

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

---

Научная статья

УДК 534.6

DOI: 10.18101/2304-5728-2020-4-40-50

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЗРЫВАНИИ НАКЛАДНЫХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

© Ковалевский Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский горный университет  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2  
vladimir\_kovalevskiy@mail.ru

© Мысин Алексей Владимирович

кандидат технических наук, ассистент,  
Санкт-Петербургский горный университет  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2  
mysin\_av@pers.spmi.ru

© Дамбаев Жаргал Гомбоевич

доктор технических наук, профессор  
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова  
Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а  
g.dambaev@rambler.ru

© Михайлов Валерий Александрович

кандидат технических наук  
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Взрывное дробление негабаритных блоков всегда создает экологическую напряженность. Работа посвящена оценке действующих ударных воздушных волн (УВВ) при взрыве накладных зарядов взрывчатых веществ (ВВ). Проведены расчеты параметров УВВ при взрыве открытых зарядов ВВ с параметрами, близкими к принятым при производстве вторичного дробления на щебеночных карьерах. Выполнена оценка различных факторов на ударную воздушную волну, формируемую при взрыве зарядов дробления негабаритных блоков. Сравнение значений избыточного давления на фронте со значением допустимого уровня воздействия показывает, что применение короткозамедленного взрывания не всегда обеспечивает безопасность проведения взрыва по фактору ударной воздушной волны. Показано, что минимальное значение соответствует направлению вдоль ряда зарядов против направления распространения детонации и достигается при раздельном приходе ударных волн от каждой группы зарядов.

**Ключевые слова:** взрыв; взрывные работы; накладные заряды; негабаритные блоки; экологическая безопасность; ударная воздушная волна; короткозамедленное взрывание; избыточное давление.

**Для цитирования**

*Ковалевский В. Н., Мысин А. В., Дамбаев Ж. Г., Михайлов В. А. Экологическая безопасность при взрывании накладных зарядов взрывчатых веществ // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2020. № 4. С. 40–50.*

**Введение**

При ведении взрывных работ на карьерах строительных материалов характерным является большой объем работ по вторичному дроблению негабаритных блоков, достигающий на отдельных карьерах 6–7% объема. Высокие значения выхода негабаритных блоков вызван не неправильным ведением взрывных работ, а необходимостью обеспечения требуемого качества дробления и отсутствия переизмельчения пород, т. к. снижение объема негабарита за счет увеличения удельного расхода ВВ неизбежно приводит к увеличению выхода некондиционных фракций и, как следствие, ухудшению экономических показателей [1]. Большой объем негабаритных блоков создает экологическую напряженность при организации разделки негабарита, так как щебеночные карьеры расположены в непосредственной близости от жилых поселков, а взрывные работы по вторичному дроблению проводятся, как правило, накладными зарядами ежедневно.

Следует отметить, что ударные воздушные волны, формируемые взрывами накладных зарядов при определенных условиях, способны приводить не только к повреждению остекления, но и к формированию интенсивных колебаний жилых зданий и сооружений [2]. В таких условиях весьма актуальным становится вопрос о правильности расчета параметров буровзрывных работ при взрывании накладных зарядов.

**1 Постановка задачи**

Расчет радиуса опасной зоны по действию ударной воздушной волны на застекление в соответствии с методикой, изложенной в пункте 852 ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах»<sup>1</sup>, производится по формуле:

$$r = 65\sqrt{Q_3}, \quad \text{при } 2 < Q_3 < 1000 \text{ кг} \quad (1)$$

где  $Q_3$  — эквивалентная масса при взрывании наружных зарядов, определяемая по формуле:

$$Q_3 = K_n Q, \quad (2)$$

где  $Q$  — суммарная масса одновременно взрывааемых зарядов;  $K_n$  — коэффициент, значение которого зависит от отношения высоты забойки к высоте заряда  $h_{заб}/h_{зар}$ .

---

<sup>1</sup> ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах»: приказ Ростехнадзора № 605 от 16.12.13. 228 с.

Таблица 1

$h_{заб}/h_{зар}$	0	1	2	3	4
$K_n$	1	0.5	0.3	0.1	0.03

При короткозамедленном взрывании в ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах»<sup>1</sup> предлагается использовать поправку, учитывающую величину интервала замедления и определяемую в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Интервал замедления, мс	$\geq 50$	30÷50	20÷30	10÷20
$Q_{КЗВ}/Q_{МГН}$	1.0	0.83	0.67	0.5

Такой подход к расчету радиусов опасных зон не учитывает взаимодействие УВВ как при взрыве отдельных зарядов ВВ, так и взаимодействие УВВ от взрыва отдельных групп замедления. Кроме того, не учитывается возможность усиления УВВ по отдельным направлениям, хотя экспериментальные данные свидетельствуют об асимметрии УВВ вокруг взрывааемых зарядов [3]. Вторым неблагоприятным фактором, не учтенным в расчете может явиться фокусировка УВВ.

## 2 Материалы и методы

Для оценки влияния различных факторов на интенсивность ударной воздушной волны были проведены расчеты параметров УВВ при взрыве открытых зарядов ВВ с параметрами, близкими к принятым при производстве вторичного дробления на щебеночных карьерах. За основу были приняты параметры БВР по вторичному дроблению негабаритных блоков на щебеночном карьере Кузнечное (Ленинградской области): масса заряда в группе — 42, 84, 126 и 168 кг.

Радиусы опасных зон, рассчитанные в соответствии с ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах», приведены в таблице 3.

<sup>1</sup> ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах»: приказ Ростехнадзора № 605 от 16.12.13. 228 с.

Таблица 3

Радиусы опасных зон

Масса заряда, кг	$K_n$	$Q_3$	Безопасное расстояние при мгновенном взрывании или $t_{зам} > 50$ мс, м	Безопасное расстояние при короткозамедленном взрывании ( $10 < t_{зам} < 20$ мс), м	Безопасное расстояние при короткозамедленном взрывании ( $20 < t_{зам} < 30$ мс), м	Безопасное расстояние при короткозамедленном взрывании ( $30 < t_{зам} < 50$ мс), м
42	1	42,0	421	842	632	505
84	1	84,0	596	1191	894	715
126	1	126,0	730	1459	1094	876
168	1	168,0	842	1685	1264	1011

Расчет радиусов опасных зон в табл. 3 произведен для наружных зарядов без засыпки грунтом при благоприятных метеорологических условиях (положительная температура воздуха) при взрывании пород до VIII группы по СНиП.

Хотя разработанная методика расчета параметров УВВ и комплект программ [4] позволяют рассчитать параметры избыточного давления на фронте ударной воздушной волны при произвольном расположении зарядов на местности, при расчете были приняты следующие допущения:

- заряды в пределах одной группы замедления считались сосредоточенными в одной точке и инициировались одновременно;
- группы замедления располагались по одной линии, причем заряды инициировались последовательно с заданным интервалом замедления;
- разброс в срабатывании детонаторов не учитывался;
- расчеты производились для благоприятных метеорологических условий, рельеф местности принимался ровным горизонтальным.

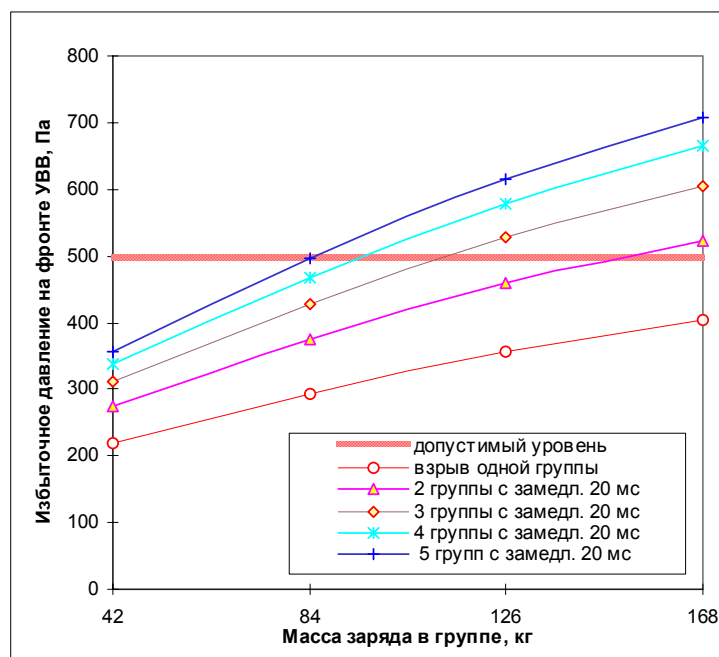


Рис. 1. Влияние массы заряда в группе и числа групп замедления на избыточное давление на фронте УВВ на расстоянии 800 м от места взрыва

Используя методику расчета параметров УВВ при производстве промышленных взрывов [3], оценим влияние различных факторов на ударную воздушную волну, формируемую при взрыве зарядов дробления негабаритных блоков. В качестве исходных данных для расчета возьмем стандартные параметры зарядов дробления негабаритных блоков, принятые на карьере «Гранит-Кузнечное» Ленинградской области.

Рассмотрим влияние массы заряда в группе замедления на избыточное давление на фронте ударной воздушной волны. На рис. 1 приведены значения избыточного давления на фронте УВВ при изменении массы заряда в группе от 42 до 168 кг, где видно, что с увеличением массы заряда избыточное давление на фронте возрастает, однако даже при массе заряда 168 кг на расстоянии 800 м не превышает допустимого уровня (500 Па). На этом же рисунке приведены зависимости избыточного давления на фронте при короткозамедленном взрывании при изменении числа зарядов в группе от 2 до 5 с интервалом замедления 20 мс.

Сравнение значений избыточного давления на фронте со значением допустимого уровня воздействия показывает, что применение короткозамедленного взрывания не всегда обеспечивает безопасность проведения взрыва по фактору ударной воздушной волны. Так при взрывании более чем четырех групп замедления увеличение массы заряда в группе свыше 84 кг приводит к превышению допустимого уровня воздействия. При взрывании двух групп замедления увеличение массы заряда в группе также приводит к превышению допустимого уровня воздействия.

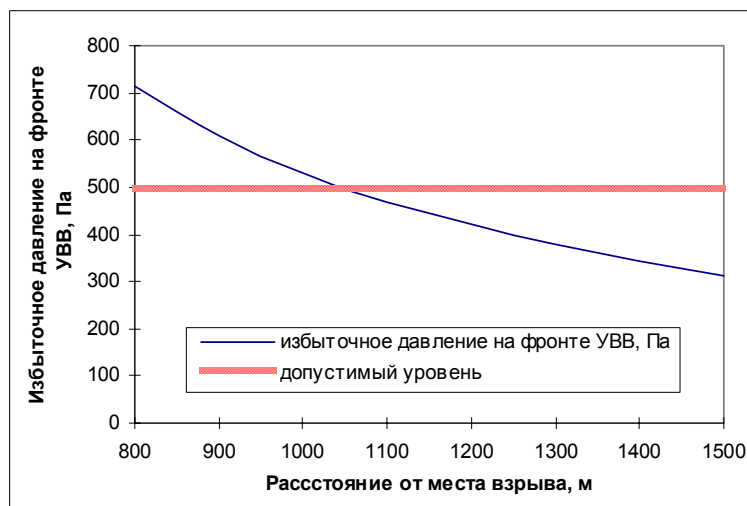


Рис. 2. Влияние расстояния от места взрыва на интенсивность избыточного давления на фронте УВВ при взрывании 5 групп зарядов по 168 кг с замедлением 20 мс

Кроме массы заряда в группе на величину избыточного давления влияет расстояние от места проведения взрыва до охраняемого объекта.

На рис. 2 приведены зависимости избыточного давления на фронте УВВ, сформированной взрывом 5 групп зарядов по 168 кг с замедлением 20 мс в диапазоне расстояний 800–1200 м. Сравнение расчетной кривой с допустимым значением избыточного давления на фронте УВВ (50 Па) показывает, что на расстояниях менее 1050 м избыточное давление превышает допустимый уровень и может приводить к повреждению остекления.

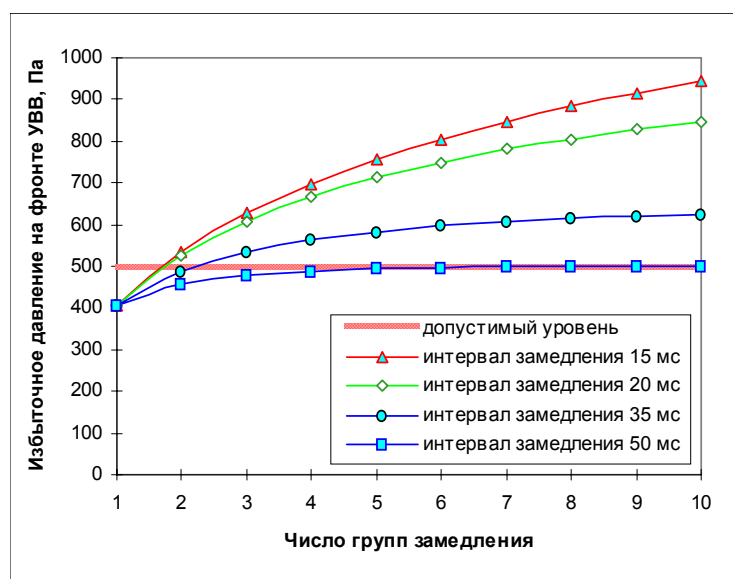


Рис. 3. Влияние числа групп замедления и интервала замедления на величину избыточного давления на фронте УВВ (масса заряда в группе — 168 кг, расстояние от места взрыва — 800 м).

Кроме рассмотренных параметров на интенсивность ударной воздушной волны оказывает влияние также величина интервала замедления между группами зарядов. На рис. 3 приведены графики зависимости избыточного давления на фронте УВВ при взрыве накладных зарядов на расстоянии 800 м от места взрыва. Кривые соответствуют взрыванию с интервалами замедления 15, 20, 35 и 50 мс. Число групп замедления изменяется от 1 до 10, масса заряда в группе составляет 168 кг. Как видно из приведенных на рис. 3 результатов расчетов, увеличение интервала замедления приводит к снижению избыточного давления на фронте УВВ при любом числе групп замедления. При малых значениях интервала замедления (15–20 мс) с увеличением числа групп замедления избыточное давление на фронте УВВ монотонно возрастает. Для интервала замедления 35 мс возрастание наблюдается до 7–8 групп замедления, при дальнейшем увеличении групп замедления избыточное давление не увеличивается. При интервале замедления 50 мс возрастание избыточного давления с ростом числа групп замедления прекращается, начиная с 3–4-й групп замедления.

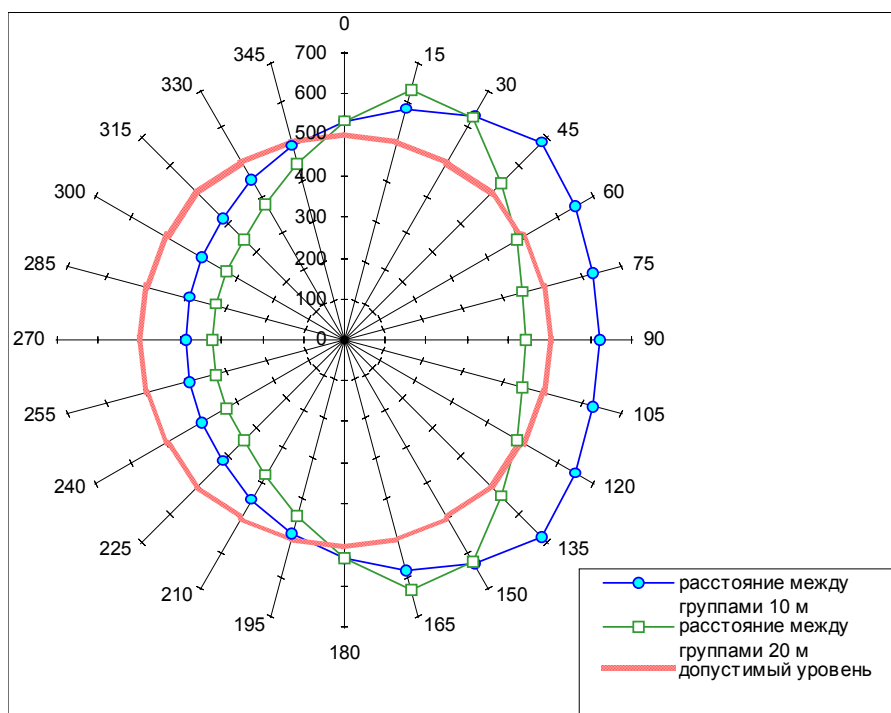


Рис. 4. Влияние расстояния между группами на диаграмму направленности действия системы накладных зарядов дробления негабаритных блоков на удалении 1000 м от места взрыва и интервале замедления между группами 20 мс

Для оценки направленности воздействия ударной воздушной волны по различным направлениям вокруг были рассчитаны параметры УВВ при двух взрывах зарядов дробления негабарита с равной массой заряда ВВ в группе (168 кг) и различных расстояниях между группами зарядов — 10, 20 и 50 м. Из результатов расчетов, приведенных на рис. 4, видно, что с увеличением расстояний между зарядами в группе асимметрия действия системы накладных зарядов увеличивается. При этом в направлении, перпендикулярном линии расположения групп зарядов, наблюдается увеличение интенсивности воздействия, а в направлении вдоль линии расположения групп интенсивность избыточного давления на фронте УВВ снижается. Расчеты показывают, что как возрастание интенсивности суммарного воздействия, так и уменьшение ограничены некоторой величиной. Оценим значения этих величин.

Введем коэффициент асимметрии действия УВВ как

$$K_{асим}(r) = \frac{\Delta P_{+max}(r)}{\Delta P_{+min}(r)}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_{+min}(r)$ ,  $\Delta P_{+max}(r)$  — минимальное значение избыточного давления на фронте на расстоянии  $r$  от источника.

Для расстояний между зарядами 10 и 20 м величина  $K_{асим}$  составит соответственно 1.76 и 1.94.



Минимальное значение соответствует направлению вдоль ряда зарядов против направления распространения детонации и достигается при раздельном приходе ударных волн от каждой группы зарядов, максимально возможное значение суммарной волны — в направлении, перпендикулярном линии взрывааемых зарядов, и соответствует одновременному приходу ударных волн от взрыва всех групп. Взаимодействие двух слабых УВВ треугольного профиля согласно М. А. Цикулину [5] можно определить как

$$\Delta P_+ = \Delta P_{+(i-1)} \sqrt{1 + \left( \frac{\Delta P_{+i} \tau_i}{\Delta P_{+(i-1)} \tau_{(i-1)}} \right)}. \quad (4)$$

При сложении  $n$  ударных воздушных волн равной интенсивности, подошедших одновременно, максимальное значение избыточного давления на фронте УВВ составит

$$\Delta P_+ = \Delta P_{+(i-1)} \sqrt{n}, \quad (5)$$

где  $n$  — число групп замедлений.

Максимально возможное значение коэффициента асимметрии таким образом составит

$$K_{асим}^{max}(r) = \frac{\Delta P_{+n}(r)}{\Delta P_{+i}(r)} = \sqrt{n}. \quad (6)$$

### Заключение

Таким образом, хотя расчеты произведены для идеализированных условий ведения взрывных работ по дроблению негабаритных блоков, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- При короткозамедленном взрывании накладных зарядов необходимо учитывать не только массу заряда в группе и интервал замедления (внося поправку на интервал замедления, как это предусмотрено ФНиП «Правила безопасности при взрывных работах»), но и число групп замедления. Чем меньше интервал замедления, тем больше возрастание избыточного давления на фронте УВВ с увеличением числа групп замедления.
- За счет взаимодействия зарядов в группе результирующее избыточное давление на фронте УВВ может превысить безопасный уровень, даже если расчет по ФНиП в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах» и гарантирует безопасность воздействия.
- Чем меньше интервал замедления, тем больше взаимодействие между волнами, сформировавшимися от взрыва отдельных групп зарядов. При интервале замедления между группами зарядов 50 мс и более, начиная с 3–4-й групп зарядов, с увеличением числа групп усиления избыточного давления на фронте УВВ не происходит (при расстоянии между группами зарядов — 10 м).
- Диаграмма направленности УВВ асимметрична. Максимальное воздействие наблюдается в направлении, перпендикулярном линии расположения групп зарядов с некоторым сдвигом в сторону направления

детонации от группы зарядов к следующей группе. С увеличением расстояния между группами зарядов асимметрия действия зарядов увеличивается [6]. Расчеты показывают, что с увеличением интервала замедления значение коэффициента асимметрии снижается. Максимально возможное значение коэффициента асимметрии не превышает  $n$  — число групп замедления.

#### Литература

1. Макарьев В. П., Васильев О. Г. Оптимальное дробление горной массы на щебеночных карьерах // Зап. ЛГИ. Т. 125. Разрушение горных пород. СПб., 1991. С. 62–65.
2. Егоров М. Г., Михайлов В. А., Носков В. А. Воздействие ударной воздушной волны на сооружение при взрыве // Горное дело в Арктике: тез. докл. III Междунар. симпозиума. СПб., 1994. С. 68.
3. Аюрзанайн Б. А. Исследование и разработка методов определения безопасных расстояний по действию УВВ при производстве массовых взрывов на карьерах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1979. 23 с.
4. Егоров М. Г. Расчет параметров ударной воздушной волны при короткозамедленном взрывании // Проблемы теории проектирования карьеров. СПб.: Изд-во СПГГИ, 1995. С. 96–103.
5. Цикулин М. А. О догоне одного треугольного профиля другим в асимптотике ударных волн // Журнал прикладной механики и технической физики. 1960. № 2. С. 12–16.
6. Small scale models of complex geometry for blast overpressure assessment / P. D. Smith [et al.] // International Journal of Impact Engineering. 1992. Vol. 12, N. 3. P. 345–360.

#### ENVIRONMENTAL SAFETY DURING EXPLOSION OF PRESSURE CHARGES

*Vladimir N. Kovalevskiy*  
Cand. Sci. (Engineering), A/Prof.,  
Saint Petersburg Mining University  
2, 21<sup>st</sup> Line V.O., St. Petersburg 199178, Russia  
vladimir\_kovalevskiy@mail.ru

*Aleksey V. Mysin*  
Cand. Sci. (Engineering), A/Prof.,  
Saint Petersburg Mining University  
2, 21<sup>st</sup> Line V.O., St. Petersburg 199178, Russia  
mysin\_av@pers.spmi.ru

*Zhargal G. Dambaev*  
Dr. Sci. (Engineering), Prof.,  
Dorzhi Banzarov Buryat State University  
24a Smolina St., Ulan-Ude 670000, Russia  
g.dambaev@rambler.ru

*Valeriy A. Mikhailov*  
Cand. Sci. (Engineering)  
St. Petersburg 199178, Russia

*Abstract.* Explosive crushing of over-sized blocks always creates environmental stress. The article presents the assessment of the air-blast during the explosion of pressure charges. We have calculated the air-blast parameters during the explosion of open charges with the parameters close to the used in slap-dab at ballast quarries, and assessed the impact of various factors on the air-blast formed during the crushing of over-sized blocks.

Comparison of the value of overpressure at the shock front with the value of permissible exposure level shows that the use of short-delayed blasting does not always ensure the safety of the explosion in terms of the air-blast. It is established that the minimum value corresponds to the direction along the row of charges against propagation axis of detonation and is achieved with separate airblast arrival from each group of charges.

*Keywords:* explosion; blasting work; pressure charges; over-sized blocks; environmental safety; air-blast; short-delayed blasting; overpressure.

#### *References*

1. Makaryev V. P., Vasilyev O. G. Optimalnoe droblenie gornoj massy na shchebenochnykh karerakh [Optimal Crushing of Rock Mass in Ballast Quarries]. *Zapiski LGI*. Vol. 125. 1991. Pp. 62–65.
2. Egorov M. G., Mikhailov V. A., Noskov V. A. Vozdeistvie udarnoi vozdukhnoy volny na sooruzhenie pri vzryve [Impact of an Air-Blast on a Construction during an Explosion]. *Gornoe delo v Arktike — Mining in the Arctic*. Proc. III International Symposium. St. Petersburg, 1994. P. 68.
3. Ayurzanain B. A. *Issledovanie i razrabotka metodov opredeleniya bezopasnykh rassoyaniy po deistviyu udarnaya vozdukhnoy volna pri proizvodstve massovykh vzryvov na karerakh: avtoreferat dissertatsii na soiskanie stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Research and Development of Methods for Determining Safe Distances during Massive Explosions in Open Pits. Abstract of Cand. Engineering Diss.]. Leningrad, 1979. 23 p.
4. Egorov M. G. Raschet parametrov udarnoi vozdukhnoy volny pri korotkozamedlennom vzryvanii [Calculation of the Parameters of a Shock Wave during Short-Delayed Blasting]. *Problemy teorii proektirovaniya karyerov*. St. Petersburg: Saint Petersburg Mining University Publ., 1995. Pp. 96–103.
5. Tsikulin M. A. O dogone odnogo treugolnogo profilya drugim v asimptotike udarnykh voln [On Slewing of One Triangular Profile by Another in the Asymptotics of Shock Waves]. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki*. 1960. No. 2. Pp. 12–16.
6. Smith P. D., Mays G. C., Rose T. A., Teo K. G., and B. J. Roberts. Small Scale Models of Complex Geometry for Blast Overpressure Assessment. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 12, no. 3. 1992. Pp. 345–360.

Статья поступила в редакцию 25.11.2020; одобрена после рецензирования 07.12.2020; принята к публикации 11.12.2020.