

УДК 625.4:622.235.63

В. Д. ПЕТРЕНКО – д.т.н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, petrenko.diit@gmail.com
Е. М. ШАТАЙКИН – начальник тоннельного отряда № 14 ПАО «КИЕВМЕТРОСТРОЙ», shat.g@ukr.net

А. М. ШТАНДАРИН – главный инженер тоннельного отряда № 14 ПАО «КИЕВМЕТРОСТРОЙ», anat.st.70@ukr.net

А. Л. ТЮТКИН – д.т.н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, alexeytutkin@gmail.com

В. П. КУПРИЙ – к.т.н., доцент, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, kupriy@i.ua

ПАРАМЕТРЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВЗРЫВОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ЛЕВОГО ПЕРЕГОННОГО ТОННЕЛЯ МЕТРОПОЛИТЕНА В Г. ДНЕПРЕ

Постановка проблемы

Отработка параметров буровзрывных работ при проходке специалистами ТО-14 ПАО «Киевметрострой» перегонного тоннеля Днепропетровского метрополитена выполнялась с целью выявления наиболее эффективного режима его организации и проведения в сложных инженерно-геологических условиях.

После ознакомления с геолого-структурными и гидрогеологическими данными предстоящей проходки, физико-механическими характеристиками горных пород, имеющимся на участке буровым оборудованием, ассортиментом взрывчатых веществ и средств инициирования были проанализированы наиболее существенные факторы, влияющие на качество выполнения взрывных работ. В результате чего было принято совместное решение специалистов ТО-14 ПАО «Киевметрострой» и учеными Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (кафедра «Мосты и тоннели») о поэтапной отработке при трех обязательных опытных взрывах наиболее эффективных схем размещения и взрывания шпуровых зарядов в забое выработки. При производстве всех трёх опытных взрывов Центром по проблемам взрывных работ Днепропет-

ровского национального горного университета были выполнены замеры интенсивности сейсмического воздействия на жилые здания в районе строительства перегонного тоннеля, проходимого на глубине 20...25 м, и находящиеся на расстоянии 35...55 м от места проведения взрывов.

В современных условиях при проведении выработок диаметром 5,5...6,5 м в крепких и крепчайших породах проблемным является вопрос выбора рационального количества интервалов замедления и групп зарядов, взрываемых комбинированно короткозамедленно и замедленно, с применением неэлектрического способа взрывания для получения высокого уровня интенсификации дробления пород, чёткого контура выработки кругового сечения с минимальным перебором пород и снижения сейсмического действия на здания и сооружения, находящиеся вблизи проходимой выработки.

Таким образом, задача выбора эффективной технологии ведения буровзрывных работ при подземном строительстве перегонного тоннеля в крепчайших и обводненных горных породах является актуальной.

Цель работы

Целью научно-практической работы является обоснование рациональных пара-

метров и выбор эффективной технологии ведения буровзрывных работ путем проведения опытных взрывов для строительства перегонных тоннелей в обводненных гранитах на глубине 20...25 м.

Сравнительный анализ современных технологий ведения буровзрывных работ

В связи с непрерывным научно-техническим развитием подземного строительства и горных разработок в области технологий ведения буровзрывных работ происходят существенные изменения, обусловленные усложнением горно-геологических и гидрогеологических условий, увеличением размеров поперечного сечения и длины тоннельных и других выработок, созданием новых взрывчатых веществ и средств их инициирования.

Важное значение имеет опыт строительства с применением буровзрывного способа Бескидского железнодорожного двухпутного тоннеля в Карпатах в Украине сечением $115,4 \text{ м}^2$ и длиной 1760 м [1]. При этом было применено комбинированное короткозамедленное и замедленное взрывание шпуровых зарядов в песчаниках, алевролитах и аргиллитах с коэффициентом крепости по Протодяконову 4...8 баллов. При общей массе зарядов при проходке каллоты и штроссы, на которые было поделено поперечное сечение тоннеля, взрываемых с применением неэлектрического способа системы «Нонэль», были получены положительные результаты по дроблению пород, образованию чёткого контура тоннеля и снижению сейсмического действия при взрыве зарядов как по каллоте, так и по штроссе.

Известен также передовой опыт отработки параметров буровзрывных работ при проходке железнодорожного тоннеля № 2 Юкспорском руднике ОАО «Апатит» на Кольском полуострове РФ [2].

При этом взрывание зарядов в шпурах глубиной 3,5 и 4,5 м в апатитах и фосфори-

тах с коэффициентом крепости по Протодяконову 6...8 балла привело к снижению коэффициента использования шпура (КИШ) до 0,698...0,852. Это было обусловлено тем, что была применена нерациональная система инициирования зарядов, при которой центральные врубовые шпуры взрывались с замедлением 25 мс, а вспомогательные врубовые – 250 мс.

Важную роль сыграл опыт проходки наклонного ствола «Восточный» в крепчайших силикат-магнетитовых кварцитах тоннельным отрядом № 7 ПАО «Киевметрострой» на Криворожском Ингулецком ГОКе, где было применено комбинированное короткозамедленное и замедленное взрывание зарядов эмульсионного ВВ «Анемикс» с использованием неэлектрической системы их инициирования. При этом были получены положительные результаты по качеству дробления и оконтуриванию выработок и безопасности при проведении взрывов.

В июне и июле 2017 г. были проведены три опытных взрыва на проходке левого перегонного тоннеля от ствола № 11 Днепропетровского метрополитена в направлении к центру (стволу № 14). При этом проходится горизонтальная выработка круглого сечения со следующими параметрами: площадь поперечного сечения $28,26 \text{ м}^2$, диаметр 6,0 м. Породы, в которых проходится перегонный тоннель, представлены гранитами трещиноватыми, обводненными, плагиогранитами, гранитами микроклиновыми, гнейсами плотностью от $2,59 \text{ г/см}^3$ до $2,79 \text{ г/см}^3$ с коэффициентами крепости по Протодяконову $f = 10...14$. Уровень обводненности пород достаточно высокий и составляет $6 \text{ м}^3/\text{час}$.

Проведение выработки осуществляется с помощью буровзрывных работ. Схема расположения шпуров в забое представлена на рис. 1.

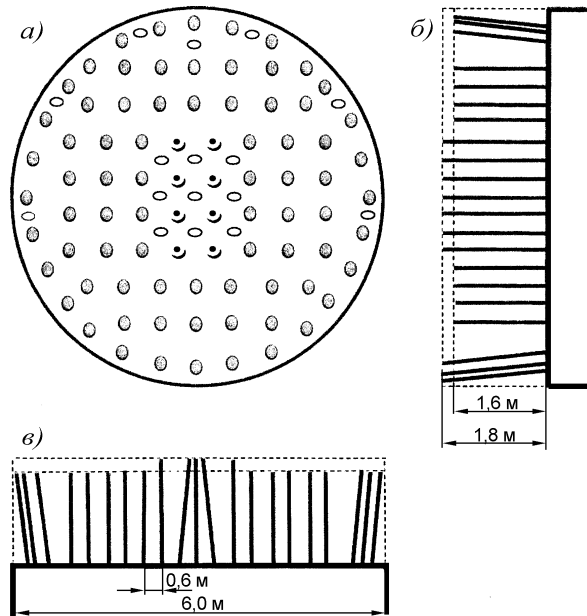


Рис. 1. Схема расположения шпуров в забое:
а) – вид на забой; б) – вертикальный разрез;
в) – горизонтальный разрез

Для проходки выработки были приняты следующие параметры шпуров: диаметр 42 мм, количество шпуров 84 шт. Из них в центральной части располагаются девять компенсационных шпуров глубиной 1,8 м, которые не заряжаются и служат для создания дополнительных поверхностей при взрыве восьми врубовых зарядов глубиной 1,8 м, пробуренных на расстоянии 0,6 м друг от друга по забою под углом 85° к вертикали. Кроме того, по контуру выработки пробуриваются шесть компенсационных незаряжаемых шпуров в верхней половине забоя, располагаемые через три заряжаемых шпура. Далее располагаются 9 вспомогательных и 42 отбойных шпуров глубиной 1,6 м перпендикулярно плоскости забоя. По контуру поперечного сечения тоннеля в верхней и боковой частях было пробурено 19 оконтуривающих шпуров глубиной 1,8 м и в нижней части 9 глубиной 1,8 м под углом 85°.

В настоящее время получили широкое распространение экологически чистые и безопасные эмульсионные ВВ (ЭВВ). Это стало значительным достижением в разработке промышленных ВВ за последние 30

лет, что существенно изменило концепцию организации и проведения взрывных работ на горных предприятиях и в транспортном строительстве тоннелей и метрополитенов. Кроме того, было простимулировано развитие новых видов сырья и материалов, оборудования и зарядной техники.

В состав эмульсионных не входят исходные материалы, классифицируемые как ВВ, они приобретают взрывчатые свойства лишь в конечной стадии приготовления. ЭВВ практически не чувствительны к случайному инициированию от трения, механическим воздействиям или огню и являются более безопасными в производстве, чем другие промышленные ВВ. Кроме того, они не содержат в своем составе высокотоксичные вещества.

ЭВВ состоят из концентрированного (80-90 %) водного раствора окислителя (например, аммиачной селитры) в горючем компоненте (например, индустриальное масло), стабилизированного специально подобранными поверхностно-активными веществами – эмульгаторами.

В результате в Украине были разработаны эмульсионные ВВ типа Гремикс, Эра, Анемикс для подземных работ, которые по своим взрывчатым характеристикам являются высокоэффективной заменой применявшегося ранее ВВ типа Аммонит № 6 ЖВ, содержанием в своем составе 19-21 % тротила, являющегося сильнейшим канцерогенным веществом.

Данные ВВ имеют высокий уровень детонационных характеристик и безопасности при их применении [3–5]. Так их плотность достигает 1100...1300 кг/м³, а скорость детонации 4000...5800 м/с, что позволяет эффективно разрушать крепкие скальные породы в забоях подземных выработок.

При производстве взрывных работ было применено патронированное эмульсионное взрывчатое вещество типа «Анемикс-П32/250» в количестве 64,75 кг и система

инициирования зарядов «Нонэль» производства ПХЗ «Прима-эра» (г. Павлоград).

Технические характеристики патронированных ЭВВ «Анемикс» следующие:

- плотность в патроне – 1,03...1,2 г/см³;
- диаметр патрона – от 25±1 до 40±2 мм и более;
- масса ЭВВ в патроне диаметром:
 - 25 м – 200±10 г,
 - 32 м – 200±10 г и 400±20 г;
- передача детонации на расстоянии между двумя патронами для диаметров от 25 до 50 мм включительно – 2 см;
- кислородный баланс – 1,5 ÷ +0,5 %;
- теплота взрыва – 2990 кДж/кг;
- объём газов – 890 л/кг;
- температура взрыва – 2098°C;
- тротилловый эквивалент по теплоте взрыва – 0,72;
- скорость детонации – 5,5 км/с;

– чувствительность к удару в соответствии с рекомендациями ООН – не более 50 Дж;

– чувствительность к трению в соответствии с рекомендациями ООН – 360 Н;

– критический диаметр детонации – 15...20 мм;

– водостойкость в непроточной воде (потеря аммиачной селитры с открытой поверхности ЭВВ за 24 часа) – 0,05 кг/м²;

– токсичность состава – умеренно опасен (3 класс);

– чувствительность к капсюль-детонатору № 8 – чувствительный.

Наименование и очередность взрывания шпуровых зарядов при производстве опытного взрыва в левом перегонном тоннеле представлены в табл. 1.

Схема очередности взрывания групп шпуровых зарядов представлена на рис. 2.

Конструкции зарядов в шпурах приведены на рис. 3.

Таблица 1

Наименование и очередность взрывания шпуровых зарядов

№ группы шпуров	Наименование шпуров	Интервал замедления, мс	Количество шпуров, шт.	Глубина шпуров, м	№ шпура в группе	Величина заряда, кг	
						в шпуре	в группе
I	Врубовые	20	2	1,8	3,7	1,0	2,0
II	Врубовые	40	2	1,8	2,6	1,0	2,0
III	Врубовые	60	2	1,8	5,1	1,0	2,0
IV	Вспомогательные	100	2	1,6	8,4	1,0	2,0
V	Вспомогательные	200	7	1,6	12-18	0,75	5,25
VI	Отбойные	300	12	1,6	9-11, 19-22	0,75	5,25
VII	Отбойные	500	12	1,6	24-29, 33-38	0,75	9,0
VIII	Отбойные	700	12	1,6	42-47, 50-55	0,75	9,0
IX	Отбойные	1000	10	1,6	23, 30, 31, 32, 39, 40, 41, 48, 49, 56	0,75	7,5
X	Оконтуривающие	3000	9	1,6	58, 60, 62, 64, 76, 78, 80, 82, 84	0,75	6,75
XI	Оконтуривающие	5000	10	1,6	57, 59, 61, 63, 65, 75, 77, 79, 81, 83	0,5	5,0
XII	Оконтуривающие	7000	9	1,8	66-74	1,0	9,0
	Всего:		84			64,75	

Взрывание зарядов производилось методом последовательного оконтуривания с обязательным применением короткозамедленного и замедленного подрыва групп шпуровых зарядов в такой последовательности:

- врубовые;
- вспомогательные;
- отбойные;
- контурные.

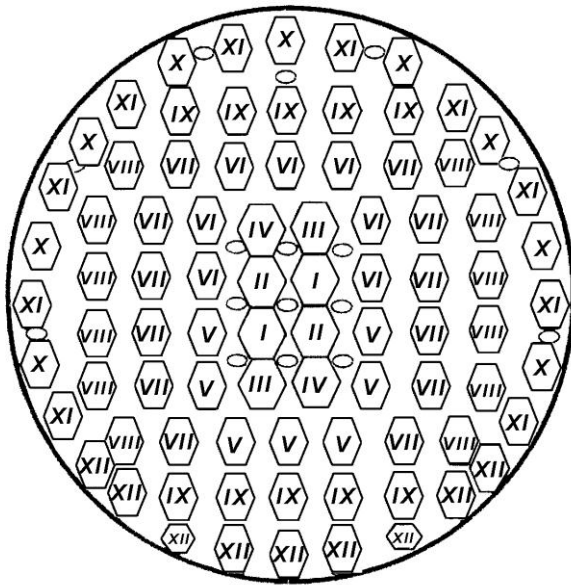


Рис. 2. Очередность взрывания групп шпуровых зарядов

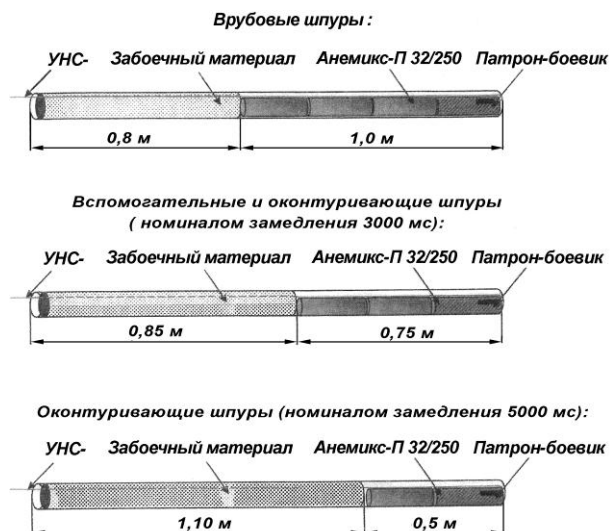


Рис. 3. Конструкции зарядов в шпурах

При этом врубовые были поделены на три группы из двух зарядов каждая, которые взрывались короткозамедленно с интервалами 20, 40, 60 миллисекунд (мс).

За ними подрывались два вспомогательных заряда с интервалом 100 мс. Потом через 200 мс взрывались семь вспомогательных зарядов, после которых с интервалом 300 мс подрывалась первая группа отбойных шпуровых зарядов – 12 шт., вслед за ними через 500 мс и 700 мс две группы отбойных 12 зарядов в каждой. После этого подрывались группа отбойных из 10 зарядов через 1000 мс и три группы контурных соответственно из 9, 10 и 9 зарядов, взрывааемых через 3000 мс, 5000 мс и 7000 мс.

Патрон-боевик в каждом заряде состоит из одного патрона эмульсионного ВВ типа «Анемикс-П32/250» с подсоединенным к нему волноводом типа УНС-ШК-20-4 и располагается первым у дна шпура.

Монтаж и коммутация взрывной сети производится следующим образом: концы волноводов УНС-ШК-20-4, выступающие из устьев шпуров, после завершения процесса зарядки, собираются в пучки (не более 15 штук), стягиваются пластиковыми хомутами обвязываются узлом ДШ. После обвязывания всех образовавшихся пучков УНС с ДШ оба конца ДШ сводятся к месту соединения с электродетонаторами. На каждый шпур применяется 84 шт. волновода, а на взрыв – ДШ длиной 25 м и два электродетонатора.

Определим теоретическое значение критической скорости колебаний для жилых зданий на поверхности при проведении опытных взрывов в перегонном тоннеле в соответствии с [6], в которой приведены основные параметры сейсмических волн в зависимости от массы заряда ВВ и расстояния от центра взрыва до точки наблюдения.

При взрыве ВВ в массиве скальных пород (граниты, песчаники и др.) максимальная скорость продольной волны при приведенном расстоянии $\bar{R} = R / \sqrt[3]{Q} \leq 10$ определяется по формуле

$$V_{max} = 5 \left(\sqrt[3]{\frac{Q}{R}} \right)^{1,8},$$

где Q – масса заряда, кг; R – расстояние от центра взрыва до охраняемого объекта, м.

На расстоянии $\bar{R} = R / \sqrt[3]{Q} > 10 \dots 20$ максимальная скорость колебаний определяется по формуле

$$V_{max} = 2,5 \left(\sqrt[3]{\frac{Q}{R}} \right)^{1,5}.$$

Определим приведенное расстояние при суммарной массе заряда на цикл 64,75 кг и минимальном расстоянии от центра взрыва до охраняемого объекта

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = \frac{30}{\sqrt[3]{64,75}} = 7,47 < 10.$$

Следовательно,

$$V_{max} = 5 \left(\sqrt[3]{\frac{Q}{R}} \right)^{1,8} = 5 \left(\sqrt[3]{\frac{64,75}{30}} \right)^{1,8} = 0,134 \text{ см/с}.$$

При расстоянии от центра взрыва до охраняемого объекта в 53 м

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} = \frac{53}{\sqrt[3]{64,75}} = 13,199 > 10.$$

Тогда,

$$V_{max} = 2,5 \left(\sqrt[3]{\frac{Q}{R}} \right)^{1,5} = 2,5 \left(\sqrt[3]{\frac{64,75}{53}} \right)^{1,5} = 0,052 \text{ см/с}.$$

При оценке сейсмического действия подземных взрывов важно также установить интенсивность динамического поля напряжений в основании поверхностных сооружений, которое вызывается возникновением динамических колебаний, обусловленных продольными и поперечными волнами, скорость которых определяется по следующим формулам [7]

$$V_P = \sqrt{\frac{Eg(1-\nu)}{\gamma(1+\nu)(1-2\nu)}}, \text{ м/с};$$

$$V_S = \sqrt{\frac{Eg}{2g(1+\nu)}}, \text{ м/с},$$

где g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; E – модуль деформации пород, МПа; γ – удельный вес пород, МН/м³; ν – коэффициент Пуассона.

Определим скорости продольной и поперечной волн для крепких пород типа гранитов, приняв $E = 40000 \text{ МПа}$, $\nu = 0,2$, $\gamma = 0,027 \text{ МН/м}^3$.

Тогда,

$$V_P = \sqrt{\frac{40000 \cdot 9,81(1-0,2)}{0,027(1+0,2)(1-2 \cdot 0,2)}} = 4016,4 \text{ м/с};$$

$$V_S = \sqrt{\frac{40000 \cdot 9,81}{2 \cdot 0,027(1+0,2)}} = 2459,5 \text{ м/с},$$

Параметры динамического поля напряжений определяются на основе расчета экстремальных значений нормальных и касательных напряжений по следующим формулам [7]

$$\sigma_{max/min} = \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma V_P T_0 K_h,$$

$$\tau_{max/min} = \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma V_S T_0 K_h,$$

где A – условное сейсмическое ускорение частиц породы в долях g ; коэффициент A принимает значения 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов.

Для условий подземного строительства при сейсмичности менее 7 баллов значение A примем равным 0,1; K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения массива и инженерных объектов, $K_1 = 0,25$; T_0 – преобладающий период собственных колебаний породного массива в основании

сооружений, определяемый по данным сейсмических исследований, а при их отсутствии принимаемый равным 0,5 с; K_h – коэффициент, учитывающий глубину заложения сооружений, $K_h = 1 - 0,005H$, при $H \leq 100$ м $K_h = 1$.

По данным формулам определяются максимальные динамические напряжения в массиве в системе координат X, Y (ось X совпадает с направлением распространения волн), действующие также и на основание зданий и сооружений.

Тогда $\sigma_{xp} = \sigma_{max}$; $\sigma_{yp} = \lambda \sigma_{max}$,
 $\lambda = \nu / (1 - \nu)$, $\tau_{xys} = \tau_{max}$.

Подставив в вышеприведенные формулы значения величин для крепких пород типа гранитов, в результате получим

$$\sigma_{xp} = \frac{1}{2\pi} \cdot 0,1 \cdot 0,027 \cdot 4057 \cdot 1 = 1,745 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{yp} = \frac{0,2}{1 - 0,2} \cdot 1,745 = 0,437 \text{ МПа};$$

$$\tau_{xys} = \frac{1}{2\pi} \cdot 0,1 \cdot 0,027 \cdot 2484,5 \cdot 1,0 = 1,069 \text{ МПа}.$$

На основании анализа результатов расчетов можно сделать вывод, что динамические напряжения в массиве и на поверхности при взрыве имеют значения, которые существенно меньше пределов прочности кирпичной кладки при сжатии и изгибе.

Выводы

Таким образом, теоретические значения критической скорости для принятых условий взрывания существенно меньше регламентированных табличных значений для классов зданий и инженерных сооружений [6, 7].

Измерения уровня сейсмических колебаний при проведении трех опытных взрывов, выполненные «Центром по проблемам взрывных работ Национального горного университета», показали, что зарегистрированные колебания грунта на расстояниях от

30 до 53 м имеют величины скоростей продольной волны от 0,9 до 0,11 см/с. Они не превышают допустимые значения в II балла по Международной шкале MSK-64 и являются безопасными, т.е. существенно меньше критических значений для кирпичных зданий без антисейсмических усилений, расположенных вблизи ствола № 11.

Кроме того, установлено, что при всех трех опытных взрывах колебания имели высокочастотный характер – 50 Гц.

Такие колебания не совпадают с собственными колебаниями зданий и сооружений и не вызывают резонансного явления, приводящего к их повреждению.

В соответствии с ДСТУ 4704:2008 [8] зарегистрированные колебания не представляли угрозы зданиям, которые после взрывов находились в удовлетворительном состоянии, согласно данным, приведенным в работах [9, 10].

Снижению уровня колебаний способствовало то, что было применено комбинированное короткозамедленное и замедленное взрывание зарядов, соответствующее по «Шкале интенсивности сейсмических колебаний при взрывах» [11] 1...4 баллам со скоростью колебаний от 0,1 до 1,5 см/с.

Таким образом, применение новых технологий ведения взрывных работ при проходке перегонных тоннелей с использованием новых ВВ, средств инициирования и комбинированного короткозамедленного и замедленного взрывания позволило получить снижение уровня сейсмических колебаний зданий и сооружений при строительстве линий метрополитена мелкого заложения в сложных инженерно- и гидрогеологических условиях.

Бibliографический список

1. Petrenko, V. D. Features of drilling-and-blasting at construction of Beskidskiy Tunnel. / V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, S. T. Proskurnia // Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – № 5 (65), 2016. – pp. 178-185.

2. Фокин, В. А. Обработка параметров буровзрывных работ при проходке железнодорожного тоннеля [Текст] / В. А. Фокин // Метро и тоннели. – 2013. – № 6. С. 14-18.
3. Кириченко, А. Л. Исследование детонационных характеристик шпуровых зарядов патронированных ЭВМ / А. Л. Кириченко, Е. Б. Устименко, Л. Н. Шиман, В. В. Политов // Науковий вісник НГУ. – 2012. – Вип. 6 (132). – С. 37-41 (Міжнародна наукометрична база даних Sciverse Scopus).
4. Alexey Kirichenko. Substantiation of effective parameters of drilling and blasting operation in coal mines using emulsion explosives / British Journal of Science, Education and Culture, 2014. – No. 2. (6) (July-Desember). – Vol. 1. London University Press. London, 2014. – 410 p. – pp. 11-21. Proceedings of the Journal are located in the Data bases Scopus.
5. Kirichenko, A. L. The industrial emulsion explosives of the mark ERA / L. N. Shyman, A. L. Kirichenko, V. V. Sobolev, A. Z. Prokydin // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели : [сб. научн. тр.] / Днепропетровск : Акцент ПП, 2013. – С. 229-238.
6. Безопасность взрывных работ в промышленности [Текст] // под общей ред. Б. Н. Кутузова. – Москва: Недра, 1992. – 544 с.
7. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений [Текст] / Н. С. Булычев. – Москва: Недра, 1989. – 270 с.
8. ДСТУ 4704:2008 Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки. – Київ : Держстандарт України, 2009. – 11 с.
9. ДСТУ 7116:2009 Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмічної стійкості будинків і споруд. – Київ : Держстандарт України, 2010. – 6 с.
10. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – Київ : Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлового комунального господарства України, 2014. – 110 с.
11. Кутузов, Б. Н. Разрушение горных пород взрывом [Текст] / Б. Н. Кутузов. – Москва : Изд-во МГИ, 1992. – 516 с.

Ключові слова: технологія, параметри буровибухових робіт, короткоуповільнений вибух, уповільнений вибух, сейсмічна безпека.

Ключевые слова: технология, параметры буровзрывных работ, короткозамедленное взрывание, замедленное взрывание, сейсмическая безопасность

Keywords: technology, parameters of drilling and blasting operation, shot and delay blasting, delay blasting, seismic safety.

Рецензенты:
проф., д.т.н., Соболев В. В.
проф., д.т.н., Жуков С. А.

Поступила в редколлегию 14.11.2017.
Принята к печати 21.11.2017.