based on the test data coincide, which indicates creation of residual stresses within the rock mass due to the sequential detonation of the explosive sets in the blast holes.

Keywords: rock mass, physical and mechanical properties of rocks, stress state of the rock mass, blasting method, vibroacoustic method, residual stresses due to blasts

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Malyukin Y.V. and the staff of the Geological Service of the Gubkin Mine of the KMAruda Integrated Works for support and assistance during the experimental work. We would also like to express our sincere gratitude to the staff of ООО "INGEO" including Pogorelov Yu.S., Taletsky Yu.V. and Adigamov B.Ya. for many years of fruitful cooperation, provision of equipment and assistance in discussing the results of the study.

For citation: Tyupin V.N., Ponomarenko K.B. Assessment of the stress state of a rock mass using the blasting and vibroacoustic methods. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):34–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-34-40>

Введение

Приоритетным направлением развития горнодобывающих предприятий России является безопасное углубление в земную кору, сопровождающееся усложнением горно-геологических условий. Для эффективной и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых изначально выполняют изыскательские работы, где определяют физико-механические свойства горных пород, параметры трещиноватости и напряженно-деформированное состояние (НДС) массивов. По данным параметрам проводят проектные работы с выбором системы разработки, определением размеров устойчивых обнажений, целиков, камер, выбором способов крепления горных выработок и предупреждения удароопасных ситуаций. Важным элементом для принятия проектных решений является прогноз напряженного состояния (НС) массива, поскольку оно существенно влияет на устойчивость и удароопасность разрабатываемых горных пород. Особенно актуальна задача прогноза удароопасности для подземных горных работ с возрастающей глубиной разработки, а также с увеличивающимся объемом выемки полезного ископаемого при формировании подземных очистных выемок (камер или бункеров).

В настоящее время среди существующих методов исследования НДС массива горных пород существуют группы геологических, геомеханических и геофизических методов геоконтроля [1–5]. Разработано большое количество приборов, аппаратуры и способов контроля НС, среди которых наиболее эффективными в технологическом плане являются геофизические методы, поскольку могут обеспечить как региональный, так и локальный контроль состояния массива. При этом их использование позволяет автоматизировать сбор и обработку получаемой информации [6–8]. Геомеханические методы достаточно эффективны благодаря высокой точности определения напряжений, взаимосвязанных с деформациями и смещениями на открытой поверхности массива и в области влияния выработки [1–5; 9].

Наряду с базовыми методами геоконтроля развивается новый взрывной метод оценки НС [10–12]. Метод основан на создании в призабойной части взрывающего шпура давления продуктов детонации, которое, суммируясь с горным давлением, создает зону раздавливания (мелкодисперсного дробления). Чем больше горное давление, тем больше диаметр зоны раздавливания (диаметр «стакана») при одинаковых физико-технических свойствах массива и детонационных параметрах взрывчатых веществ (ВВ) [10;

11]. Взрывной метод неоднократно испытывался при проходке горных выработок. Достоверность взрывного метода доказана путем его сравнения с геомеханическими методами частичной разгрузки на больших базах и щелевой разгрузки при проведении исследований Лабораторией горного давления и сдвига горных пород ОАО «ВИО-ГЕМ» в шахте им. Губкина, комбината АО «КМАруда» [12]. Исследованиями действия взрыва на окружающий массив горных пород занимались и зарубежные ученые [13–20].

Согласно «ФНиП» в области промышленной безопасности Коробковское месторождение внесено в перечень месторождений, склонных и опасных по горным ударам с критической глубиной по условию удароопасности 600 м¹. В связи с разработкой и вводом новых камер в эксплуатацию локальная оценка НДС и удароопасности горного массива при буровзрывной проходке откаточного штрека шахты им. Губкина является актуальной задачей.

Для решения этой задачи на участке откаточного штрека шахты им. Губкина проведен комплекс натуральных методов локального контроля удароопасности. На горизонте –250 м применялись геофизический виброакустический метод, а также на вновь образовавшихся забоях оперативно устанавливалось НС массива горных пород взрывным методом.

Цель статьи: определение напряженного состояния призабойной и прибортовой части массива взрывным и виброакустическим методами.

Объект исследования: призабойная и прибортовая часть горного массива после цикла взрывания проходческих шпуров в районе участкового откаточного штрека.

Методы исследований. Анализ литературных источников на предмет влияния НС на устойчивость и удароопасность горных массивов. Экспериментальные исследования по определению НС массива виброакустическим и взрывным методом. Численные расчеты по определению НС горного массива экспериментальными методами и по аналитической формуле от действия взрыва при проходке выработки. Сопоставление результатов определения НС экспериментальными виброакустическим и взрывным методами.

Общие положения

Взрывной метод определения напряженного состояния горного массива. Основой для определения НС

¹ ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых промышленных ископаемых» М.; 2020. 250 с.

массива горных пород с использованием энергии взрыва при проходке выработок служит серия теоретических и промышленных экспериментальных исследований [10; 11]. Взрыв заряда ВВ в шпуре создает определенное давление, которое суммируется с уже действующим горным давлением в окружаемом массиве, что и обеспечивает разрушение массива. После взрыва на забое выработки образуется полость – «стакан» (рис. 1). В [10; 11] установлено, что с увеличением горного давления диаметр зоны раздавливания

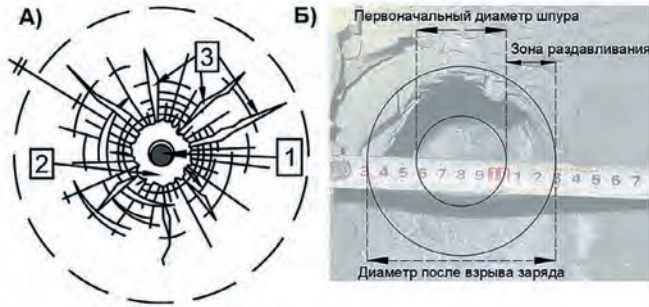


Рис. 1
Взрывной метод определения НС: а – зоны действия взрыва (1 – местоположения шпура с ВВ; 2 – зона раздавливания (мелкодисперсного дробления – «стакан»); 3 – зона радиальных трещин); б – схема к определению геометрических параметров зоны раздавливания «стакана» от взрыва шпура

Fig. 1
The blasting method to determine the stress state of the rock mass: а – zones of the blast action (1 - location of the charged blast hole; 2 - the crushing zone (fine crushing, i.e. the blown-out hole); 3 - zone of the radial cracks); б – a schematic view to determine the geometric parameters of the crushing zone of the blown-out hole

(«стакана») увеличивается. Взрывные методы определения НС массива описаны в работе [10].

На взрывной способ имеется патент [21], где определение НС массива горных пород включает определение среднего размера отдельности в массиве, прочности образцов горной породы на сжатие, скорости продольной волны, коэффициента Пуассона. Затем бурят шпур, заряжают его ВВ, взрывают, измеряют после взрыва конечный диаметр «стакана» и максимальный размер куска породы в «стакане». Подставляя полученные физико-технические параметры, а также детонационные характеристики ВВ в формулу [21], получают НС горного массива в районе забоев шпура. Для пород шахты им. Губкина АО «КМАруда» при взрывании аммонитом 6ЖВ получена упрощенная формула определения НС массива

$$P = \sigma_{сж} - \frac{1.6 * 10^3 * c}{(D_c - 0.04)}, \quad (1)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности породы на одноосное сжатие, Па; c – скорость продольной волны в породе, м/с; D_c – конечный диаметр «стакана», м.

Виброакустический метод определения НС. Физическая сущность виброакустического метода заключается в том, что более напряженный массив при внедрении в него бурового инструмента излучает более мощный сигнал акустической эмиссии за счет большего объема разрушения и появления большего количества микротрещин в зоне разрушения. В процессе бурения шпура сигнал улавливается геофоном (рис. 2). Более мощный сигнал имеет большую амплитуду. Виброакустический метод разработан с ис-

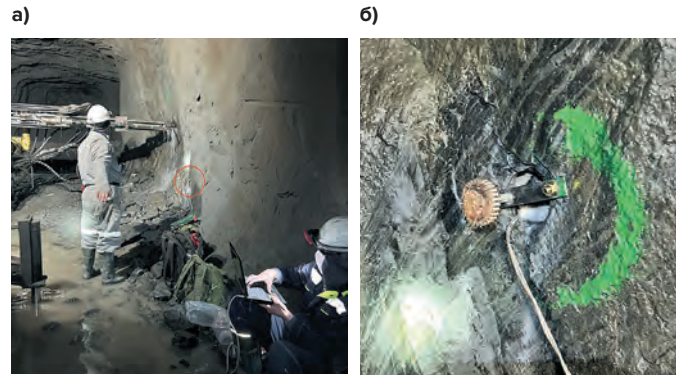


Рис. 2
Процесс бурения шпура и запись вибросейсмических сигналов на ноутбук (красная окружность – местоположение датчика геофона) – а; датчик геофона с прижимным винтом – б

Fig. 2
The blast hole drilling process and recording of the vibroseismic data using a laptop computer (red circle shows the location of the geophone sensor) – а; the geophone sensor with the clamping screw (б)

пользованием исследований, приведенных в [22–26].

Запись амплитуды виброакустических сигналов при бурении шпуров осуществляли на ноутбук (см. рис. 2), периодически с интервалом 0,2 м по глубине шпура, начиная с глубины шпура 0,05 м. Бурение шпуров для прогнозирования НС массива проводили в борту выработки на высоте 0,75 м от почвы и на глубину до 2 м.

Взрывной и виброакустический методы определения НС имеют одинаковую физическую природу. При взрыве газообразные продукты воздействуют на окружающий массив: чем больше горное давление, тем больше объем зоны раздавливания, диаметр «стакана». При внедрении бурового инструмента в массив: чем больше горное давление, тем больше полученная амплитуда вибросигнала, а значит и объем разрушения.

Промышленные экспериментальные исследования

В «Участковом откаточном штреке» на горизонте –250 м шахты им. Губкина АО «КМАруда» выполнены: оценка склонности массива пород к горным ударам виброакустическим методом, а также определение НС массива горных пород взрывным методом.

При проходке «Участкового откаточного штрека» у забоя выработки после проходческого буровзрывного цикла отбирались образцы горных пород и определялись их физико-механические свойства в лаборатории ОАО «ВИОГЕМ». Также по забою штрека линейным методом определялись размеры естественной отдельности в массиве и максимальный кусок породы в «стакане» после взрыва.

Породы в районе забоя «Участкового откаточного штрека» горизонта –250 м представлены железнослудково-магнетитовыми и магнетитовыми кварцитами. Размер отдельности 0,5–1,0 м, количество систем трещин – 3. Физико-механические свойства представлены в табл. 1.

По мере продвижения буровзрывным способом «Участкового откаточного штрека» линейным методом измерялся диаметр зоны раздавливания образованных «стаканов» на поверхности забоя после очередного цикла буровзрывных работ и уборки горной массы (рис. 3).

Таблица 1
Физико-механические свойства горных пород, отобранных с забоя «Участкового откаточного штрека»

Table 1
Physical and mechanical properties of the rocks sampled from the mine face at the level of -250 m in the Gubkin mine of KMARuda

№ образца	ν	E , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{раст}$, МПа	c , м/с
1	0,17	76945	54	5,29	5643
2	0,20	98697	147		5773
3	0,28	93203	135	11,71	5933
4	0,28	95420	90		5878
5	0,27	87823	198		5785
6	0,29	84297	185		5602
Среднее:	0,25	89398	135	8,5	5769

Примечание: ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости, МПа; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа; $\sigma_{раст}$ – предел прочности на растяжение, МПа; c – скорость продольной волны, м/с.

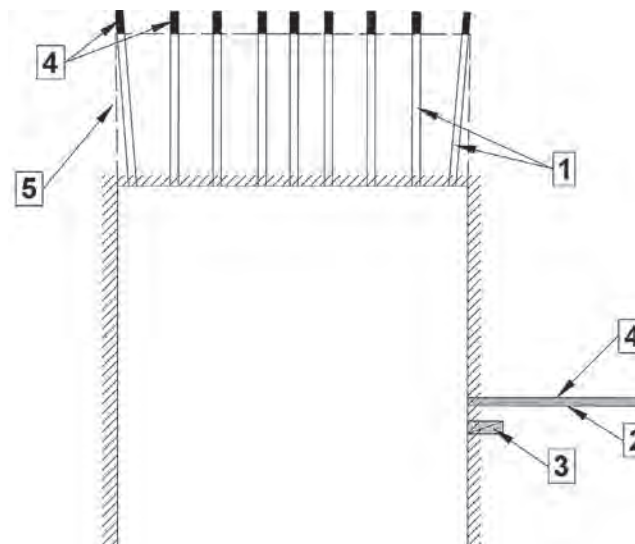


Рис. 4
Схема расположения участков массива, где определялось НС: 1 – проходческие шпуров; 2 – шпуров, проходимые для регистрации вибросигналов; 3 – местоположение геофона; 4 – участки массива, где определялось НС; 5 – граница зоны отбойки

Fig. 4
Layout of the rock mass zones where the stress state was determined. 1 - drifting blast holes; 2 - boreholes drilled for registration of the vibration signals; 3 - location of the geophone; 4 - zones of the rock mass, where the stress state was determined; 5 - the breaking zone boundary

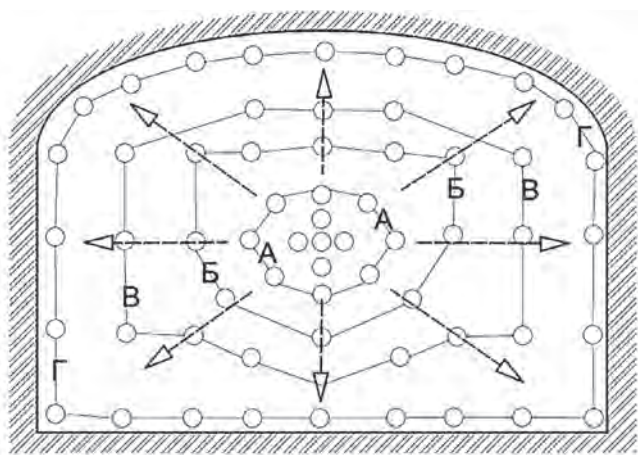


Рис. 3
Схема расположения проходческих шпуров: А, Б – врубовые, вспомогательные шпуров; В – отбойные шпуров; Г – оконтуривающие шпуров; О – контур «стакана» после взрыва заряда ВВ; стрелки – направления движения волн деформаций

Fig. 3
Layout of the drifting blast holes. А, Б - cutting and auxiliary holes; В - outer holes; Г - trimming holes; О - the contour of the blown-out hole; the arrows show the directions of the deformation wave propagation

Всего проведено 4 цикла буровзрывных работ, измерено 55 «стаканов», из которых 33 врубовых и вспомогательных, 22 отбойных и оконтуривающих шпуров. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Согласно табл. 2 НС в «Участковом откаточном штреке» по образованным забоям (рис. 4) и рассчитанное по формуле (1) для врубовых и вспомогательных шпуров составляет – 21,9–33,5 МПа (27,2 МПа в среднем). Для отбойных и оконтуривающих шпуров – 55,7–65,1 МПа (60,2 МПа в среднем).

При использовании виброакустического метода в процессе бурения шпуров геофоном замерялась амплитуда сигнала и передавалась на ноутбук (см. рис. 2). В борт «Участкового откаточного штрека» пробурено 4 шпура глубиной 2 м. Принципиальная схема расположения участков

Таблица 2
Диаметры зон раздавливания («стаканов») при проходке «Участкового откаточного штрека» в массиве магнетитовых кварцитов и НС, рассчитанное по аналитической формуле (1)

Table 2
Diameters of the crushing zones (blown-out holes) during driving a haulage entry in the magnetite quartzite and the stress state of the rock mass calculated using an analytical formula (1)

№ цикла проходки	Зона забоя	Диаметр «стакана», м									Среднее P по (1), МПа
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	А, Б	0,13	0,12	0,12	0,115	0,124	0,125	0,12	0,123	–	21,9
	В, Г	0,17	0,154	0,15	0,153	0,16	–	–	–	–	
2	А, Б	0,126	0,124	0,122	0,13	0,141	0,114	0,12	0,117	0,13	24,8
	В, Г	0,178	0,152	0,18	0,21	0,172	0,147	–	–	–	
3	А, Б	0,13	0,142	0,15	0,123	0,114	0,137	0,112	0,123	–	28,5
	В, Г	0,157	0,15	0,151	0,172	0,163	–	–	–	–	
4	А, Б	0,117	0,105	0,134	0,112	0,143	0,127	0,135	0,142	–	33,5
	В, Г	0,162	0,154	0,171	0,18	0,185	0,177	–	–	–	

Примечание. А, Б – зона забоя с расположением врубовых и вспомогательных шпуров; В, Г – зона забоя с расположением отбойных и оконтуривающих шпуров.

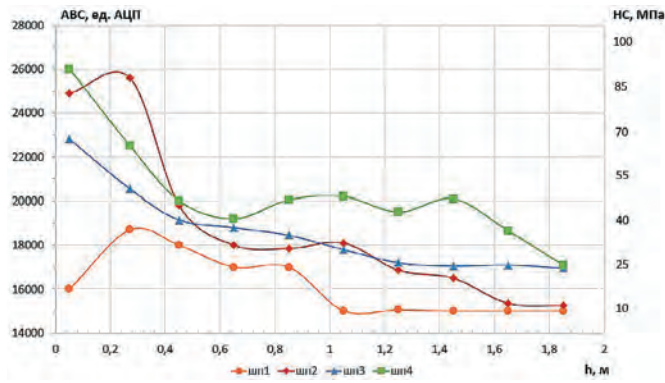


Рис. 5
Зависимости амплитуды вибросигнала (ABC) и НС с глубиной от поверхности борта выработки *h*

Fig. 5
Dependences of the vibration signal amplitude (ABC) and stress state vs. the depth from the surface of the mine wall (*h*)

массива, где определялось НС взрывным и виброакустическим методом, приведена на рис. 4. Результаты регистрации вибросигналов приведены на рис. 5 в виде амплитуды вибросигналов. Перевод амплитуды сигналов в НС массива проведен по определенной методике и отражен на рис. 5 [24–26].

При анализе рис. 5 отмечается плавное уменьшение амплитуды вибросигналов с увеличением глубины шпуров, что указывает на уменьшение горного давления с расстоянием от борта выработки [24–26].

Обсуждение результатов

Виброакустический метод определяет НС массива с расстоянием от борта выработки на глубину 2 м через 0,2 м (см. рис. 4, 5). Взрывной метод фиксирует НС массива в глубине, равной длине врубовых, отбойных и оконтуривающих шпуров, то есть около 1,8–2 м (см. рис. 4).

Анализ табл. 2 и рис. 5 и их сопоставление говорит о том, что на глубине 1,8 м НС массива, определенное виброакустическим методом, составляет 10–30 МПа (20 МПа в среднем). При взрывном методе на глубине 2,0–2,5 м НС во врубовых и вспомогательных шпурах составляет 21,9–33,5 МПа (27,2 МПа в среднем). В отбойных и оконтуривающих шпурах, то есть ближе к контуру выработки, НС составляет 55,7–65,1 МПа (60,2 МПа в среднем). НС у контура борта выработки, определенное виброакустическим методом, составляет 17,5–92,5 МПа (66,2 МПа в среднем).

Важно отметить совпадение значений НС в глубине массива 1,8–2,0 м, определенных виброакустическим (20 МПа) и взрывным (27,2 МПа во врубовых и вспомогательных шпурах) методами. При этом НС, определенное виброакустическим методом, на контуре выработки составляет 66,2 МПа, а взрывным, в районе отбойных и оконтуривающих шпуров – 60,2 МПа, что указывает на совпадение НС.

Оценка величины остаточных напряжений от взрыва проходческих шпуров

Весьма важной проблемой в подземном горном производстве является удароопасность, которая возникает при высоких значениях горного давления в хрупких породах. В связи с этим возникает вопрос, почему в районе забоев врубовых и вспомогательных шпуров НС составляет 27,2 МПа, а в отбойных и оконтуривающих – 60,2 МПа. Вероятной причиной могут быть остаточные напряжения, соз-

даваемые последовательным взрыванием врубовых, вспомогательных и отбойных шпуров [27; 28], что приводит к смещению и запрессовке отделившихся в окружаемый массив.

Рассчитаем величину остаточных напряжений на контуре выработки после взрывания врубовых, вспомогательных и отбойных шпуров по преобразованной формуле, приведенной в [29]:

$$P(r) = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_B d_3 c}{8 r} \left[\frac{\Phi^{0.5} - (\Phi - 1)^{0.5}}{(\Phi - 1)^{0.5} \cdot \Phi^{0.5}} \right] \left(1 - \frac{\mu \nu}{1 - \nu} \right) K_{1-4} + P(1 - \mu), \tag{2}$$

где *D* – скорость детонации ВВ, м/с; ρ_B – плотность заряжения кг/м³; *d*₃ – диаметр заряда, м; *c* – скорость продольной волны, м/с; Φ – показатель трещиноватости; μ – коэффициент трения между отдельностями; ν – коэффициент Пуассона; $K_{1-4} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$; K_1 – показатель усиления действия взрыва перпендикулярно одновременно взрывающейся группе зарядов ВВ; K_2 – показатель усиления действия взрыва перпендикулярно плоскостям рядов шпуров при их КЗВ; K_3 – показатель усиления действия взрыва в зависимости от длины заряда ВВ; K_4 – коэффициент отдачи, указывающий, какая часть энергии передается в окружающий место взрыва массив; *r* – расстояние от центра выработки, м; *P* – напряженное состояние массива, Па.

Численные значения параметров в (2): *D*=4,6*10³ м/с; ρ_B =1100 кг/м³; *d*₃=0,043 м; *c*=5,8*10³ м/с; Φ =3,45 при среднем размере отдельности 0,75 м; μ =0,45; ν =0,25; *P*=13,2*10⁶ Па при глубине 450 м; *r*=2,5 м. K_{1-4} вычислен в соответствии с паспортом буровзрывных работ при проходке «Участкового откаточного штрека». K_1 =1,74 (при N=3); K_2 =2,05 (при N=4); K_3 =2,7; K_4 =0,56; K_{1-4} =5,39. Подстановка численных значений в (2) дает *P*(*r*)=57,6*10⁶ Па, что соответствует экспериментально полученным взрывным и виброакустическим методам. Изменяя параметры действия взрыва в (2), можно снижать или увеличивать напряженное состояние горного массива на контуре выработки и степень его удароопасности.

Направление дальнейших исследований

Исследование результатов действия взрыва разнообразных типов ВВ в различных горных массивах, а также изучение последствий переноса энергии взрыва в среде и влияния на него внешних полей.

Разработка программы фотофиксации зон действия взрыва для автоматического определения их геометрических размеров при буровзрывных работах, создание алгоритма для анализа зон действия взрыва.

Написание программы для автоматизированной обработки данных по приведенным формулам и ее внедрение в производство.

Представление результатов исследований на международном рынке.

Разработка правил ведения взрывных работ при проходке выработок для снижения напряженного состояния окружающего массива горных пород.

Разработка предложений и рекомендаций для выбора типа крепления горных выработок на основе использования результатов настоящих исследований.

Заключение

Проведение экспериментальных исследований с использованием взрывного и виброакустического методов для оценки НДС вблизи забоя и бортов выработки позволяет сделать следующие выводы.

1. Виброакустическим методом при проходке «Участкового откаточного штрека» установлено снижение НДС массива с 17,5–92,5 МПа (на контуре выработки) до 10–30 МПа на расстоянии 1,8 м от борта выработки.
2. Взрывным методом установлено, что НДС горного массива в районе забоев врубовых и вспомогательных шпуров составляет 21,9–33,5 МПа, в районе забоев отбойных и оконтуривающих шпуров – 55,7–65,1 МПа.
3. Взрывной и виброакустический методы определения НДС массива схожи по физике процесса. При
4. Учитывая увеличение НДС от центра к контуру в плоскости забоя выработки, по теоретической формуле проведена численная оценка НДС на контуре выработки после взрыва врубовых, вспомогательных и отбойных шпуров. Расчеты по формуле и экспериментальные данные совпадают, что указывает на создание остаточных напряжений в массиве за счет последовательного взрывания комплектов шпуровых зарядов ВВ от центра к контуру выработки.

Список литературы / References

1. Влох Н.П., Сашурин А.Д. *Измерение напряжений в массиве крепких горных пород*. М.: Недра; 1970. 120 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/20897> (дата обращения: 28.10.2024).
2. Шкурятник В.Л., Николенко П.В. *Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород*. М.: Изд-во МГГУ; 2012. 112 с.
3. Сергеев С.В., Синица И.В. Геомеханическое сопровождение подземной отработки железных руд на комбинате «КМА-руда». *Горный журнал*. 2019;(8):30–33. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.08.05>
Sergeev S.V., Sinitsa I.V. Geomechanical supervision of underground mining at Kombinat KMAruda. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(8):30–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.08.05>
4. Сергеев С.В., Синица И.В., Карякин В.Ф. Оценка склонности массива пород на КМА к горным ударам. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2015;(9):132–137.
Sergeev S.V., Sinitsa I.V., Karyakin V.F. Assessment of rock mass addiction to KMA to rock bursts. *Nauchnye Vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki*. 2015;(9):132–137. (In Russ.)
5. Макаров А.Б. *Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров*. М.: Горная книга; 2006. 391 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/36123> (дата обращения: 28.10.2024).
6. Романов В.В. *Инженерная сейсморазведка*. М.: EAGE Геомодель; 2015. 278 с.
7. Вознесенский А.С., Демчишин Ю.В. Закономерности акустической эмиссии при деформировании горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1999;(6):136–137.
Voznesenskii A.S., Demchishin Yu.V. Regularities of acoustic emission during deformation of rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1999;(6):136–137. (In Russ.)
8. Рубан А.Д., Бауков Ю.Н., Шкурятник В.Л. *Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля*. Ч. 3. Высокочастотные электромагнитные методы. М.: МГГУ; 2002. 148 с.
9. Казикаев Д.М. *Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд*. М.: Недра; 1981. 288 с.
10. Тюпин В.Н., Рубашкина Т.И. Взрывные методы определения напряженного состояния массивов горных пород. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(4):44–45. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180406>
Tyupin V.N., Rubashkina T.I. Blasting methods of stress state determination in rock mass. *Journal of Mining Science*. 2018;54(4):569–574. <https://doi.org/10.1134/S1062739118044026>
11. Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б. Разработка метода определения напряженного состояния горного массива при взрывной проходке выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(8):27–37. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_27
Tyupin V.N., Ponomarenko K.B. Method to determine rock mass stresses in mining with blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(8):27–37. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_8_0_27
12. Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б. Оценка достоверности взрывного метода определения напряженного состояния горного массива. *Взрывное дело*. 2022;(137-94):138–152.
Tyupin V.N., Ponomarenko K.B. Assessment of the reliability of the explosive method for determining the stress state of a mountain range. *Explosion Technology*. 2022;(137-94):138–152. (In Russ.)
13. Shadabfar M., Gokdemir C., Zhou M., Kordestani H., Muho E.V. Estimation of damage induced by single-hole rock blasting: A review on analytical, numerical, and experimental solutions. *Energies*. 2021;14(1):29. <https://doi.org/10.3390/en14010029>
14. Xu J., Xue H., Rui G. Theoretical analysis of rock blasting damage in construction of tunnels closely under-passing sewage box culverts. *Applied Sciences*. 2022;12(19):9875. <https://doi.org/10.3390/app12199875>

15. Mousavi S.A., Ahangari K., Goshtasbi K. Impact of the layering of blast-induced damage factors in the hoek–brown failure criterion on the bench damage monitoring of mines. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*. 2023;38(1):93–104. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.1.9>
16. Miao S., Konicek P., Pan P., Mitri H. Numerical modelling of destress blasting – A state-of-the-art review. *Journal of Sustainable Mining*. 2022;21(4):278–297. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1366>
17. Wang X., Zhao W.-B., Zhou H.-Y., Liu D.-S. Analysis of the tunneling blast safety criterion based on longitudinal shocks. *Shock and Vibration*. 2023;2023:2393030. <https://doi.org/10.1155/2023/2393030>
18. Zhou H., Gao Q., Fan Y., Lu W., Wang Y., Yang Y., Leng Z. Analysis of causes of vibration differences induced by different kinds of blastholes based on the interpretation of blasting parameters: A case study in dam foundation excavation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023;56(10):7237–7254. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03457-2>
19. Cai B., Hao J., Peng Yu. Influence of blasting at tunnel face on an existing adjacent tunnel with oblique cross angle and small clear spacing. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2022;15(2):177–183. <https://doi.org/10.25103/jestr.152.20>
20. Wang H., Zhao Y., Shan R., Tong X., Liu D. Analysis of blasting vibration effect of railway tunnel and determination of reasonable burial depth. *Geofluids*. 2022;2022:7151294. <https://doi.org/10.1155/2022/7151294>
21. Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б. *Способ определения напряженного состояния массива горных пород*. Патент 2768768, Российская Федерация, заявл. 02.06.2021; опубл. 24.03.2022.
22. Влох Н.П. *Управление горным давлением на подземных рудниках*. М.: Недра; 1994. 208 с. Режим доступа <https://www.geokniga.org/books/8924> (дата обращения: 28.10.2024).
23. Влох Н.П., Сашурин А.Д. *Управление горным давлением на железных рудниках*. М.: Недра; 1974. 184 с.
24. Резниченко Ю.В. и др. Сейсмоакустические методы изучения напряженного состояния горных пород на образцах и в массиве. *Труды Геофизического института академии наук СССР*. 1956;(34).
Reznichenko Yu.V. et al. Seismoacoustic methods of studying the stress state of rocks using samples and within the rock mass. *Trudy Geofizicheskogo Instituta Akademii Nauk SSSR*. 1956;(34). (In Russ.)
25. Ривкин И.Д., Запольский П.А., Богданов П.А. *Звукометрический метод наблюдения проявлений горного давления на шахтах Криворожского бассейна*. М.: Металлургиздат; 1956. 188 с.
26. Мусин А.И., Бакаев М.Т., Овсянников П.Н. *Применение микросейсмического метода для исследования массива горных пород*. М.: Госгортехиздат; 1962. 64 с.
27. Тюпин В.Н. Механизм формирования зоны остаточных напряжений при взрывании в трещиноватом гранитном массиве рудников ПАО «ППГХО». *Горный журнал*. 2020;(10):60–64. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.10.04>
Tyupin V.N. Initiation of residual stress zone during blasting in jointed granite rock mass in operation of Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(10):60–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.10.04>
28. Тюпин В.Н. Изменение напряженно-деформированного состояния призабойного массива горных пород после взрывания проходческих шпуров. *Горный журнал*. 2023;(12):10–14. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.02>
Tyupin V.N. Change in the stress–strain behavior of rock mass after heading-aimed blasting. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.12.02>

Информация об авторах

Тюпин Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3709-0957>, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Пonomаренко Константин Борисович – младший научный сотрудник, ОАО «ВИОГЕМ», лаборатория горного давления и сдвига горных пород, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1745-9670>, e-mail: ponomarenkokb@yandex.ru

Information about the authors

Vladimir N. Tyupin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State University, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3709-0957>, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Konstantin B. Ponomarenko – Junior Researcher, JSC VI-OGEM, Laboratory of Rock Pressure and Rock Displacement, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1745-9670>, e-mail: ponomarenkokb@yandex.ru

Article info

Received: 23.10.2024

Revised: 21.11.2024

Accepted: 02.12.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.10.2024

Поступила после рецензирования: 21.11.2024

Принята к публикации: 02.12.2024