

АНАЛИЗ ЗОН НАРУШЕНИЯ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

А.С. Колотовкин¹, Д.П. Зеленин², Я.В. Левченко¹

¹ ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kolotovkin1904@mail.ru

² АО «Черниговец», Березовский, Россия

Аннотация: Приведены результаты исследований авторов, направленных на определение параметров зон нарушения осадочных горных массивов при производстве взрывных работ. Особенностью таких массивов являются сильно развитые системы трещин, простирающиеся как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, что оказывает значительное влияние на эффективность и результаты взрывных работ. Понимание закономерностей распространения зон нарушения в процессе взрывного воздействия позволяет минимизировать наведение излишней трещиноватости и дает возможность обеспечить максимальное сохранение исходных прочностных свойств пород при добыче блочного камня и производстве щебня. В основу статьи положен опыт работы со слоистыми и трещиноватыми массивами карбонатных пород Русской платформы. Выполнено обобщение теоретических положений и практических данных, характеризующих механизмы разрушения взрывом анизотропных горных массивов месторождений полезных ископаемых осадочного типа. На базе закономерностей развития трещиноватости в осадочных горных породах с учетом натуральных замеров и серии опытно-промышленных взрывов определены размеры зон нарушения радиальными трещинами карбонатного массива. Также используя методы разборки карбонатных массивов на блочный камень посредством выпиливания блоков и экскаваторной разборки, дополнительно уточнены размеры зон нарушения массива взрывными работами. Даны предварительные рекомендации по совершенствованию способов подготовки минерального сырья осадочных месторождений к выемке.

Ключевые слова: трещиноватость, параметры трещин, взрывные работы, осадочный массив, слоистый массив, разрушение массива, взрывные скважины, разностный слой, геологическая отдельность.

Для цитирования: Колотовкин А. С., Зеленин Д. П., Левченко Я. В. Анализ зон нарушения осадочных горных массивов при производстве взрывных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 41–54. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_41.

Blast-induced damage zone studies in sedimentary rock mass

A.S. Kolotovkin¹, D.P. Zelenin², Ya.V. Levchenko¹

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS»,
Moscow, Russia, e-mail: kolotovkin1904@mail.ru

² JSC Chernigovets, Berezovsky, Russia

Abstract: The studies aim to determine parameters of damaged zones induced by blasting in sedimentary rock mass. A feature of sedimentary rock mass is the developed systems of joints both in vertical and horizontal planes, which substantially affect blasting efficiency. Understanding the patterns of growth of damage zones induced by blasting allows eliminating excessive fracturing and enables maximum possible preservation of initial strength of rocks in dimension stone and crushed stone production. The study is based on the work experience gained in the laminated and jointed carbonate rock mass in the Russian Platform. The theoretical provisions and the experimental data on blasting-induced damage mechanisms in anisotropic sedimentary rock masses are generalized. Using the patterns of jointing propagation in sedimentary rocks mass, the in-situ measurements and the experimental blasting data, the sizes of zones damaged with radial cracks were determined in carbonate rock mass. Then, using the methods of dimension stone separating from carbonate rock mass by wire sawing and excavation, the blasting-induced damage zone sizes were refined. Some pre-recommendations on improvement of preparatory blasting techniques in sedimentary rock mass are given.

Key words: jointing, joint parameters, blasting, sedimentary rock mass, laminated rock mass, rock mass destruction, blastholes, difference layer, geological discontinuity.

For citation: Kolotovkin A. S., Zelenin D. P., Levchenko Ya. V. Blast-induced damage zone studies in sedimentary rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12):41-54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_41.

Введение

Месторождения полезных ископаемых осадочного типа, используемые для добычи различных видов минерального сырья, представляют собой сложнопостроенные природные массивы. Неоднородность структуры и вещественного состава данных массивов позволяют констатировать, что их прочностные и деформационные свойства сильно изменяются, а численные значения свойств являются случайными величинами, варьирующимися в пределах некоторых средних значений.

Большинство месторождений полезных ископаемых осадочного происхождения представлены слоистыми массивами, которые состоят из разностных слоев горных пород, разделенных плоскостями слоистости и вертикальными эндогенными трещинами на природные (геологические) отдельности.

Уточнение механизма разрушения данных массивов позволяет выявить тен-

денции совершенствования технологии горных работ для максимального сохранения качества извлекаемого минерального сырья.

Трещиноватость осадочных пород

Гранулометрический состав добытого минерального сырья зависит в первую очередь от технологии подготовки горного массива к выемке, однако значительное влияние на него оказывают структурные особенности породного массива месторождения.

Отличительной особенностью массива осадочных пород, в число которых входят угольные и карбонатные месторождения, является наличие в нем нескольких систем вертикальных (эндогенных) трещин и явно выраженная слоистость. В большинстве случаев присутствуют основные слои, как правило, являющиеся продуктивными, которые перемежаются тонкими прослойками слабых пород,

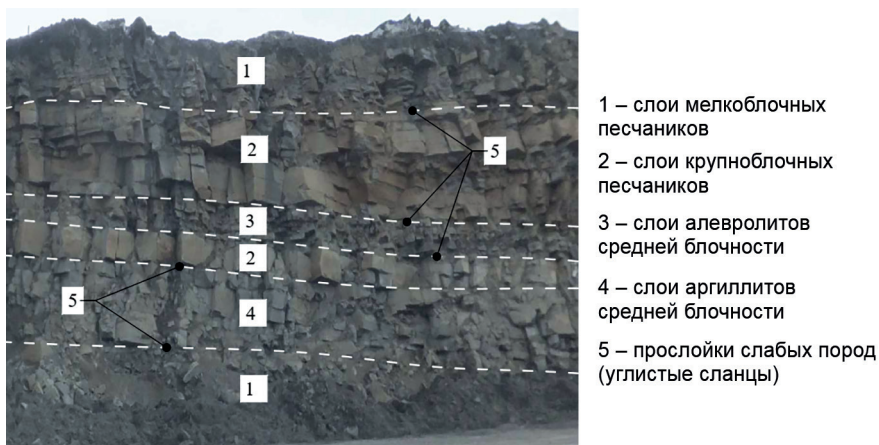


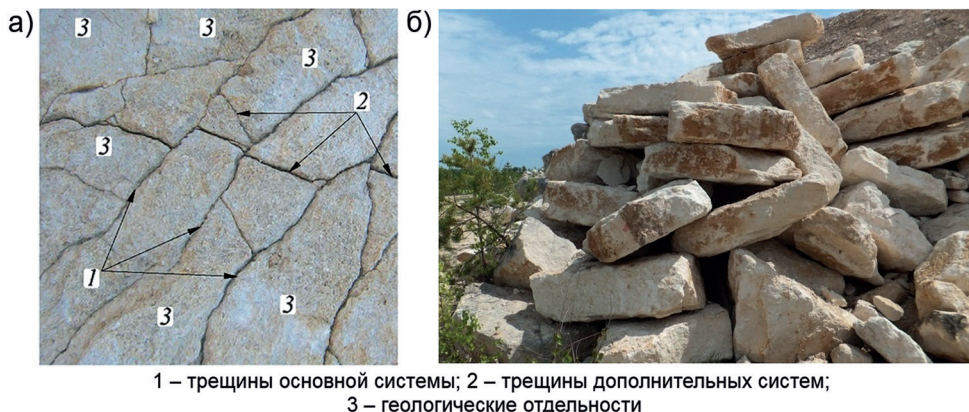
Рис. 1. Внешний вид массива угольного месторождения
 Fig. 1. Appearance of the coal deposit massif

таких как мергели, углистые сланцы, глины (рис. 1) [1 – 5].

Трещины в осадочных массивах составляют сложные дифференцированные сети (рис. 2). Они возникают при диагенезе, в результате уменьшения объема горных пород. Такие трещины называются эндогенными, или трещинами отдельности. Они располагаются в направлении, перпендикулярном плоскостям слоистости (прямоугольные трещины), и образуют системы, разделяющие слой на геологические отдельности [6 – 8].

Частота природных трещин и мощность разностных слоев определяют блочность породного массива. При стандартной взрывной подготовке осадочных массивов к выемке фактический гранулометрический состав извлекаемого материала существенно меньше природной блочности массива.

Критически важным элементом при отработке слоистых массивов (с целью получения минерального сырья крупных фракций) является уменьшение взрывного переизмельчения мощных разност-



1 – трещины основной системы; 2 – трещины дополнительных систем;
 3 – геологические отдельности

Рис. 2. Фотографии, иллюстрирующие трещиноватую структуру массива осадочных пород: первичные трещины усыхания (а); геологические отдельности, извлеченные при экскаваторной разборке карбонатного массива без применения БВР (б)

Fig. 2. Photographs illustrating the fractured structure of the sedimentary rock massif: primary drying cracks (a); geological separates extracted during excavator disassembly of the carbonate massif without the use of blasting (b)

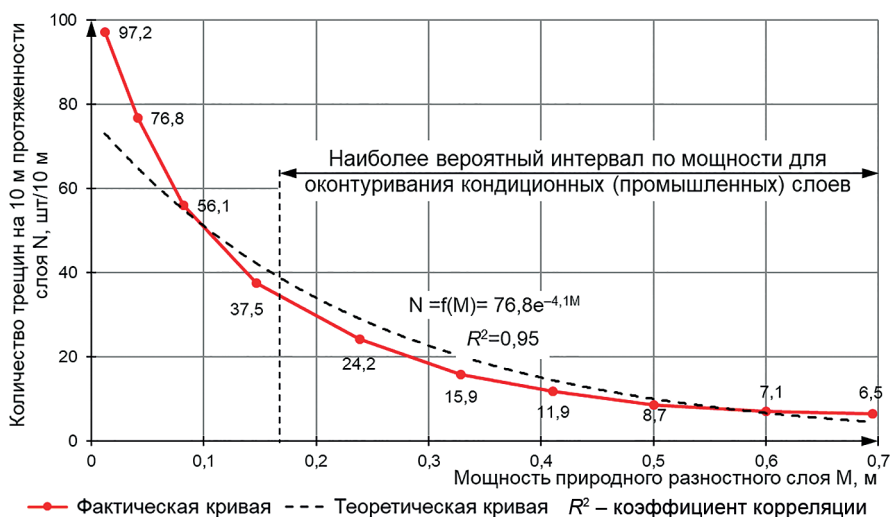


Рис. 3. Изменение числа эндогенных трещин на 10 м протяженности разностного слоя известняков Русской платформы в зависимости от их мощности (известняки Подольского геологического горизонта, Песковская группа месторождений)

Fig. 3. Change in the number of endogenous cracks on 10 m of the length of the difference layer of the limestone of the Russian platform, depending on their thickness (limestones of the Podolsk geological horizon, the Peskov group of deposits)

ных слоев, обладающих максимальными размерами природных отдельностей (максимальной блочностью) [9–11].

Влияние трещиноватости на степень нарушенности массива

Частота трещин и размеры геологических отдельностей в разностных слоях имеют значительные вариации для разных типов осадочных месторождений. Вместе с тем общим является закономерное уменьшение числа эндогенных вертикальных трещин с увеличением мощности природного разностного слоя. Для известняков данная закономерность представлена на рис. 3.

Среднее расстояние между секущими трещинами, согласно работе Н.Я. Репина [12], (l_{cp} , см) в слоистых массивах угольных месторождений связано с мощностью разностных слоев (M , см) следующей зависимостью:

$$l_{cp} = 1,62 \times M^{0,84}, \text{ см.} \quad (1)$$

Процесс взрывного разрушения слоистых массивов весьма сложен, что обусловлено экранированием значительной части энергии взрыва вертикальными межслоевыми трещинами, а также плоскостями слоистости, в большинстве случаев заполненными слабыми пластичными породами (мергелями, глинами, аргиллитами и т.д.).

В работе [1] приведена принципиальная картина разрушения осадочного массива горных пород взрывом (см. рис. 4), которая свидетельствует о том, что именно мощные и наиболее продуктивные разностные слои 1 имеют максимальные повреждения в зонах соприкосновения с зарядами. Эти повреждения происходят за счет формирования зоны дезинтеграции (интенсивного измельчения пород до фракций от 2 до 500 мкм) и зоны радиальных трещин (см. рис. 5) [13–15].

Критическими элементами слоистых массивов при их разрушении являются мощные разностные слои, обладающие минимальной анизотропией прочност-

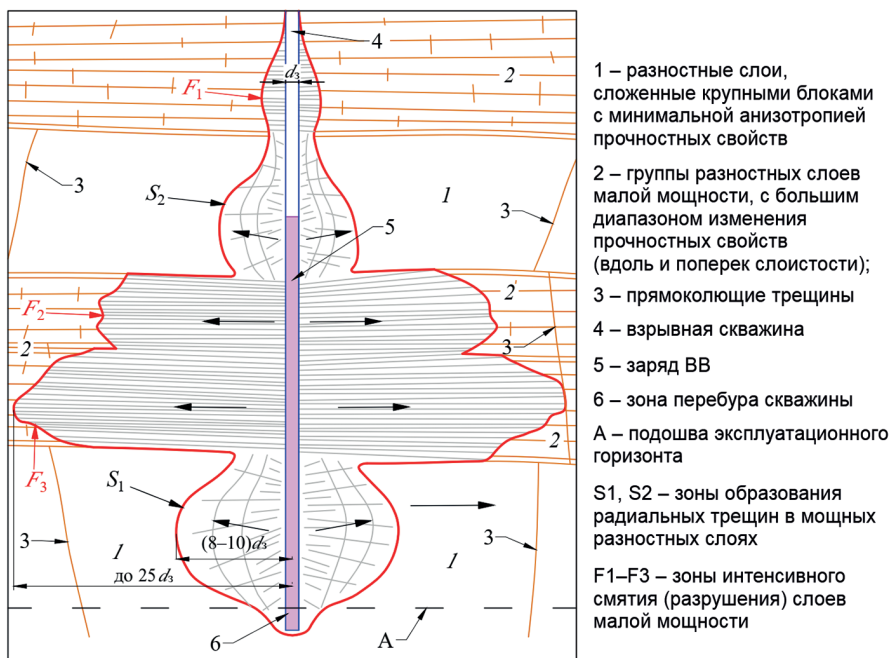


Рис. 4. Схематичная картина разрушения слоистого массива взрывом скважинных зарядов
 Fig. 4. Schematic picture of fracture of layered rock massif during borehole charge explosion



Рис. 5. Качественно-количественная картина разрушения мощного разностного слоя известняка, расположенного в почвенной зоне взрываемого уступа (взрывание без перебура)
 Fig. 5. Qualitative and quantitative picture of fracture of a powerful difference layer of limestone located in the soil zone of the blasted ledge (blasting without overdrilling)

ных свойств и максимальной блочностью, а также слабые межслоевые контакты, по которым возможно смещение нижней части технологических уступов с частичным сохранением структуры массива в верхней зоне.

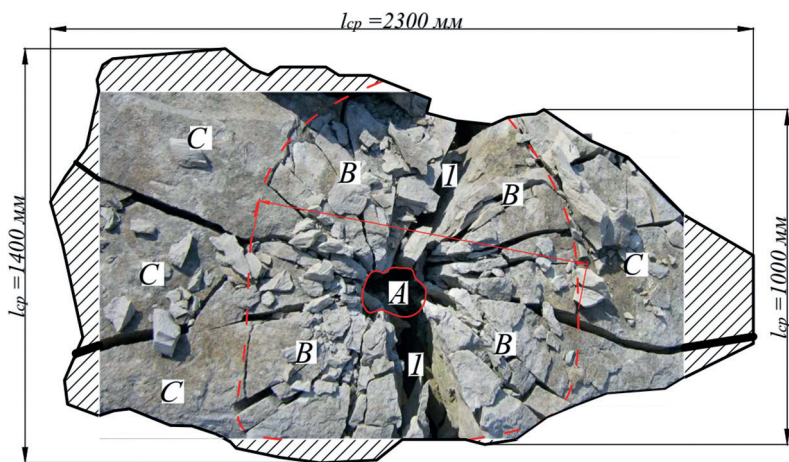
Эффективность разрушения слоистых массивов определяется следующими факторами:

- мощность разностных слоев и концентрация в них эндогенных трещин;
- прочность цемента, заполняющего межслоевое пространство (межслоевых контактов);
- прочностные характеристики пород, составляющих геологические отдельности;
- мощность импульса детонации ВВ;
- степень свободы смещения разрушаемого взрывом фрагмента.

В отличие от разрушения незащемленного блока с полностью открытыми поверхностями, где зона распространения радиальных трещин составляет до $25 d_3$ (рис. 6), зона радиальных трещин

в пределах мощных разностных слоев, взрывааемых в зажатой среде, снижается почти втрое, до уровня $10 \div 12 d_3$ (см. рис. 5), а размер зоны дезинтеграции (интенсивного смятия) увеличивается до $2 \div 3 d_3$, для незащемленного блока этот параметр составляет $1 \div 2 d_3$.

При характерной сетке скважин $4,5 \times 4,5$ и $4,0 \times 4,5$ м (для диаметра заряда 110–130 мм), применяемой при взрывном рыхлении карбонатных массивов, зона нарушения мощных разностных слоев радиальными экзогенными трещинами составляет порядка 20–30%. Зоны нарушения тонких анизотропных слоев горизонтальными трещинами, формируемыми вдоль линии слоистости, составляют 50–70% (в ряде случаев эти зоны полностью перекрываются в пределах ячейки скважин) [1]. Последнее объясняется тем, что зоны разрушения мощных разностных слоев с минимальной анизотропией свойств и слоев с явно выраженной анизотропией различны (см. рис. 4) [16].



1 – основная трещина; А – зона разрушения горной породы, равная $\sim(1 \div 2) d_3$, где d_3 – диаметр заряда ВВ; В – основная зона распространения радиальных трещин $(14-15) d_3$; С – периферийная зона распространения радиальных трещин $(25-35) d_3$.
Основная масса радиальных трещин и основная трещина 1 приурочена к направлению, в котором блок имеет минимальные размеры

Рис. 6. Картина разрушения блока известняка размером $1400 \times 2300 \times 500$ мм зарядом ВВ
Fig. 6. The picture of destruction of a $1400 \times 2300 \times 500$ mm limestone block by an explosive charge

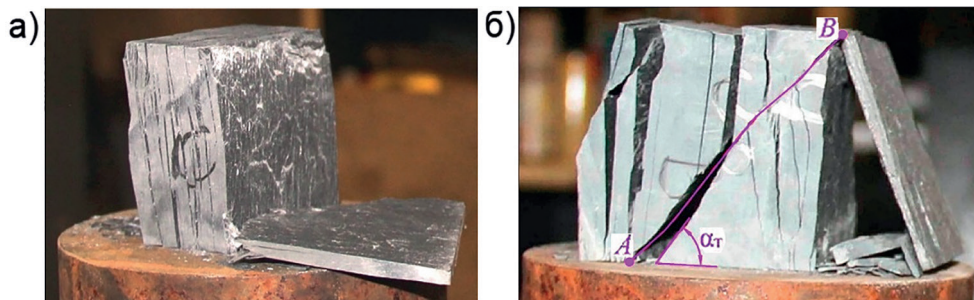


Рис. 7. Разрушение прессом образцов карбонатных пород с различной степенью анизотропии прочностных свойств вдоль направления нагрузки: образцы с ярко выраженной слоистостью и высоким уровнем анизотропии свойств, вектор основной нагрузки проходит вдоль линий слоистости (по слабым контактам) (а); промежуточный тип образцов горных пород, разрушающихся по линиям слоистости и с формированием трещин под углом внутреннего трения α_T (б)

Fig. 7. Press fracture of carbonate rock samples with different grade of strength property anisotropy along load direction: layered samples with high level of property anisotropy, main load vector passes along layering lines (weak contacts) (a); intermediate type of rock samples) fracturing along layering lines and with formation of cracks under internal friction angle α_T (b)

Тонкие «анизотропные» разностные слои разрушаются в основном вдоль слабых контактов, проходящих по линиям слоистости, поскольку прочность в данном направлении в $5 \div 10$ раз меньше, чем в направлении, перпендикулярном слоистости [17, 18]. Схожие разрушения фиксируются при прессовых испытаниях образцов углей, аргиллитов, углистых сланцев (рис. 7) [19, 20]. Даже при

отсутствии видимых линий слоистости на образцах (кубики $50 \times 50 \times 50$ мм) различия их прочности укладываются в интервал от 2 до 6 (таблица).

Размеры зон нарушенности массива взрывными работами

Для оптимизации параметров взрывной подготовки осадочных массивов к выемке необходимо конкретизировать

Изменение прочностных свойств образцов углистых сланцев, аргиллитов и углей месторождения «Каражыра» (Казахстан) в направлении, параллельном и перпендикулярном слоистости

Changes in strength properties of samples of coal shale, claystone and coals from «Karazhyra» deposit (Kazakhstan), in the direction parallel and perpendicular to the stratification

Образец	Предел прочности на сжатие		Объемный вес $\gamma_0, \text{ г/см}^3$
	$\sigma_{\text{сжл}} \parallel, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{сжл}} \perp, \text{ МПа}$	
Глинистый сланец (аргиллит)	$4,52 \pm 0,50$	$11,60 \pm 0,70$	2,09
Глинистый сланец (серый аргиллит)	$6,32 \pm 0,63$	$11,00 \pm 0,70$	2,14
Глинистый сланец (серый аргиллит)	$4,05 \pm 0,38$	$12,21 \pm 1,17$	2,08
Углистый сланец	$8,70 \pm 1,30$	$12,90 \pm 0,92$	1,64
Углистый сланец	$7,94 \pm 0,54$	$10,70 \pm 1,78$	1,63
Уголь	$3,12 \pm 0,92$	$19,50 \pm 4,38$	1,38
Уголь	$6,25 \pm 1,44$	$13,43 \pm 1,143$	1,40
Уголь	$3,72 \pm 1,07$	$19,10 \pm 1,76$	1,40

Примечание: \parallel — параллельно слоистости; \perp — перпендикулярно слоистости.

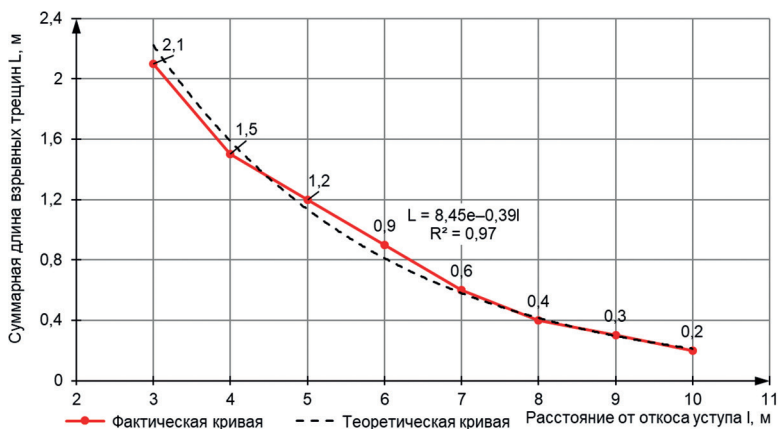


Рис. 10. Изменение суммарной длины взрывных трещин при удалении от откоса уступа (точек А и D) для верхней трехметровой зоны технологического уступа высотой 12 м
 Fig. 10. Change in the total length of explosive cracks when moving away from the scarp (points A and D) for the upper three-meter zone of the technological ledge with a height of 12 m

сивность их затухания по мере удаления от откоса уступа (точек А и D, рис. 10) [2]. Кривая соответствует следующим условиям: удельный расход эталонного ВВ — 0,47 кг/м³, сетка скважин 5×5 м; глубина экспериментальной выработки 3 м. Эмпирическая зависимость изменения суммарной длины взрывных трещин по мере удаления от откоса имеет вид $L = 8,45e^{-0,39l}$ (где l — расстояние от откоса уступа, м).

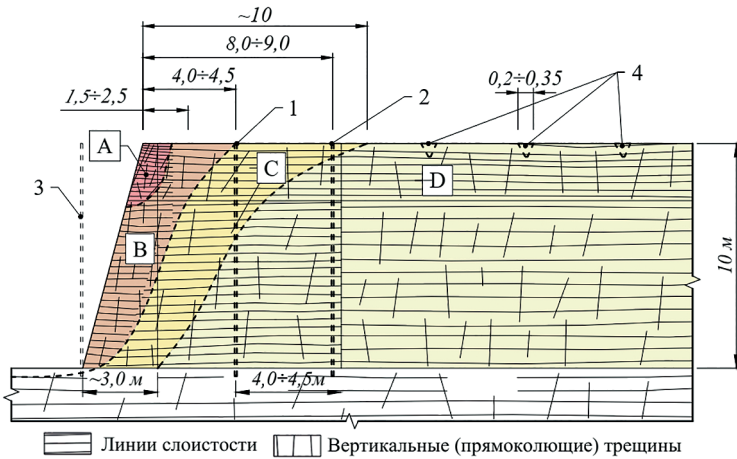
Многочисленные экспериментальные работы [22] по безвзрывной разработке карбонатных массивов гидравлическими экскаваторами, выполненные на месторождениях Русской платформы, подтверждают тот факт, что размеры зоны их нарушения взрывными работами в верхнем 3-метровом слое уступа составляет не более 6–8 м (при удельных расходах ВВ 0,35–0,42 кг/м³). Это может быть связано с экранирующим эффектом трещин, пронизывающих массив. В слоистых массивах, в связи с наличием в них нескольких систем трещин, зона разрушения пород взрывом предопределяется контурами распространения этих трещин.

Схема нарушения законтурного массива, приведенная на рис. 8, дает прин-

ципально качественную картину зон нарушений и не дифференцирует количественный уровень нарушений в пределах локальных зон. Степень (количество) нарушений осадочного массива при производстве взрывных работ можно выразить через коэффициент структурного ослабления массива (коэффициент снижения прочности — k_0), равный отношению прочности массива в ослабленной зоне к прочности массива в целике. Если принять $k_0 = 1$ — для ненарушенного массива (целика), то относительно него можно выполнить градацию нарушения законтурной зоны осадочного массива, ослабленной взрывами зарядов вертикальных скважин.

Качественно-количественная картина зон нарушений и характерных для них коэффициентов структурного ослабления приведена на рис. 11.

Наибольшее экранирование взрывных волн происходит в верхней и приоткосной зонах уступов (рис. 11, зоны А, В), межслоевые контакты и вертикальные прямоколющие трещины которых раскрываются при взрывании последних рядов скважин. Размер раскрытия трещин между соседними геологическими



А, В, С, D – зоны массива с разной степенью нарушений; зона А с коэффициентом ослабления $k_0 \approx 0,25$; зона В – $k_0 \approx 0,45 \div 0,5$; зона С – $k_0 \approx 0,7 \div 0,9$; зона D – $k_0 \approx 0,9 \div 1,0$;
 1, 2 – проектируемые скважины; 3 – крайняя скважина предыдущего взрывного блока;
 4 – локальные нарушения от перебуров размером $0,2 \div 0,35$ м (при глубине перебура 1,2 м и диаметре скважин $110 \div 200$ мм)

Рис. 11. Качественно-количественная картина зон нарушений осадочного массива горных пород взрывными работами

Fig. 11. Qualitative and quantitative picture of disturbance zones of the sedimentary rock mass by blasting

отдельностями в этих зонах может составлять от 0,1 до 50–100 мм. Именно эти сложные по условиям дробления зоны являются источником выхода негабаритных фракций при взрывном разрушении массива.

Попытки повысить степень дробления слоистых массивов путем увеличения удельного расхода взрывчатых веществ (ВВ) часто не приводят к желаемым результатам, вызывая переизмельчение ма-

териала при незначительном снижении негабаритных фракций.

В зоне А, как правило, происходит смещение блоков (геологических отдельных) с образованием сети откольных трещин (рис. 12). В областях, удаленных от взрыва (зона D) практически не фиксируются нарушения структуры массива, связанные с появлением взрывных трещин и остаточных деформаций (межблоковых смещений).



Рис. 12. Трещины (заколы, возникающие в зоне верхней бровки уступа при производстве взрывных работ)

Fig. 12. Cracks (arising in the zone of the top edge of the ledge during blasting operations)

Анализируя данные рис. 11, можно констатировать, что для первого ряда проектируемых скважин 1 контур их отбойки на 50÷60% располагается в зонах с максимальным нарушением массива взрывом последнего ряда скважин 3 предыдущего взрывного блока. Для второго ряда скважин 2 соотношение меняется, зона нарушенности составляет здесь лишь 10÷15%.

Одним из простейших способов регулирования гранулометрического состава материала, получаемого в процессе дезинтеграции слоистого массива взрывом, является снижение удельного влияния площади откосных зон массива (см. рис. 11, А, В), нарушенных на предшествующих стадиях взрывного разрушения. Обеспечить сказанное можно посредством увеличения линейных размеров взрываемого блока и высоты уступа.

Выводы

1. На размеры зон нарушения осадочных массивов при производстве взрывных работ важнейшее влияние оказывает степень их трещиноватости и ориентация природных трещин. В таких массивах скважина с зарядом ВВ проходит через несколько разностных слоев,

которые принципиально различаются по условиям разрушения взрывом.

2. Зона нарушения мощных разностных слоев радиальными трещинами при производстве взрывных работ в слоистых массивах составляет $(10\div 12) d_3$ (где d_3 — диаметр заряда), а размер зоны раздвливания (диспергирования) — $(2\div 3)d_3$.

3. Маломощные слои осадочных массивов разрушаются в основном по направлению слоистости, а размеры зон их нарушения составляют до $25 d_3$.

4. Размер зоны нарушения радиальными трещинами незащемленного блока из разностного слоя осадочного массива в 3,0÷3,5 раза больше, чем подобного блока, взрываемого в зажатой (естественной) среде.

5. Основываясь на анализе экспериментальных работ по безвзрывной разработке карбонатных массивов на месторождениях Русской платформы, установлено, что размеры зон нарушения взрывными работами в верхнем 3-метровом слое уступа (вглубь массива) составляют не более 6—10 м (при удельных расходах ВВ 0,35—0,4 кг/м³). Качественно-количественная картина зон нарушения горного массива осадочных пород приведена на рис. 11.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Супрун В. И., Горбонос М. Г., Стромонотов А. В., Левченко Я. В., Колотовкин А. С. Перспективные технические решения по стабилизации качества щебня из карбонатных горных пород // Рациональное освоение недр. — 2021. — № 6(62). — С. 46—59. DOI: 10.26121/RON.2021.32.90.004.

2. Супрун В. И., Ворошилин К. С., Бурцев С. В., Минибаев Р. Р. Регулирование гранулометрического состава извлекаемых горных пород при отработке угольных и карбонатных месторождений // Горный журнал. — 2021. — № 7. — С. 61—64. DOI: 10.17580/gzh.2021.07.10.

3. Bigi S., Marchese M., Meda M., Nardon S., Franceschi M. Discrete fracture network of the Latemar carbonate platform // Italian Journal of Geosciences. 2015, vol. 134, no. 3, pp. 474—494. DOI: 10.3301/IJG.2014.34.

4. Супрун В. И., Стромонотов А. В. Выбор и обоснование технологических решений по добыче блочного известняка в карбонатных массивах Русской платформы / Добыча, обработка и применение природного камня: Сборник научных трудов Международной технической конференции. — Екатеринбург: МГТУ, 2018. — С. 20—25.

5. Стромогов А. В., Супрун В. И., Агафонов Ю. Г. Технология добычи блочного камня на сложноструктурных карбонатных месторождениях // Горные науки и технологии. — 2016. — № 2. — С. 3–13.

6. Супрун В. И., Артемьев В. Б., Опанасенко П. И., Радченко П. И., Левченко С. А. Комплексы циклично-поточной технологии для отработки карьеров. — М.: Изд-во «Горное дело», ООО «Киммерийский центр», 2018. — 232 с.

7. Гараева А. Н., Хабибуллин И. Р. Оценка трещиноватости массивов оснований инженерных сооружений Альметьевского района Республики Татарстан / Геология в развивающемся мире: Сборник научных трудов по материалам XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Пермь: ПГНИУ, 2022. — С. 289–293.

8. Кузнецов В. А. Обоснование технологии взрывных работ в карьерах и открытых горно-строительных выработках на основе деформационного зондирования взрывае­мых уступов. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. — М., 2010. — 43 с.

9. Белин В. А., Супрун В. И., Агафонов Ю. Г., Кузнецов В. А. Особенности ведения взрывных работ при выемке запасов строительного гипса в водоохранной зоне // Горный журнал. — 2017. — № 3. — С. 37–42. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.07.

10. Kinyua E. M., Jianhua Z., Kasomo R., Mauti D., Mwangangi J. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores // Minerals Engineering. 2022, vol. 186, article 107743. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107743.

11. Leng Z., Fan Y., Gao Q., Hu Y. Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, no. 3, pp. 373–380. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.010.

12. Репин Н. Я. Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. — М.: Недра, 1978. — 256 с.

13. Рубцов В. К. Действие взрыва на массив скальных пород и его фильтрационные свойства / Взрывное дело: Сборник, № 61/18. — М.: Недра, 1966. — С. 27–34.

14. Мальский К. С., Боровков Ю. А. Анализ результатов исследований по снижению прочности горных пород от серийного взрывания скважинных зарядов взрывчатых веществ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2020. — Т. 63(1). — С. 39–45. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-1-39-45.

15. Zhang Z., Hou D., Guo Z., He Z. Laboratory experiment of stemming impact on rock fragmentation by a high explosive // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020, vol. 97, article 103257. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103257.

16. Карев В. И., Климов Д. М., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б. Модель разрушения анизотропных горных пород при сложном нагружении // Физическая мезомеханика. — 2016. — Т. 19. — № 6. — С. 34–40.

17. Baranowski P., Kuciewicz V., Pytlik M., Małachowski J. Shock-induced fracture of dolomite rock in small-scale blast tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022, vol. 14, no. 6, pp. 1823–1835. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.12.022.

18. Zhou T., Zhu J. B., Ju Y., Xie H. P. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression // Engineering Fracture Mechanics. 2019, vol. 205, pp. 190–204. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.030.

19. Berčáková A., Melichar R., Souček K. Mechanical properties and failure patterns of migmatized gneiss with metamorphic foliation under UCS test // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, vol. 53, no. 4, pp. 2007–2013. DOI: 10.1007/s00603-019-02012-2.

20. Berčáková A., Melichar R., Obara Y., Ptáček J., Souček K. Evaluation of anisotropy of fracture toughness in brittle rock, migmatized gneiss // Procedia Engineering. 2017, vol. 191, pp. 900–907. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.260.

21. Ханукаев А. Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. — М.: Недра, 1974. — 222 с.

22. Стромоногов А. В. Обоснование безвзрывной технологии добычи блоков известняка на карбонатных месторождениях Русской платформы. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2017. — 25 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Suprun V. I., Gorbonos M. G., Stromonogov A. V., Levchenko Y. V., Kolotovkin A. C. Perspective technical solutions for stabilizing the quality of crushed stone from carbonate rocks. *Ratsionalnoe osvoenie nedr.* 2021, no. 6(62), pp. 46–59. [In Russ]. DOI: 10.26121/RON.2021.32.90.004.

2. Suprun V. I., Voroshilin K. S., Burtsev S. V., Minibaev R. R. Regulation of the granulometric composition of extracted rocks in the mining of coal and carbonate deposits. *Gornyi Zhurnal.* 2021, no. 7, pp. 61–64. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.07.10.

3. Bigi S., Marchese M., Meda M., Nardon S., Franceschi M. Discrete fracture network of the Latemar carbonate platform. *Italian Journal of Geosciences.* 2015, vol. 134, no. 3, pp. 474–494. DOI: 10.3301/IJG.2014.34.

4. Suprun V. I., Stromonogov A. B. Selection and justification of technological solutions for the extraction of block limestone in carbonate massifs of the Russian platform. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy tekhnicheskoy konferentsii* [Extraction, processing and application of natural stone: Collection of scientific papers of the International Technical Conference], Ekaterinburg, MGTU, 2018, pp. 20–25. [In Russ].

5. Stromonogov A. V., Suprun V. I., Agafonov Yu. G. Technology of block stone mining in complex structured carbonate deposits. *Mining Science and Technology (Russia).* 2016, no. 2, pp. 3–13. [In Russ].

6. Suprun V. I., Artem'ev V. B., Opanasenko P. I., Radchenko P. I., Levchenko S. A. *Kompleksy tsiklichno-potochnoy tekhnologii dlya otrabotki kar'erov* [Complexes of cyclic-flow technology for mining pits], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo», OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2018, 232 p.

7. Garaeva A. N., Khabibullin I. R. Assessment of fracturing of massifs of bases of engineering structures of Almetyevsk district of the Republic of Tatarstan. *Geologiya v razvivayushchemsya mire: Sbornik nauchnykh trudov po materialam XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Geology in the developing world: collection of scientific papers on the materials of the XV International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists], Perm, PGNIU, 2022, pp. 289–293. [In Russ].

8. Kuznetsov V. A. *Obosnovaniye tekhnologii vzryvnykh rabot v kar'erakh i otkrytykh gornostroitel'nykh vyrabotkakh na osnove deformatsionnogo zondirovaniya vzryvaemykh ustupov* [Justification of blasting technology in quarries and open-pit mining and construction excavations based on deformation sensing of blasted benches], Doctor's thesis, Moscow, 2010, 43 p.

9. Belin V. A., Suprun V. I., Agafonov Y. G., Kuznetsov V. A. Features of blasting works at excavation of reserves of building gypsum in a water protection zone. *Gornyi Zhurnal.* 2017, no. 3, pp. 37–42. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.03.07.

10. Kinyua E. M., Jianhua Z., Kasomo R., Mauti D., Mwangangi J. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering.* 2022, vol. 186, article 107743. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107743.

11. Leng Z., Fan Y., Gao Q., Hu Y. Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2020, vol. 30, no. 3, pp. 373–380. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.010.

12. Repin N. Ya. *Podgotovka i ekskavatsiya vskryshnykh porod ugol'nykh razrezov* [Preparation and excavation of overburden rocks of coal mines], Moscow, Nedra, 1978, 256 p.

13. Rubtsov V. K. The effect of blasting on an array of rock and its filtration properties. *Vzryvnoe Delo.* 1966, no. 61/18, pp. 27–34.

14. Malskiy K. S., Borovkov Yu. A. Analysis of the results of investigations aimed at reducing the rock strength in serial explosions of borehole explosive charges. *Proceedings of*

higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 2020, vol. 63, no. 1, pp. 39–45. [In Russ]. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-1-39-45.

15. Zhang Z., Hou D., Guo Z., He Z. Laboratory experiment of stemming impact on rock fragmentation by a high explosive. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020, vol. 97, article 103257. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103257.

16. Karev V. I., Klimov D. M., Kovalenko Yu. F., Ustinov K. B. Model of fracture of anisotropic rocks under complex loading. *Physical mesomechanics*. 2016, vol. 19, no. 6, pp. 34–40. [In Russ].

17. Baranowski P., Kucewicz V., Pytlik M., Małachowski J. Shock-induced fracture of dolomite rock in small-scale blast tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 6, pp. 1823–1835. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.12.022.

18. Zhou T., Zhu J. B., Ju Y., Xie H. P. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019, vol. 205, pp. 190–204. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.030.

19. Berčáková A., Melichar R., Souček K. Mechanical properties and failure patterns of migmatized gneiss with metamorphic foliation under UCS test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, vol. 53, no. 4, pp. 2007–2013. DOI: 10.1007/s00603-019-02012-2.

20. Berčáková A., Melichar R., Obara Y., Ptáček J., Souček K. Evaluation of anisotropy of fracture toughness in brittle rock, migmatized gneiss. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 191, pp. 900–907. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.260.

21. Khanukaev A. N. *Fizicheskie protsessy pri otboyye gornyykh porod vzyryvom* [Physical processes in mining rocks by explosion], Moscow, Nedra, 1974, 222 p.

22. Stromonogov A. V. *Obosnovanie bezvzryvnoy tekhnologii dobychi blokov izvestnyaka na karbonatnykh mestorozhdeniyakh Russkoy platformy* [Justification of blastless technology of limestone block mining in carbonate deposits of the Russian platform], Candidate's thesis, Moscow, 2017, 25 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колотовкин Алексей Сергеевич¹ – аспирант,
e-mail: kolotovkin1904@mail.ru,

Зеленин Дмитрий Петрович – директор АО «Черниговец»,
e-mail: d.p.zelenin@chernigovets.ru,

Левченко Ярослав Викторович¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: levchenko.mggu@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2080-6330,

¹ ГИ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Колотовкин А.С., e-mail: kolotovkin1904@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Kolotovkin¹, Graduate Student,
e-mail: kolotovkin1904@mail.ru,

D.P. Zelenin¹, Director, JSC «Chernigovets»,
e-mail: d.p.zelenin@chernigovets.ru,

Ya.V. Levchenko¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: levchenko.mggu@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2080-6330,

¹ Mining Institute, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.S. Kolotovkin, e-mail: kolotovkin1904@mail.ru.

Получена редакцией 02.03.2023; получена после рецензии 14.06.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 02.03.2023; received after the review 14.06.2023; accepted for printing 10.11.2023.