

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА ЗАМЕДЛЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА КАРЬЕРАХ

В.Н. Тюпин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Аннотация: Рассмотрено определение предельного интервала замедления, при котором взаимодействие сейсмозрывных волн (СВВ) (кумулятивный эффект) от короткозамедленного взрыва соседних зарядов ВВ будет отсутствовать. На основе анализа технической литературы разработана физическая модель взаимодействия сейсмозрывных волн при короткозамедленном взрывании зарядов ВВ в трещиноватом массиве. При взрыве первого заряда ВВ под действием давления продуктов детонации формируется волна деформаций, которая движется от образующей скважины до внешней границы зоны раздавливания. Далее от внешней границы зоны раздавливания происходит излучение СВВ. Получены формулы для определения предельного интервала замедления ($\tau_{\text{пр}}$) при КЗВ зарядов ВВ на карьерах. Математическим анализом установлено, что с увеличением детонационных характеристик ВВ $\tau_{\text{пр}}$ необходимо увеличивать, с увеличением прочности пород и степени трещиноватости массива — уменьшать. Проведены численные расчеты $\tau_{\text{пр}}$ в зависимости от диаметра зарядов ВВ, предела прочности пород на сжатие, степени трещиноватости горного массива. Получены предельные значения интервала замедления при взрывании массивов с различной категорией трещиноватости в стандартных условиях. Проведено сравнение расчетов $\tau_{\text{пр}}$ с практическими данными, что говорит о правомерности формул. После проведения промышленных испытаний описанные исследования, возможно, позволят внести в правила ведения взрывных работ соответствующие уточнения с целью снижения сейсмического действия массовых взрывов.

Ключевые слова: массовые взрывы, карьеры, короткозамедленное взрывание, сейсмозрывные волны, кумулятивный эффект, предельный интервал замедления, формулы расчета, численные расчеты, правомерность.

Для цитирования: Тюпин В. Н. Обоснование предельного интервала замедления для снижения сейсмического действия массовых взрывов на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12. – С. 67–76. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_67.

Substantiation of ultimate delay time toward reduction in large-scale blasting-induced load in open pit mines

V.N. Tyupin

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia,
e-mail: tyupinvn@mail.ru

Abstract: The article focuses on determination of an ultimate delay time such as the interaction of seismic blast waves (SBW, cumulative effect) of neighbor short-delay blasts is absent. The technical literature review allowed physical model of interaction between SBW in short-delay blasting (SDB) in jointed rock mass. The first blast generates high-pressure detonation products which form a deformation wave which propagates from the blasthole to the outer boundary of the crushing zone. Then, from the outer boundary of the crushing zone, SBW propagates. The formulas of the ultimate delay time τ_{lim} in short-delay blasting in open pit mines are obtained. The mathematical analysis finds out that τ_{lim} should be increased when explosives have high detonation characteristics and decreased when rocks have higher strength and degree of jointing. The values of τ_{lim} are calculated as function of blasthole diameter, ultimate compression strength of rocks and rock jointing. The ultimate delay times are computed for standard blasting patterns in rock mass having different jointing degrees. The comparison of the calculated τ_{lim} with the field data prove appropriateness of the formulas. The studies, after commercial testing, can, supposedly, help amend the effective blasting regulations for the purposes of reducing large-scale blasting-induced load.

Key words: large-scale blasts, open pit mines, short-delay blasting, seismic blast waves, cumulative effect, ultimate delay time, calculation formulas, numerical calculations, appropriateness.

For citation: Tyupin V. N. Substantiation of ultimate delay time toward reduction in large-scale blasting-induced load in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12):67-76. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_67.

Введение

Вопросами снижения сейсмического действия взрыва отечественные [1–8] и зарубежные [9–13] ученые занимаются много лет. В частности, это работы эмпирического характера, где в производственных условиях с использованием сейсмоаппаратуры определяются скорость колебаний массива при изменении интервала замедления между группами взрываемых зарядов ВВ [5, 7, 13–16].

Данными экспериментальными исследованиями установлена закономерность: с увеличением интервала замедления скорость колебаний массива уменьшается.

Теоретические обоснования определения сейсмобезопасного интервала замедления приведено в [5], но в данной работе для его определения необходимо проводить опытный взрыв с соответствующими замерами. В [17] уже дана формула для определения скорости ко-

лебаний от интервала замедления при массовом взрыве. Причем скорость колебаний в [17], кроме того, зависит от радиуса зоны раздавливания, расстояния, детонационных характеристик ВВ, параметров массового взрыва и физико-технических свойств горного массива. Однако используя данные исследования, нельзя определить интервал замедления, при котором сейсмическое действие массового взрыва будет минимальным.

Для установления предельного интервала замедления необходимо опираться на определенную физическую модель формирования сейсмических волн при массовых взрывах. Согласно исследованиям М.А. Садовского [1], в блочной горной породе при взрывании имеется сейсмический очаг, выделяющий определенную энергию, пропорциональную объему очага. Согласно [2], образуемые при взрыве котловая полость и зоны разрушения в конечном

итоге определяют основные параметры сейсмозрывной волны.

Кроме того, известно, что при взрыве скважинного (шпурового) заряда ВВ в трещиноватом массиве образуются зоны раздавливания (мелкодисперсного дробления), радиальных трещин, заколов и остаточных напряжений [18]. Очевидно, что наибольшую нагрузку испытывает ближайшая к заряду зона раздавливания, и именно эта зона излучает сейсмозрывную волну с максимальной амплитудой. Помимо этого установлено, что кроме волн напряжений и сейсмозрывных волн, которые распространяются со скоростью 3,0–6,0 км/с, в трещиноватом массиве распространяются волны деформаций, формирование которых связано с квазистатическим расширением продуктов детонации, а скорость составляет 5–100 м/с.

При этом отрицательным моментом при короткозамедленном взрывании является кумулятивный эффект [2, 6], который представляет собой сложение амплитуд сейсмозрывных волн (СВВ) от соседних короткозамедленно взрывааемых зарядов и означает увеличение скорости колебаний в точке наблюдения.

Целью статьи является определение предельного интервала замедления, при котором взаимодействие СВВ от соседних короткозамедленно взрывааемых зарядов ВВ будет отсутствовать.

Методология

Анализ литературных источников и разработка физического механизма взаимодействия сейсмозрывных волн (кумулятивный эффект) от одновременно взрывааемых зарядов ВВ, обоснование формулы определения предельного интервала замедления, численные расчеты и доказательство правомерности формул.

Физическая модель взаимодействия СВВ

Механизм формирования и взаимодействия СВВ от последовательного взрыва двух зарядов ВВ в трещиноватом горном массиве представляется следующим образом. При взрыве первого заряда ВВ вначале в массиве формируется волна напряжений, которая теряет свою энергию на ближайших естественных трещинах. Затем, под действием давления продуктов детонации, формируется волна деформаций, которая движется со скоростью 100–5 м/с от образующей скважины до внешней границы зоны раздавливания (рис. 1).

Далее от внешней границы зоны раздавливания происходит излучение СВВ со скоростью 3–5 км/с. Если скважины взорвать с замедлением, например, 20 мс (менее предельного), то СВВ от двух скважин пересекутся в точке 4 (рис. 1, а), что приведет к увеличению скорости колебаний. Если замедление

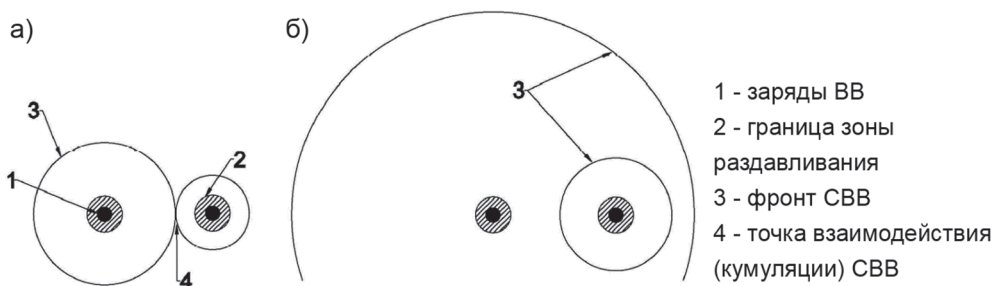


Рис. 1. Схема к обоснованию предельного интервала замедления: при КЗВ с интервалом замедления менее предельного (а); с интервалом более предельного (б)

Fig. 1. Ultimate delay time justification flow chart: delay time less than limit (a); delay time higher than limit (b)

будет, например, 80 мс (более предельного), то в данном случае фронт СВВ от второго взрыва не догонит СВВ от первого взрыва (картина распространения СВВ представлена на рис. 1, б).

Типичные сейсмограммы колебаний массива в точке наблюдения представлены на рис. 2. На рис. 2, а приведена сейсмограмма массового взрыва с интервалом замедления менее предельного [5], в результате чего происходит кумуляция СВВ от взрыва группы заря-

дов ВВ. На рис. 2, б приведена сейсмограмма при взрыве групп зарядов ВВ с интервалом замедления более предельного — кумуляция отсутствует.

Обоснование формулы определения предельного интервала замедления

Для того чтобы не произошло взаимодействия СВВ от короткозамедленного взрыва двух зарядов ВВ, предельный интервал замедления должен иметь вид

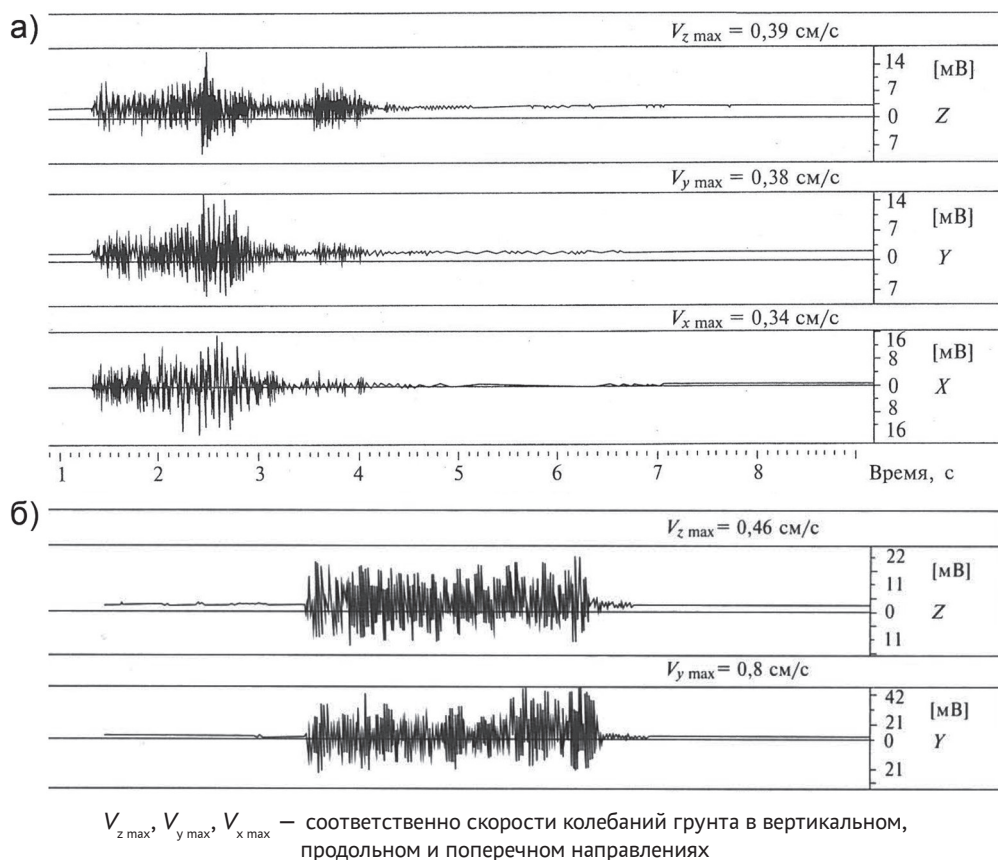


Рис. 2. Сейсмограммы массовых взрывов [5]: с кумулятивным эффектом, наложением СВВ от групп зарядов ВВ (КЗВ с использованием ДШ, замедление 50 мс — менее предельного) (а); без наложения СВВ от соседних групп зарядов (КЗВ с использованием СИИВ, замедление между группами зарядов 67 мс, между зарядами 100 мс — более предельного) (б)

Fig. 2. Seismograms of large-scale blasts [5]: cumulative effect with superposition of SBW from groups of explosive charges (SDB with explosive cord, delay of 50 ms — less than limit) (a); without superposition of SBW from groups of explosive charges (SDB with non-electric initiation, delay between groups of charges 67 ms, delay between charges 100 ms — higher than limit) (b)

$$\tau_{np} \geq T_{d1} + T_{cb} + T_{d2} \quad (1)$$

где T_{d1} , T_{d2} — время распространения волны деформаций от образующей скважины до границы зоны раздавливания для первого и второго зарядов соответственно; T_{cb} — время распространения СВВ от границы зоны раздавливания первого заряда до дальней границы зоны раздавливания второго заряда ВВ.

Математические зависимости для определения временных параметров в (1) имеют следующий вид:

$$T_{d1} = T_{d2} = R_{pd} / \bar{v}_d; \quad T_{cb} = b/c_m \quad (2)$$

где R_{pd} — радиус зоны раздавливания; \bar{v}_d — средняя скорость распространения волны деформаций от образующей заряда ВВ до границы зоны раздавливания; b — расстояние между взрываемыми зарядами ВВ; c_m — скорость продольных волн в горном массиве.

Согласно [18–19], зависимости, определяющие R_{pd} и \bar{v}_d , имеют вид

$$R_{pd} = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D \rho_b d_3 c}{\sigma_{сж} \Phi^{0,5}} \left(1 - \frac{\mu v}{1-v} \right) \quad (3)$$

$$\bar{v}_d = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D \rho_b d_3 c}{R_{pd} \Phi^{0,5} \rho_m c_m} \left(1 - \frac{\mu v}{1-v} \right) \ln \left(\frac{2R_{pd}}{d_3} \right) \quad (4)$$

где D — скорость детонации; ρ_b — плотность заряжания; d_3 — диаметр заряда ВВ; c — скорость продольной волны в породе в районе взрыва; v — коэффициент Пуассона горной породы в районе взрыва; μ — коэффициент трения между отдельностями в массиве в районе взрыва; $\sigma_{сж}$ — предел прочности породы на сжатие; Φ — показатель трещиноватости массива в районе взрыва; ρ_m — плотность горного массива в районе взрыва.

Подставляя (3) и (4) в (2), полученное в (1), после преобразования имеем

$$\tau_{np} \geq \frac{2R_{pd} \rho_m c_m}{\sigma_{сж} \ln \left(\frac{2R_{pd}}{d_3} \right)} + \frac{b}{c_m} \quad (5)$$

Численный анализ (5) при $R_{pd} = 1,25$ м; $d_3 = 0,25$ м; $\rho_m = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_m = 4 \cdot 10^3$ м/с; $\sigma_{сж} = 1,5 \cdot 10^8$ Па; $b = 6$ м дает $\tau_{np} \geq 72,4 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 73,9 \cdot 10^{-3}$ с. Математический анализ зависимостей (1)–(5) показывает, что с увеличением расстояния между последовательно взрываемыми зарядами ВВ интервал замедления необходимо увеличивать, правда незначительно. Диагональные схемы взрывания предпочтительнее, чем порядные, так как расстояние между группами скважин у них меньше. При использовании, например, многоточечного инициирования ВВ в скважинах величина R_{pd} будет увеличиваться, следовательно, необходимо увеличивать и τ_{np} (5). Приведенный анализ требует проведения соответствующих исследований.

При этом второе слагаемое в (5) существенно меньше первого и в последующих расчетах им можно пренебречь.

Формулу (5) можно преобразовать, если в ее правую часть подставить значение R_{pd} из (3) и пренебречь вторым членом.

Тогда

$$\tau_{np} \geq \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{D \rho_b d_3 c \rho_m c_m}{\sigma_{сж} \Phi^{0,5} \ln \left(\frac{2R_{pd}}{d_3} \right)} \left(1 - \frac{\mu v}{1-v} \right) \quad (6)$$

В (6) можно произвести замены: $c_m = c \Phi^{-0,5}$; $\rho_m \approx \rho$; $\rho c^2 = E$ (E — модуль упругости породы). Поскольку R_{pd} в среднем равно $5d_3$, то

$$\ln \left(\frac{2R_{pd}}{d_3} \right) = 2,3; \quad \left(1 - \frac{\mu v}{1-v} \right) = 0,85.$$

Внося в (6) перечисленные обоснования и проведя численные расчеты, получим

$$\tau_{np} \geq 0,164 \frac{D \rho_b d_3 E}{\sigma_{сж}^2 \Phi} \quad (7)$$

В [20] приведена эмпирическая зависимость

$$E = 238(\sigma_{сж} + 44,5 \cdot 10^6). \quad (8)$$

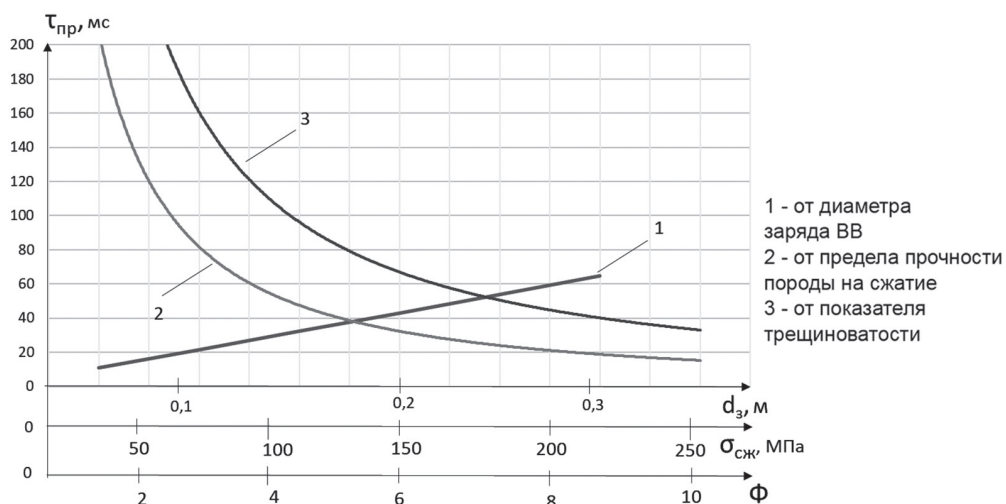


Рис. 3. Зависимости предельного интервала замедления

Fig. 3. Ultimate delay time curves

Подставляя (8) в (7), получим

$$\tau_{пр} \geq \frac{39D\rho_e d_3 (\sigma_{сж} + 44,5 \cdot 10^6)}{\sigma_{сж}^2 \Phi} \quad (9)$$

Анализ зависимостей (6), (7), (9) показывает, что предельный интервал замедления зависит от детонационных и геометрических параметров ВВ, физико-механических свойств пород и параметров трещиноватости во взрываемом горном массиве. С увеличением детонационных характеристик ВВ и диаметра заряда необходимо увеличивать $\tau_{пр}$. С увеличением прочности горных пород и степени трещиноватости массива $\tau_{пр}$ необходимо уменьшить.

Численный анализ зависимостей

Проанализируем численное изменение предельного интервала замедления $\tau_{пр}$ с изменением $\sigma_{сж}$, d_3 , Φ по формуле (9). Постоянные параметры при расчетах: $D = 3,6 \cdot 10^3$ м/с; $\rho_e = 850$ кг/м³; $d_3 = 0,25$ м; $\Phi = 8$; $\sigma_{сж} = 10^8$ Па.

Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Анализ рис. 3 показывает, что с увеличением диаметра заряда ВВ $\tau_{пр}$ увеличивается с 23 до 54 мс. С увеличением $\sigma_{сж}$ с 50 МПа до 250 МПа $\tau_{пр}$ уменьшается с 141 до 18 мс при других постоянных параметрах. При уменьшении показателя трещиноватости Φ с 11 до 3 (уве-

Расчетные значения предельного интервала замедления $\tau_{пр}$ в зависимости от степени трещиноватости массива и прочности горных пород
Estimated values of ultimate delay time τ_{lim} as function of rock mass jointing and strength

Категория трещиноватости	Средний размер отдельности, d_e , м	Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, 108, Па	Показатель трещиноватости, Φ	$\tau_{пр}$, мс
I	<0,1	<0,4	>11	>143
II	0,1–0,5	0,4–0,7	11–7,3	143–95
III	0,5–1,0	0,7–1,2	7,3–4,4	95–77
IV	1,0–1,5	1,2–2,5	4,4–2,7	77–52
V	>1,5	>2,5	<2,7	<52

личение размера отдельности с 0,1 до 1,5 м) $\tau_{\text{пр}}$ увеличивается с 36 до 150 мс.

Промышленными экспериментальными исследованиями установлена закономерность: с увеличением блочности пород, как правило, прочность возрастает. Это численно отражено в работе [21]. В таблице приведены расчетные значения предельного интервала замедления по формуле (9) в зависимости от категории трещиноватости массива и прочности горных пород, заимствованные в [21]. Численные значения детонационных характеристик приведены выше, показатель трещиноватости определен по аналитической формуле $\Phi = 12e^{-de}$ [19].

В таблице приведены расчетные значения $\tau_{\text{пр}}$, при которых не наблюдается кумулятивного эффекта от КЗВ соседних групп зарядов ВВ. Расчеты проведены при взрывании скважин диаметром 250 мм граммонитом 79/21, что использовалось на карьере «Восточный» компании «Полюс» [5].

Анализ таблицы и сейсмограмм в [5] указывает на то, что при КЗВ блоков с использованием замедлителей РПН-3 с интервалом замедления 50 мс в 9 случаях из 12 наблюдается кумулятивный эффект с нарастанием скорости колебаний аналогично рис. 2, а (схема-пояснение — см. рис. 1, а). То есть при использовании средств инициирования с пиротехническими замедлениями небольшие интервалы замедления не обеспечивают защиту от сеймовзрывных волн. Когда же использовали для КЗВ СИНВ (взрывы 13.09.03, 19.09.03 [5]), где замедление между группами 67 мс, а между скважинными зарядами 100 мс, сейсмограммы показывают, что кумулятивный эффект отсутствует (рис. 2, б и схема 1, б). Сравнение практических данных [5] и результатов расчетов (таблица) говорит о правомерности формулы (9).

В настоящее время на горных предприятиях, как правило, имеются сведения о параметрах трещиноватости массивов и физико-технических свойствах пород. Поэтому для определения $\tau_{\text{пр}}$ можно использовать формулы (7) и (9). Скорость детонации при использовании эмульсионных ВВ необходимо определять по формуле, приведенной в [18]. Следует отметить, что при каскадном взрывании на карьерах, что в настоящее время производится повсеместно необходимо учитывать длительность действия от каждого массового взрыва [19], ибо это может создать колоссальный кумулятивный эффект.

Следует отметить, что при взрывании с помощью ДШ и интервалами замедления 50—150 мс, может возникать обрыв ДШ и появление отказов. Однако современные средства и способы КЗВ, приведенные в [22], обеспечивают надежную безотказную детонацию зарядов ВВ.

Приведенные в статье исследования после промышленных испытаний, возможно, позволят внести в правила ведения взрывных работ соответствующие уточнения с целью снижения сейсмического действия массовых взрывов.

Заключение и направления дальнейших исследований

На основе анализа технической литературы разработана физическая модель взаимодействия СВВ при КЗВ зарядов ВВ. Получены формулы для определения предельного интервала замедления $\tau_{\text{пр}}$ при КЗВ зарядов ВВ на карьерах. Установлено, что с увеличением детонационных характеристик ВВ $\tau_{\text{пр}}$ необходимо увеличивать, с увеличением прочности пород и степени трещиноватости массива — уменьшать. Проведены численные расчеты $\tau_{\text{пр}}$ в зависимости от диаметра зарядов ВВ, предела прочности пород на сжатие, степени трещиноватости горного массива.

Получены предельные численные значения интервала замедления при взрывании массивов с различной категорией трещиноватости в стандартных условиях. Проведено сравнение расчетов $\tau_{\text{пр}}$ с практическими данными [5], что говорит о правомерности формул. После проведения промышленных испытаний описанные исследования, возможно, позво-

лят внести в правила ведения взрывных работ соответствующие уточнения с целью снижения сейсмического действия массовых взрывов. Перспективным направлением является изучение взаимодействия сейсмозрывных волн от различных массовых взрывов при каскадном взрывании в карьерах с учетом длительности их сейсмических сигналов [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А. Сейсмика взрывов и сейсмология // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1987. — № 11. — С. 34–42.
2. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007. — 579 с.
3. Мосинец В. Н. Дробление и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 270 с.
4. Кутузов Б. Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности. Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во МГГУ, 2009. — 670 с.
5. Совмен В. К., Кутузов Б. Н., Марьясов А. Л., Эквист Б. В., Токаренко А. В. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. — М.: Изд-во «Горная книга», 2002. — 228 с.
6. Белин В. А., Холодилов А. Н., Господариков А. П. Методические основы прогнозирования сейсмического действия массовых взрывов // Горный журнал. — 2017. — № 2. — С. 66–68.
7. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981. — 192 с.
8. Цибаев С. С., Ренев А. А., Позолотин А. С., Мефодьев С. Н. Оценка влияния динамических сейсмических воздействий на устойчивость подземных горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 101–111. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-101-111.
9. Wang W. H., Leng Z. D., Lu W. B. Effect of free face numbers on blasting vibration in rock blasting // Mining and Metallurgical Engineering. 2018, vol. 38, no. 6, pp. 17–22. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2018.06.004.
10. Chen-Yang Ma, Li Wu, Miao Sun, Qing Yuan Time-frequency analysis of blasting seismic signal based on CEEMDAN // Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition). 2020, vol. 48, no. 3, pp. 76–82. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190179.
11. Zhang S. H., Liu L. S., Zhong Q. L., Qiu J. M., Zhong W. Energy distribution characteristics of blast seismic wave on open pit slope // Journal of Vibration and Shock. 2019, vol. 38, no. 7, pp. 224–232. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.07.032.
12. 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. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.
13. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control // International Journal of Mining Science and Technology. 2018, vol. 28, no. 5, pp. 829–837.
14. Бульбашева И. А. Управление сейсмическим воздействием взрывов на опоры ЛЭП при открытой разработке месторождений. Автореф дис. канд. техн. наук, специальность 25.00.20. — СПб: СПбГУ, 2019. — 19 с.
15. Коршунов Г. И., Бульбашева И. А., Афанасьев П. И. Исследование сейсмического воздействия на линии электропередач при ведении взрывных работ // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 4. — С. 39–43.

16. Зыков В. С., Иванов В. В., Соболев В. В. Исследование влияния массовых промышленных взрывов на устойчивость подземных горных выработок при открыто-подземной разработке угольных месторождений // *Безопасность труда в промышленности*. — 2018. — № 11. — С. 19–23.
17. Тюпин В. Н., Хаустов В. В. Зависимость геомеханического состояния трещиноватого массива от интервала замедления в зоне сейсмического действия массовых взрывов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 2. — С. 45–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54.
18. Тюпин В. Н., Рубашкина Т. И. Инженерные формулы расчета размеров зон разрушения и деформирования трещиноватых массивов взрывом на карьерах Забайкалья // *Горный журнал*. — 2021. — № 7. — С. 40–44. DOI: 10.17580/gzh.2021.07.06.
19. Тюпин В. Н. Длительность воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты при массовых взрывах на карьерах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 4. — С. 124–133. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-4-0-124.
20. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1978. — 390 с.
21. Кутузов Б. Н., Лемеш Н. И., Плужников В. Ф. Классификация горных пород по взрываемости для карьеров // *Горный журнал*. — 1979. — № 3. — С. 41–43.
22. Маслов И. Н., Сивенков В. И., Иляхин С. В., Брагин П. А., Горинов С. А. Промышленные эмульсионные взрывчатые вещества и системы инициирования во взрывном деле. — М.: ВНИИгеосистем, 2018. — 416 с. **ГАЗ**.

REFERENCES

- Sadovsky M. A. Seismics of explosions and seismology. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1987, no. 11, pp. 34–42. [In Russ].
- Adushkin V. V., Spivak A. A. *Podzemnye vzryvy* [Underground explosions], Moscow, Nauka, 2007, 579 p.
- Mosinets V. N. *Droblenie i seysmicheskoe deystvie vzryva v gornykh porodakh* [Crushing and seismic effect of explosion in rocks], Moscow, Nedra, 1976, 270 p.
- Kutuzov B. N. *Bezopasnost' vzryvnykh rabot v gornom dele i promyshlennosti*. Uchebnoe posobie [Safety of blasting operations in mining and industry: a textbook], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», Izd-vo MGGU, 2009, 670 p.
- Sovmen V. K., Kutuzov B. N., Mar'yasov A. L., Ekvist B. V., Tokarenko A. V. *Seysmicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh* [Seismic safety during blasting operations], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2002, 228 p.
- Belin V. A., Kholodilov A. N., Gospodarikov A. P. Methodical bases of forecasting the seismic action of mass explosions. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 2, pp. 66–68. [In Russ].
- Tseytlin Ya. I., Smoliiy N. I. *Seysmicheskije i udarnye vozdushnye volny promyshlennykh vzryvov* [Seismic and shock air waves of industrial explosions], Moscow, Nedra, 1981, 192 p.
- Tsibaev S. S., Renev A. A., Pozolotin A. S., Mefodiev S. N. Assessment of seismic impacts on stability of openings in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Bull.* 2020, no. 2, pp. 101–111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-101-111.
- Wang W. H., Leng Z. D., Lu W. B. Effect of free face numbers on blasting vibration in rock blasting. *Mining and Metallurgical Engineering*. 2018, vol. 38, no. 6, pp. 17–22. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2018.06.004.
- Chen-Yang Ma, Li Wu, Miao Sun, Qing Yuan Time-frequency analysis of blasting seismic signal based on CEEMDAN. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*. 2020, vol. 48, no. 3, pp. 76–82. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190179.
- Zhang S. H., Liu L. S., Zhong Q. L., Qiu J. M., Zhong W. Energy distribution characteristics of blast seismic wave on open pit slope. *Journal of Vibration and Shock*. 2019, vol. 38, no. 7, pp. 224–232. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.07.032.

12. 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. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.

13. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 5, pp. 829–837.

14. Bul'basheva I. A. *Upravlenie seymicheskim vozdeystviem vzryvov na opory LEP pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy* [Managing the seismic impact of explosions at electricity pylon in open mining], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2019, 19 p.

15. Korshunov G. I., Bulbasheva I. A., Afanasyev P. I. Investigation of seismic impact on power lines during blasting operations. *Occupational Safety in Industry*. 2019, no. 4, pp. 39–43. [In Russ].

16. Zykov V. S., Ivanov V. V., Sobolev V. V. Investigation of the influence of mass industrial explosions on the stability of underground mine workings during open-underground mining of coal deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2018, no. 11, pp. 19–23. [In Russ].

17. Tyupin V. N., Khaustov V. V. Geomechanical behavior of jointed rock mass versus delay interval in seismic load zone of large-scale blasts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 45–54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54.

18. Tyupin V. N., Rubashkina T. I. Engineering formulas for calculating the size of fracture zones and deformation of fractured massifs by explosion in the quarries of Transbaikalia. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 7, pp. 40–44. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.07.06.

19. Tyupin V. N. Action time of explosion-produced seismic waves on guarded objects during large-scale blasting at open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 124–133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-4-0-124.

20. Rzhhevskiy V. V., Novik G. Ya. *Osnovy fiziki gornykh porod* [Fundamentals of rock physics], Moscow, Nedra, 1978, 390 p.

21. Kutuzov B. N., Lemesh N. I., Pluzhnikov V. F. Classification of rocks by explosivity for quarries. *Gornyi Zhurnal*. 1979, no. 3, pp. 41–43. [In Russ].

22. Maslov I. N., Sivenkov V. I., Ilyakhin S. V., Bragin P. A., Gorinov S. A. *Promyshlennye emul'sionnye vzryvchatye veshchestva i sistemy initsirovaniya vo vzryvnom dele* [Industrial emulsion explosives and initiation systems in the explosive business], Moscow, VNIIGeosistem, 2018, 416 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тюпин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, e-mail: tyupinvn@mail.ru, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ORCID ID: 0000-0002-3709-0957.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

V.N. Tyupin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: tyupinvn@mail.ru, Belgorod State National Research University, 308015, Belgorod, Russia, ORCID ID: 0000-0002-3709-0957.

Получена редакцией 14.02.2022; получена после рецензии 23.05.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 14.02.2022; received after the review 23.05.2022; accepted for printing 10.11.2022.