

ИНЖЕНЕРНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА РАЗМЕРОВ ЗОН РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ МАССИВОВ ВЗРЫВОМ НА КАРЬЕРАХ ЗАБАЙКАЛЬЯ

В. Н. ТЮПИН, проф., д-р техн. наук, tyupinvn@mail.ru
Т. И. РУБАШКИНА, доцент, канд. техн. наук

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования по определению размеров зон действия взрыва в различных горно-геологических и горнотехнических условиях проводили многие отечественные и зарубежные ученые [1–20]. При ведении взрывных работ в трещиноватых массивах горных пород в настоящее время выделено пять характерных зон: раздавливания, радиальных трещин, заколов, взрывных остаточных напряжений, сейсмического действия взрыва [1, 2, 4, 6–8]. В зоне раздавливания порода дробится на мелкие частицы в результате действия сжимающих напряжений. В зоне радиальных трещин отдельности горного массива разделены на несколько частей трещинами, преимущественно параллельными оси заряда взрывчатых веществ (ВВ) за счет возникновения растягивающих и сдвиговых нагрузок. В зоне заколов вследствие упругой реакции отдельностей массива (после падения давления во взрываемых скважинах) происходит смещение массива в сторону образуемой открытой поверхности и раскрытие естественных трещин. В зоне остаточных напряжений под действием взрыва наблюдается закрытие естественных трещин и упругое деформирование естественных отдельностей. Релаксации остаточных напряжений препятствуют силы трения на гранях отдельностей. Зона сейсмического действия появляется в результате высокоскоростного соударения раздробленных и нераздробленных отдельностей в зонах раздавливания, радиальных трещин, заколов, взрывных остаточных напряжений.

Теоретические аспекты исследований

В работе [7] на основе закона сохранения энергии получены математические формулы для определения размеров четырех зон при короткозамедленном взрывании (КЗВ) зарядов ВВ в трещиноватых напряженных горных массивах:

$$R_{РД} = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_v d_3 c K_{1-4}}{8 (\sigma_{сжв} - P) \Phi} \left(1 - \frac{\mu v}{1 - v}\right); \quad (1)$$

$$R_{ТР} = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_v d_3 c v}{8 (\sigma_p + P) \Phi (1 - v)} \left(1 - \frac{\mu v}{1 - v}\right) K_{1-4}; \quad (2)$$

© Тюпин В. Н., Рубашкина Т. И., 2021

Обоснованы и приведены инженерные формулы для расчета радиусов зон раздавливания, радиального трещинообразования, заколов и взрывных остаточных напряжений в карьерах. Выполнен численный анализ расчетных формул и доказана их достоверность путем сравнения с данными промышленных экспериментальных исследований на карьерах Забайкалья.

Ключевые слова: карьер, взрывные работы, трещиноватость массива, размеры зон раздавливания, трещинообразования, заколов, взрывных остаточных напряжений, расчетные формулы, численный анализ.

DOI: 10.17580/gzh.2021.07.06

$$R_{ОЗ} = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_v d_3 c \left(1 - \frac{\mu v}{1 - v}\right) K_{1-4}}{8 \left[2E \frac{\mu v}{1 - v} \frac{\Delta}{d_c} \left(\sum_{i=1}^k \sin^2 \beta_i \right)^{-1} - P(1 - \mu) \right] \Phi}; \quad (3)$$

$$R_{ОСТ} = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_v d_3 c}{8 \mu P \Phi} \left(1 - \frac{\mu v}{1 - v}\right) K_{1-4}; \quad (4)$$

где $R_{РД}$ – радиус зоны раздавливания (мелкодисперсного дробления); $R_{ТР}$ – радиус зоны радиального трещинообразования; $R_{ОЗ}$ – размер зоны заколов; $R_{ОСТ}$ – размер зоны остаточных напряжений; D , ρ_v , d_3 – скорость детонации, плотность заряжения и диаметр заряда ВВ соответственно; c , v , μ – скорость продольной волны, коэффициент поперечной деформации отдельности массива, коэффициент трения между отдельностями соответственно; $\sigma_{сжв}$ – предел прочности породы на всестороннее сжатие; P – величина горного давления; Φ – показатель трещиноватости горного массива; σ_p – предел прочности породы на разрыв; K_{1-4} – показатель, учитывающий действие взрыва перпендикулярно или параллельно одновременно взрывающейся группе зарядов ВВ; K_2 – показатель усиления действия взрыва перпендикулярно или параллельно плоскостям рядов скважин за контуром отбойки 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; E – модуль упругости отдельности; Δ , d_c , k , β_i – величина смещения отдельностей, размер отдельностей, число систем трещин, угол наклона системы трещин к обнажению соответственно.

Расположение основных зон относительно зарядов ВВ приведено на **рис. 1**.

Анализ формул (1)–(4) показывает, что оперативное их применение весьма затруднительно, так как они содержат большое число экспериментально определяемых параметров. Кроме того, возможный разброс физико-механических свойств горных пород может привести к неверным результатам при определении размеров зон.

Однако знания о размерах зон весьма важны в технологических процессах горного производства на карьере. Величина зоны раздавливания определяет объем переизмельчения и потерь рудного компонента. Размеры зоны радиального трещинообразования характеризуют расстояния между скважинами при массовых взрывах. Размер зоны заколов определяет геометрические параметры неустойчивой части обрабатываемого уступа. Радиус зоны остаточных напряжений в горном массиве влияет на устойчивость откосов уступов и бортов карьеров.

Целью статьи является разработка инженерных формул для расчета размеров зон разрушения и деформирования трещиноватого массива при КЗВ зарядов ВВ на карьерах.

Методика исследований

Проведен математический и численный анализ формул (1)–(4) для определения степени влияния того или иного параметра на размеры зон деформирования и разрушения массива. Упрощение теоретических расчетных формул выполнено путем подстановки в выражения (1)–(4) постоянных и средних численных значений параметров, незначительно влияющих на результат. Достоверность полученных инженерных формул доказана путем сравнения результатов численных расчетов по ним с данными практического определения размеров зон в различных по степени трещиноватости массивах горных пород на карьерах Забайкалья.

Численный анализ, инженерные формулы для расчета размеров зон

Средние численные значения и постоянные параметры в формулах (1)–(4): $\pi = 3,14$; $\nu = 0,25$; $\mu = 0,45$; $\left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) = 0,85$;

при глубине карьера 250 м вертикальное горное давление равно $P_B = 6,4 \cdot 10^6$ Па; горизонтальное $P_T = 2,1 \cdot 10^6$ Па; $\sigma_{сжв} \gg P$; $\sigma_p + P \approx 1,25\sigma_p$ [7].

В формуле (3) в знаменателе первый член на два порядка больше второго, кроме того, $E = \rho c^2$; $\Delta d_e^{-1} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ [7];

$$\sum_{i=1}^k \sin^2 \beta_i = 1,25 \text{ [7]; } \rho = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Показатели усиления действия взрыва [7, 15]: $K_1 = 1,74$ (при $n = 3$ – число взаимодействующих зарядов в группе); $K_2 = 1$; $K_3 = 1,9$ (при $l_3 = 8$ м; $d_e = 0,5$ м); $K_4 = 0,5$; $K_{1-4} = 1,65$.

Математический и численный анализ выражений (1)–(4) позволяют получить упрощенные формулы для расчета размеров зон раздавливания, радиальных трещин, заколов и остаточных напряжений в виде

$$R_{PD} = \frac{D\rho_b d_3 c}{3\sigma_{сж}\Phi}; R_{TP} = \frac{D\rho_b d_3 c}{12\sigma_p\Phi}; \quad (5)$$

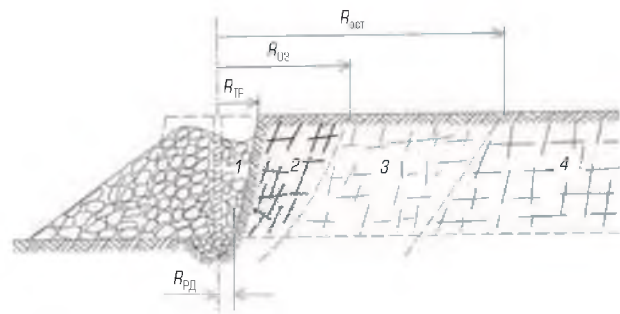


Рис. 1. Зоны деформирования трещиноватого массива взрывом:

1 – зона дробления (мелкодисперсного дробления и радиального трещинообразования); 2, 3, 4 – зоны заколов, взрывных остаточных напряжений, сейсмического действия взрыва соответственно; R_{PD} , R_{TP} , R_{O3} , R_{OST} – радиусы зон раздавливания, радиального трещинообразования, заколов, взрывных остаточных напряжений соответственно

$$R_{O3} = \frac{D\rho_b d_3 c}{5\sigma_{сж}\Phi}; R_{OST} = \frac{D\rho_b d_3 c}{3,24\mu P\Phi}; \quad (6)$$

В результате численных расчетов по формулам (5) и (6) при значениях параметров: $D = 3,6 \cdot 10^3$ м/с; $\rho_b = 0,85 \cdot 10^3$ кг/м³; $d_3 = 0,25$ м; $c = 4 \cdot 10^3$ м/с; $\Phi = 9$; $\sigma_{сж} = 1,5 \cdot 10^8$ Па; $\sigma_p = 10^7$ Па; $P = 6,4 \cdot 10^6$ Па; $\mu = 0,45$ получены размеры зон: $R_{PD} = 0,76$ м; $R_{TP} = 2,83$ м; $R_{O3} = 9,5$ м; $R_{OST} = 36,4$ м. Результаты проведенных численных расчетов согласуются с практическими данными, приведенными в [1, 2, 7–9].

Опыт определения физико-механических свойств горных пород $\sigma_{сж}$ и σ_p указывает иногда на большой разброс этих параметров. Кроме того, коэффициент трения μ можно рассчитать в зависимости от коэффициента крепости f [7]. Согласно [21] $\sigma_{сж} = 15 \cdot 10^6 f$. В соответствии с [7], $c\nu[\sigma_p(1-\nu)]^{-1} = 4 \cdot 10^{-4} f^{-0,5}$; $\mu = 0,125 f^{0,5}$.

Подставляя эти значения в выражения (1), (2), (5), (6), получим более простые формулы для расчета размеров зон действия взрыва:

$$R_{PD} = \frac{D\rho_b d_3 c}{4,5f\Phi} 10^{-7}; R_{TP} = \frac{D\rho_b d_3 c}{f^{0,5}\Phi} 10^{-4}; \quad (7)$$

$$R_{O3} = \frac{1,6D\rho_b d_3 c}{c f^{0,5}\Phi}; R_{OST} = \frac{D\rho_b d_3 c}{0,4 f^{0,5} P\Phi}; \quad (8)$$

Определим численно изменение размеров зон разрушения и деформирования при многорядном КЗВ зарядов ВВ в массивах с различной степенью трещиноватости и физико-механическими свойствами.

Параметры детонации ВВ приведены ранее. Для эмульсионных ВВ скорость детонации рекомендуется определять по формуле [22]: $D = 1,74 Q_T^{0,5}$, где Q_T – теплота взрыва эмульсионного ВВ, Дж/кг.

Физико-технические свойства горных пород, которые определены по керну разведочных скважин, взяты из [7]. Результаты расчета размеров зон действия взрыва по формулам (7) и (8)

Таблица 1. Результаты расчета размеров зон деформирования массива при ведении взрывных работ на карьере «Тулукуй» ПАО «ППГХО»

Горная порода	Категория трещиноватости	Средний размер отдельности d_e , м	Φ	f	$c, 10^3, \text{м/с}$	$P, 10^6, \text{Па}$	$R_{\text{РД}}, \text{м}$	$R_{\text{ТР}}, \text{м}$	$R_{\text{ОЗ}}, \text{м}$	$R_{\text{ОСТ}}, \text{м}$	$a, \text{м}$
Левобрекчии фельзитов	I–II	0,25	9,0	$\frac{4-6}{5}$	2,42	8,5	0,91	3,79	25,0	26,7	10,9
Туфолавы кварцевых порфиров	II	0,30	8,5	$\frac{6-10}{8}$	3,81	9,0	0,95	3,21	13,5	33,6	8,6
Левобрекчии трахидацитов	II	0,40	8,0	$\frac{7-10}{8,5}$	4,02	9,5	1,05	3,28	13,1	34,7	7,7
Фельзиты	II–III	0,55	7,0	$\frac{9-12}{10,5}$	3,65	10,2	0,84	3,37	14,8	29,8	6,9
Песчаники	III	0,75	6,5	$\frac{10-12}{11}$	3,80	11,0	0,90	3,50	15,0	30,2	6,4
Трахидациты	III	0,75	6,5	$\frac{12-16}{14}$	4,35	11,0	0,81	3,14	11,5	30,7	6,0
Плагиоклазовые андезиты	IV–V	1,5	5,5	$\frac{14-16}{15}$	4,32	13,0	0,89	3,59	13,3	29,3	5,6
Граниты	III–IV	1,0	6,0	$\frac{16-20}{18}$	4,54	12,0	0,71	3,00	10,6	28,1	5,2

Примечание. В числителе указаны пределы изменения, в знаменателе – средняя величина.

представлены в табл. 1. Горные породы, приведенные в табл. 1, слагают в основном массив карьера «Тулукуй» ПАО «ППГХО».

Обсуждение результатов

Достоверность приведенных упрощенных формул расчета устанавливают путем сравнения с практическими данными или исследованиями других авторов. Численные расчеты радиуса зоны раздавливания, приведенные в табл. 1, согласуются с исследованиями [9], где эта величина в среднем составляет $(3 \div 5) d_e$, т. е. 0,75–1,25 м. Расстояние между взрывающимися скважинами зависит от радиуса зоны трещинообразования, а также определяется радиусом зоны регулируемого дробления. Формула для определения расстояния между скважинами имеет вид

$$a = \sqrt{2} R_{\text{ТР}} \sqrt{\frac{d_k}{d_e} + d_e}, \tag{9}$$

где d_k – размер кондиционного куска (при расчетах $d_k = 1$ м).

Результаты вычислений по формуле (9) приведены в табл. 1. Сравнительные результаты расчетов по формуле (9) и применяемые на карьерах параметры расположения скважин показаны на рис. 2.

На рис. 2 приведены данные о фактическом расстоянии между скважинами на карьере «Дельмачик» ПАО «ППГХО» и карьере № 2 ЗАО «Новоорловский ГОК» (исследования проводили авторы данной статьи), а также заимствованные из [9] в зависимости от размера отдельности в массиве. Скважины имеют диаметр 250 мм. ВВ – граммонт М-21. Высота уступа 10 м. На карьере «Дельмачик» разрабатывают взрывчатые брикеты и граниты с $f = 13 \div 16$; размер кондиционного куска $d_k = 1$ м. Районирование карьера по трещиноватости дало $d_e = 0,1 \div 1,5$ м. На карьере № 2 ЗАО «Новоорловский ГОК» вмещающие кристаллические сланцы, граниты с $f = 12 \div 18$; $d_k = 0,8$ м, $d_e = 0,5 \div 2$ м.

Анализ рис. 2 показывает, что при $d_e > 0,4$ м расчетные расстояния между скважинами совпадают с практическими. При

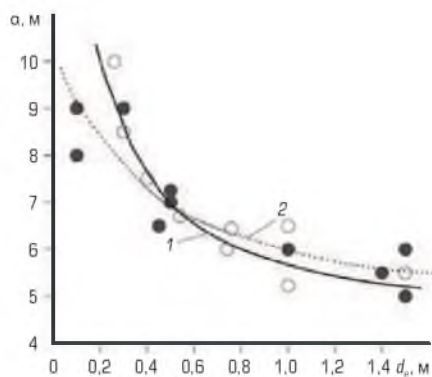


Рис. 2. Зависимость расстояния между скважинами a от размера отдельности d_e :

1 – расчетная по формуле (9); 2 – данные по карьерам «Дельмачик» ПАО «ППГХО» и № 2 ЗАО «Новоорловский ГОК» согласно данным [9]

$d_e < 0,4$ м расчетные расстояния превышают фактические. Это, вероятно, вызвано тем, что при большом расстоянии между скважинами после взрыва могут возникнуть пороги на нижней площадке уступа, а также не всегда можно точно определить категорию трещиноватости в глубине массива. Как правило, выбирают более надежный вариант с меньшим расстоянием между скважинами.

Фактические данные по радиусу зоны заколов заимствованы из [7]. При этом, поскольку при ведении взрывных работ использовали разные диаметры зарядов, в табл. 2 выполнен перерасчет радиуса зоны заколов с диаметров 0,11–0,22 м на диаметр 0,25 м.

Фактические размеры зоны заколов (с учетом пересчета, см. табл. 2) и расчетные (см. табл. 1) приведены на рис. 3.

Анализ рис. 3 указывает на сходимость результатов расчетов радиуса зоны заколов $R_{\text{ОЗ}}$ и практических данных.

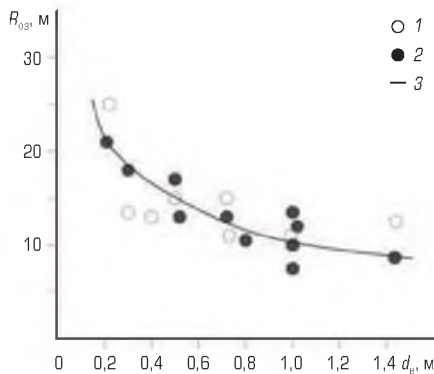


Рис. 3. Зависимость радиуса зоны заколов R_{03} от размера отдельности d_0 :
 1 – расчетные данные; 2 – практические;
 3 – обобщенная кривая

Радиус зоны остаточных напряжений, согласно данным табл. 1, составляет 26,7–34,5 м, в пересчете к диаметру заряда ВВ получаем $R_{ост} = (107 \div 138) d_0$. Это совпадает с исследованиями [1, 2, 7, 8], где размер зоны взрывных остаточных напряжений (сотрясений) в среднем составляет $(50 \div 150) d_0$.

Заключение

При проектировании и ведении взрывных работ на карьерах наличие простых и надежных формул для расчета зон действия взрыва является весьма важным. В представленной статье приведены результаты исследования и сделаны следующие выводы.

1. Приведены и проанализированы (математически и численно) теоретические формулы для расчета размеров зон раздробления, радиальных трещин, заколов, взрывных остаточных напряжений.
2. Путем подстановки в теоретические формулы постоянных и маловлияющих параметров, а также замены некоторых

Таблица 2. Фактические данные по радиусу зоны заколов на карьерах Забайкальского края и ОАО «Ураласбест»

Карьер	Горная порода	Размер отдельности d_0 , м	Диаметр за ВВ	Радиус зоны заколов R_{03} , м	
				фактический	с пересчетом к диаметру заряда ВВ
«Камень 2»	Гранит	0,5–1 (0,75)	0,115	5–7	10,9–15,5 (13)
«Юбилейный»	То же	0,15–0,4 (0,225)	0,115	10	21,7
«Шахматное»	Флюорит	0,15–1 (0,575)	0,11	5–7	11,4–15,9 (13,7)
«Дельмачик»	Гранит	0,5–1,5 (1)	0,25	8–12	8–12 (10)
	Эксплозивная брекчия	1–2 (1,5)	0,25	7–9	7–9 (8)
«Жетково»	Сланцы	0,5–1,5 (1)	0,15	4,5	7,5
Карьеры ОАО «Ураласбест»	Серпентинит	0,5–1 (0,75)	0,22	10	11,4
	Габбро	0,1–1 (0,55)	0,22	14	15,9
	Серпентинит	0,5–1,5 (1,0)	0,22	12	13,6
	Диорит	0,1–0,5 (0,3)	0,22	16	18,2
	Серпентинит	0,5–1,5 (1)	0,22	11	12,5

Примечание. В скобках приведены средние значения параметров.

показателей физико-технических свойств пород получены упрощенные формулы для расчета размеров зон разрушения и деформирования трещиноватого массива.

3. Численные расчеты по инженерным формулам определения размеров зон и сравнение их с данными промышленных экспериментальных исследований на карьерах Забайкалья указывают на достоверность приведенных формул.

4. Дальнейшие исследования необходимо проводить в плане определения напряженно-деформированного состояния горного массива в зоне остаточных напряжений, а также НДС массива в зоне сейсмического действия массовых взрывов на карьерах.

Библиографический список

1. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. – М.: Стройиздат, 1957. – 276 с.
2. Фещенко А. А., Эристов В. С. Контурное взрывание в гидротехническом строительстве. – М.: Энергия, 1972. – 119 с.
3. Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГИ, 1992. – 516 с.
4. Мосинев В. Н., Абрамов А. В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. – М.: Недра, 1982. – 248 с.
5. Адушкин В. В., Сливак А. А. Подземные взрывы. – М.: Наука, 2007. – 578 с.
6. Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н. Метод расчета параметров буровзрывных работ на карьере с целью обеспечения заданного качества дробления горных пород // Горный журнал. 2017. № 8. С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.12
7. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. – Белгород: ИД «Белгород», 2017. – 192 с.
8. Тюпин В. Н., Хаустов В. В., Воронов Е. Т. Влияние зон действия взрыва в трещиноватых массивах на процессы горного производства // Горный журнал. 2020. № 12. С. 26–30. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.05
9. Ракишев Б. Р. Прогнозирование технологических параметров взорванных пород на карьерах. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 239 с.
10. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В. Метод расчета параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы // ГИАБ. 2015. Спец. выпуск 19. Комбинированные процессы переработки минерального сырья: теория и практика. С. 20–29.
11. Аленичев И. А., Рахманов Р. А., Шубин И. Л. Оценка действия взрыва скважинного заряда в ближнем поле с целью оптимизации параметров буровзрывных работ в приконтурной зоне карьера // ГИАБ. 2020. № 4. С. 85–95.
12. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. No. 13. P. 3978–3986.
13. Ghiasi M., Askarnejad N., Dindarloo S. R., Shamsoddini H. Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Iss. 2. P. 183–186.
14. Li-YunYang, Chen-Xi Ding. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 107. P. 150–158.

15. Tyupin V. N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone // *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. P. 11–14. DOI: 10.17580/em.2020.02.03
16. Manchao He, Fuqiang Ren, Dongqiao Liu. Rockburst mechanism research and its control // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28. Iss. 5. P. 829–837.
17. Mohamed F., Riadh B., Abderazzak S., Radouane N., Mohamed S., Ibsa T. Distribution Analysis of Rock Fragments Size Based on the Digital Image Processing and the Kuz-Ram Model Cas of Jebel Medjounes Quarry // *Aspects in Mining & Mineral Science*. 2018. Vol. 2. Iss. 4. P. 325–329.
18. Gui Y. L., Zhao Z. Y., Jayasinghe L. B., Zhou H. Y., Goh A. T. C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 101. P. 63–68.
19. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Kononov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS GEOMIX // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. No. 4. P. 26809–26818.
20. Ignatenko I. M., Яницкий Е. Б., Дунаев В. А., Кабелко С. Г. Трещиноватость породного массива в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // *Горный журнал*. 2019. № 10. С. 11–15. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.01
21. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И., Ильницкая Е. И., Якобашвили О. П., Сафронова И. Б. и др. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород : справ. пособие. – М. : Недра, 1981. – 192 с.
22. Baum Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1975. – 704 с. **ИЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 7, pp. 40–44
DOI: 10.17580/gzh.2021.07.06

Engineering formulas for dimensioning of deformation and damage zones in jointed rock mass under impact of blasting in quarries in Transbaikalia

Information about authors

V. N. Tyupin¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences, tyupinvn@mail.ru

T. I. Rubashkina¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹Belgorod State University, Belgorod, Russia

Abstract

Currently, there are five characteristic zones of blast-induced impact in quarries: crushed zone, radial cracking zone, severely fractured zone, blast-induced residual stress zone, and blast-induced load zone. Knowledge about the size of the zones is very important in the technological processes of mining. The size of the crushed zone governs the amount of ore over-grinding and loss. The size of the radial cracking zone is reflective of the spacing of blastholes. The size of the severe fracturing zone is characteristic of the geometry of an unstable pit wall area. The zone of blast-induced residual stresses in rock mass and its size affects the slope stability of pit wall. The purpose of this study is to develop engineering formulas for calculating the sizes of deformation and damage zones in jointed rock mass during short-delay blasting in quarries. The mathematical and numerical analyses of the complex theoretical expression provided engineering formulas for dimensioning of the blasting-induced impact zones in quarries. The reliability of the formulas is proved by the comparison with the full-scale testing data obtained in quarries in Transbaikalia.

Keywords: quarries, blasting, rock mass jointing, size, crushed zone, cracking zone, severely fractured zone, residual stress zone, calculation formulas, numerical analysis.

References

1. Pokrovskiy G. I., Fedorov M. S. Effects of shock and blast in deformable media. Moscow : Stroyizdat, 1957. 276 p.
2. Feshchenko A. A., Eristov V. S. Perimeter control blasting in waterworks construction. Moscow : Energiya, 1972. 119 p.
3. Kutuzov B. N. Breakage of Rocks : tutorial. 3rd enlarged and revised edition. Moscow : Izdatelstvo MGU, 1992. 516 p.
4. Mosinets V. N., Abramov A. V. Destruction of fissured and disturbed rocks. Moscow : Nedra, 1982. 248 p.
5. Adushkin V. V., Spivak A. A. Underground blasts. Moscow : Nauka, 2007. 578 p.
6. Kutuzov B. N., Tyupin V. N. Drilling and blasting design method to ensure preset fragmentation of rocks in open pit mining. *Gornyy Zhurnal*. 2017. No. 8. pp. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.12
7. Tyupin V. N. Blasting and geomechanical processes in high-stress jointed rock mass. Belgorod : ID “Belgorod”, 2017. 192 p.

8. Tyupin V. N., Khaustov V. V., Voronov E. T. Impact of blast zone on mining processes in fractured rock mass. *Gornyy Zhurnal*. 2020. No. 12. pp. 26–30. DOI: 10.17580/gzh.2020.12.05
9. Rakishev B. R. Prediction of process-dependent parameters in blasted rocks in open pit mines. Alma-Ata : Nauka, 1983. 239 p.
10. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V. The drilling-and-blasting parameters determination method for specified grain-size composition of the blasted rock mass. *GIAB*. 2015. Special issue 19. Combined processes of mineral resources beneficiation: theory and practice. pp. 20–29.
11. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A., Shubin I. L. Assessment of near-field blast effect toward optimized drilling-and-blasting in pit wall rock mass. *GIAB*. 2020. No. 4. pp. 85–95.
12. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K., Shigin A. O., Shigina A. A. Destruction of rock upon blasting of explosive agent. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 12, No. 13. pp. 3978–3986.
13. Ghiasi M., Askarnejad N., Dindarloo S. R., Shamsoddini H. Prediction of blast boulders in open pit mines via multiple regression and artificial neural networks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016. Vol. 26, Iss. 2. pp. 183–186.
14. Li-YunYang, Chen-Xi Ding. Fracture mechanism due to blast-imposed loading under high static stress conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 107. pp. 150–158.
15. Tyupin V. N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone. *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. pp. 11–14. DOI: 10.17580/em.2020.02.03
16. Manchao He, Fuqiang Ren, Dongqiao Liu. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. Vol. 28, Iss. 5. pp. 829–837.
17. Mohamed F., Riadh B., Abderazzak S., Radouane N., Mohamed S., Ibsa T. Distribution Analysis of Rock Fragments Size Based on the Digital Image Processing and the Kuz-Ram Model Cas of Jebel Medjounes Quarry. *Aspects in Mining & Mineral Science*. 2018. Vol. 2, Iss. 4. pp. 325–329.
18. Gui Y. L., Zhao Z. Y., Jayasinghe L. B., Zhou H. Y., Goh A. T. C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 101. pp. 63–68.
19. Poluhin O. N., Petin A. N., Ignatenko I. M., Dunaev V. A., Kononov A. V. Assessment of the size of rocks in benches and lumpiness of the blasted mountain mass on pits with use of GIS GEOMIX. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, No. 4. pp. 26809–26818.
20. Ignatenko I. M., Yanitsky E. B., Dunaev V. A., Kabelko S. G. Jointing of rock mass in open pit at the Zhelezny mine of the Kovdor Mining and Processing Plant. *Gornyy Zhurnal*. 2019. No. 10. pp. 11–15. DOI: 10.17580/gzh.2019.10.01
21. Protodyakonov M. M., Teder R. I., Il'nitskaya E. I., Yakobashvili O. P., Safronova I. B. et al. Distribution and correlation of indicators of physical properties of rocks : reference book. Moscow : Nedra, 1981. 192 p.
22. Baum F. A., Orlenko L. P., Stanyukovich K. P., Chelyshev V. P., Shekhter B. I. Physics of Explosion. 2nd enlarged edition. Moscow : Nauka, 1975. 704 p.

Руководство **АО «АГД ДАЙМОНДС»** выражает искреннюю признательность и благодарность **редакции «Горного журнала» и Издательскому дому «Руда и Металлы»** за оперативную, ответственно и высокопрофессионально выполненную работу по подготовке и выпуску журнала (май, 2021 г.), значительная часть публикаций которого посвящена 90-летию со дня образования нашего предприятия.

Мы высоко ценим опыт сотрудничества и конструктивные взаимоотношения с вашими журналами, на протяжении долгих лет остающимися главными проводниками популяризации горного дела, раскрытия секретов горнорудного мастерства, масштабно и объективно освещающими отраслевые инновации и сохраняющими традиции высококлассной журналистики в деле развития горной промышленности нашей страны.

В преддверии 200-летнего юбилея «Горного журнала» выражаем уверенность в дальнейшем плодотворном сотрудничестве и реализации новых совместных проектов.

Первый заместитель генерального директора
АО «АГД ДАЙМОНДС»

 Г. Ф. Пивень

