

УДК 662.217

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАЛИВНЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВАЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ «ПЛАСТИНА–СВИДЕТЕЛЬ»**П. А. Брагин, С. А. Горинов, И. Ю. Маслов**

ЗАО «Спецхимпром», г. Москва

ул. Профсоюзная, 3, г. Москва, 117036, Россия. E-mail: pavelbragin83@mail.ru, ilmaslov@mail.ru

Показана принципиальная возможность экспериментального нахождения показателя политропы продуктов взрыва методом «пластина–свидетель». Знание коэффициента политропы, плотности заряжания и скорости детонации эмульсионных взрывчатых веществ позволяет осуществить оценку их работоспособности в полигонных условиях простым, экономичным и доступным методом.

Ключевые слова: метод определения работоспособности взрывчатых веществ, детонационные параметры, коэффициент политропы, физико-механические свойства материала «пластина–свидетель».

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ НАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН МЕТОДОМ «ПЛАСТИНА–СВІДОК»**П. О. Брагин, С. О. Горинов, И. Ю. Маслов**

ЗАО «Спецхимпром», м. Москва

вул. Профсоюзная, 3, м. Москва, 117036, Росія. E-mail: pavelbragin83@mail.ru, ilmaslov@mail.ru

Показана принципова можливість експериментального надходження показника політропи продуктів вибуху методом «пластина–свідок». Знання коефіцієнта політропи, щільності заряджання та швидкості детонації емульсійних вибухових речовин дозволяє здійснити оцінку їх працездатності у полігонних умовах простим, економічним і досяжним методом.

Ключові слова: метод визначення працездатності вибухових речовин, детонаційні параметри, коефіцієнт політропи, фізико-механічні властивості матеріалу «пластина–свідок».

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В связи с генеральным планом развития минерально-сырьевой базы в России началось широкомасштабное освоение богатых месторождений твердых полезных ископаемых в труднодоступных и малообжитых районах Полярного Урала, Восточной Сибири и Дальнего Востока. Организация добычи сырья и неизбежного строительства зданий, сооружений, дорог, аэродромов, портов и т.д. потребует увеличенного потребления промышленных взрывчатых веществ. Это, несомненно, коснется и эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ). При этом последние будут производиться, как на модульных заводах непосредственно на местах их потребления, так и будут доставляться на место потребления полуфабрикат ЭВВ (матричная эмульсия) в спецконтейнерах [1]. Значительная удаленность осваиваемых месторождений полезных ископаемых от обжитых районов страны и отсутствие хорошей транспортной инфраструктуры неизбежно приведет:

– к трудностям и длительности (во времени заезда) поставок сырья или полуфабрикатов (матричной эмульсии) к местам потребления;

– неминуемым сложностям с навыками и квалификацией производителей и потребителей ЭВВ.

Поэтому в удаленных районах необходим повышенный контроль за качеством данных ВВ. Для осуществления этого, помимо традиционных методов лабораторной оценки ЭВВ, необходимы инструментальные и доступные, как по стоимости, так и по квалификации, методы экспресс-оценки разрушительной силы ЭВВ.

Несмотря на длительный период применения ВВ экспериментальная оценка их разрушительных свойств остается во многом проблематичной. Реше-

ние данного вопроса осложнено как отсутствием единого понимания процесса разрушения, так и постоянно изменяющимися видами и модификациями взрывчатых веществ, применяемых в промышленности. Это стало особенно ощутимо в связи с широким распространением при массовой отбойке скальных и полускальных горных пород взрывчатых веществ с большим критическим и предельным диаметрами. Экспериментальная оценка разрушительных свойств таких ВВ вышла за рамки традиционных лабораторий и переместилась на полигоны (или) непосредственно на производство (опытно-промышленные взрывы) [2–13].

Применение экспериментального метода по измерению или оценке энергии Гарнея (метод «тест-цилиндра» [8, 10, 11]) возможно только в условиях полигона, обслуживаемого высококвалифицированными специалистами. При этом полигон должен быть оснащен или дорогостоящими приборами (аппарат импульсной рентгеноъемки [10]), или уникальной измерительной аппаратурой (измерительный блок, снабженный игольчатыми контактами [11]), или сам по себе быть уникальным (подземная изолированная выработка, оснащенная аппаратурой по измерению скорости детонации и газовому анализу ядовитых продуктов взрыва [8]).

Организация полигона, способного осуществлять оценку или определение энергии Гарнея, целесообразно организовывать в научных центрах по совершенствованию промышленных ВВ, но никак не для экспресс-контроля за качеством ЭВВ.

Применение метода воронкообразования при тест-взрыве в горной породе [3] или в песчаной ванне [4–6] в случае с наливными ЭВВ имеют следующие сложности:

– диаметр 76 мм для тест-заряда массой 3,63 кг или размеры сосредоточенного заряда 4,5 кг [3] могут быть недостаточными для реализации в них детонации с полным разложением ЭВВ;

– наличие даже двух полностью идентичных участка горных пород является всегда проблемным вопросов даже в пределах одного полигона;

– предлагаемое возбуждение в тест-зарядах ЭВВ пересжатой детонации [6] должно быть инструментально фиксируемым или по скорости детонационного процесса, или по замеру количества ядовитых газов;

– размеры песчаных ванн для проведения тест-взрывов должны быть достаточно велики во избежание влияния плотных грунтов дна и бортов ванны на характер выброса песка при взрыве.

Применение подводных взрыв-тестов [14]: требует очень большого водоема и специальной измерительной аппаратуры; не обеспечивает необходимую степень расширения взрывных газов [11] (при взрыве в горных породах наблюдается 10–20-кратное увеличение объемов взрывных газов до окончания процесса их эффективного разрушения среды [10], а при взрыве в воде приборами фиксируется практически 1000-кратное увеличение).

Определенный интерес для экспресс-тестов представляет методика ВостНИИ по обжатию стандартного свинцового крешера Гесса через массивную наковальню и воздушный промежуток, показавшая свою работоспособность в ряде экспериментов [12, 13]. Однако ограничение массы ВВ при тест-взрыве величиной 1 кг делает данную методику малоприменимой при оценке работоспособности ЭВВ с критическим диаметром более 60 мм.

Цель работы – создание теоретических предпосылок оценки работоспособных наливных эмульсионных взрывчатых веществ методом «пластина-свидетель».

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Представляет интерес создание полноценной методики оценки работоспособности наливных ЭВВ методом «пластина-свидетель». В основе данного метода лежит фиксация разрушений в толстой металлической пластине (для мягкой стали – 12–18 мм) при торцевом воздействии на нее вплотную примыкающего цилиндрического заряда испытываемого ВВ. Длина заряда обычно составляет 6–10 калибров. Иницирование начинается от противоположного (по отношению к примыкающему к пластине) конца заряда. В настоящее время сравнение разрушительного действия ВВ осуществляется на основании визуального осмотра пластин-свидетелей и замера диаметра пробойного отверстия линейкой (или штангенциркулем).

Некоторые исследователи дополнительно измеряют скорость детонации в заряде ВВ. В настоящее время ряд исследователей сходится во мнении, что данный метод лишь частично характеризует бризантность ВВ [8], т.к. время пробоя «пластина-свидетель» на несколько порядков меньше времени разрушительного воздействия на окружающую среду.

Однако для разработки метода экспресс-оценки (а не детализация совокупности всех параметров системы «среда-ВВ») работоспособности ВВ, где важно оперативно и доступно оценить искомый параметр, можно предложить определенный алгоритм обработки экспериментальных данных, позволяющий это осуществить с достаточной для контроля за качеством ЭВВ точностью.

Рассмотрим следующую задачу.

На горизонтальной песчаной подушке глубиной H расположена квадратная пластина размером $l \times h$ (l – длина стороны; h – толщина).

Глубина H подбирается экспериментально, чтобы избежать дополнительной деформации пластины. Полагаем, что l в 30–40 раз больше h и $l \gg R_o$ (определение R_o см. ниже).

Пластина представлена материалом, который разрушается при пластическом деформировании (металл – мягкие стали, бронза, медь и т.п.) и характеризуется следующими параметрами:

ρ_m – начальная плотность материала; σ_* – временное сопротивление; A, B, n – параметры ударной

адиабаты материала ($P = P_o + A \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^n - B$, где

P, P_o – текущее и начальное давление в материале; ρ – плотность среды при давлении P). Считаем данные параметры заданными.

На пластине вертикально расположен цилиндрический «безоболочечный» заряд ВВ (оболочка имеет малую массу и прочность, например: картон), характеризующийся следующими параметрами: L, R_o – длина и радиус заряда, соответственно; ρ_* – начальная плотность ВВ; k, D – коэффициент политропы продуктов взрыва и скорость детонации, соответственно; β – массовая доля твердого материала в продуктах взрыва; W – массовая скорость продуктов взрыва за фронтом детонационной волны ($W = D/(k + 1)$).

Из описывающих ВВ параметров считаем неизвестным только коэффициент k .

Если удастся из экспериментальных данных определить величину k , то на основании термодинамических критериев эффективности [10, 15] можно оценить работоспособность рассматриваемого ВВ.

Определим коэффициент политропы продуктов взрыва, если, кроме упомянутых выше параметров, будет известен эффективный радиус пробойного отверстия R_{\oplus} .

Под эффективным радиусом пробойного отверстия будем понимать величину

$$R_{\oplus} = \sqrt{\frac{V_o - V_k}{\pi h}}, \quad (1)$$

где V_o, V_k – начальный и конечный (после взрыва) объемы «пластина-свидетель». Величина $\pi h R_{\oplus}^2$ равна объему разрушенного материала.

Будем рассматривать только случаи, когда пробойное отверстие возникает (это всегда достигается соответствующим изменением величины R_0/h).

Учитывая пластический характер разрушения материала, в качестве критерия принимаем условие [16] (энергетический принцип):

$$s \geq h\sqrt{2\sigma_*\rho_m}, \quad (2)$$

где s – величина удельного импульса на поверхности плиты, при которой происходит ее полное разрушение.

Введем дополнительные обозначения: τ – текущее время; u_x – начальная скорость смещения границы «продукты взрыва–пластина», обусловленная сжимаемостью материала пластины; D_x – скорость распространения по продуктам детонации отраженной волны сжатия. Примем момент выхода детонационной волны на границу «ВВ–пластина» – $\tau_i = 0$.

Согласно [17, 18] при набегании плоской детонационной волны на металлическую преграду начальное давление в отраженных газообразных продуктах взрыва P_x превышает давление во взрывных газах P_* на фронте падающей волны. Величина u_x находится из условия, что скорости движения продуктов взрыва и материала плиты на границе их раздела равны между собой. В соответствии с [17, 18]:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \left(1 - \sqrt{2k} \frac{\vartheta - 1}{\sqrt{(k+1)\vartheta + (k-1)}} \right) = \sqrt{\frac{\vartheta P_*}{\rho_m} \left(1 - \left(\frac{A}{\vartheta P_* + B} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}, \quad (3)$$

где $J = P_x / P_*$ (коэффициент усиления давления в продуктах взрыва при отражении от пластины).

Принимая, что D_x равно [17]:

$$D_x = \frac{D}{k+1} \left(\sqrt{\frac{k}{2} [(k+1)\vartheta + (k-1)]} - 1 \right), \quad (4)$$

и учитывая, что давление в отраженной детонационной волне слабо зависит от координаты, а только от времени, на основании [17] определяем давление в момент τ в продуктах взрыва (ПВ) в области, примыкающей к границе «ПВ–пластина» и неохваченной боковой волной разряжения:

$$P(\tau) \cong \frac{\vartheta P_*}{\left(1 + \frac{u_x}{D_x} \right)^k} \frac{1}{\left(1 + \frac{D\tau}{L} \right)^k}, \quad (5)$$

Обозначим через $\tau_*(r)$ – время прихода боковой волны разряжения в точку на границе раздела

сред, удаленную от оси заряда на расстояние r . Тогда удельный импульс, переданный материалу пластины в данном месте, равен

$$s(r) = \int_0^{\tau_*(r)} P(\tau) d\tau + 2\beta \frac{k+1}{k} P_* \tau_*(r), \quad (6)$$

где второе слагаемое учитывает упругий удар мельчайших частиц твердой фазы, содержащейся в продуктах детонации, по пластине.

Величина

$$\tau_*(r) = (R_0 - r)/c, \quad (7)$$

где c – скорость звука в продуктах взрыва на границе «ПВ–пластина». В оценочных расчетах принимаем:

$$c \approx \frac{kD}{k+1} \vartheta^{\frac{k-1}{2k}}. \quad (8)$$

На основании (6)–(8) (при $\frac{L}{2R_0} \geq 6$) получаем

$$s(r) = \frac{P_*(R_0 - r)}{c} \left(\frac{\vartheta}{\left(1 + \frac{u_x}{D_x} \right)^k} + \frac{2(k+1)}{k} \beta \right) \quad (9)$$

На основании экспериментальных данных по динамической сжимаемости металлов [18] можно показать, что сталь Ст.3 и медь в широком диапазоне P_* (0,5-1,0 ГПа) и k (2,5-3,0) имеет значение $\vartheta \approx 2$.

При $\vartheta \approx 2$ величина $\vartheta / (1 + u_x / D_x)^k \cong 1,58$ при k (2,5–3,0). Тогда на основании (2), (8), (9), для «пластин–свидетелей» из указанных материалов, получаем

$$\frac{R_{\oplus}}{R_0} \approx 1 - \frac{1,76kh}{R_0} \frac{\sqrt{s_* r_m}}{r_* D \left(1,58 + \frac{2(k+1)}{k} b \right)}. \quad (10)$$

Зависимость (10) разрешается относительно k . Таким образом, существует принципиальная возможность экспериментального нахождения показателя политропы продуктов взрыва методом «пластины-свидетеля». Последнее, наряду со знанием ρ_* и D , позволяет осуществить оценку работоспособности ЭВВ простым и доступным даже для удаленных предприятий способом.

В связи с тем, что формула (10) дает лишь оценочную зависимость $\frac{R_{\oplus}}{R_0}$ от детонационных параметров ВВ, физико-механических свойств материала «пластины-свидетеля» и геометрических размеров заряда и пластины, то для обработки экспе-

риментальних даних на основани (10) пропонується нижчеприведенная зависимость:

$$\frac{R_{\oplus}}{R_o} = z_o \left[1 + \frac{z_1}{r_* D} \frac{h}{R_o} (z_2 b(k+1) - k) \right], \quad (11)$$

где ζ_o – коэффициент краевого эффекта; ζ_1 – коэффициент, характеризующий сопротивление материала пластины разрушению; ζ_2 – коэффициент, характеризующий эффективность передачи импульса твердыми частицами, содержащимися в продуктах взрыва, материалу пластины.

Тогда величина коэффициента политропы определится из уравнения

$$k = \frac{\zeta_2 \beta}{1 - \zeta_2 \beta} + \frac{\rho_* D R_o}{\zeta_1 h} \cdot \frac{1 - \frac{R_{\oplus}}{\zeta_o R_o}}{1 - \zeta_2 \beta}.$$

Удельная объемная работоспособность \mathfrak{S} может быть найдена из термодинамических критериев:

а) критерий Давыдова–Дубнова–Гришина [15]

$$\mathfrak{S}^{(1)} = \frac{r_* D^2 k}{(k^2 - 1)(k + 1)} \left[1 - \left(\frac{k}{(k + 1)\Psi} \right)^{k-1} \right]$$

Ψ – увеличение объема взрывных газов до окончания процесса их эффективного разрушения среды по сравнению с начальным объемом ВВ.

б) термодинамический критерий с учетом затрат энергии на сжатие самого ВВ [10]

$$\mathfrak{S}^{(2)} = \frac{r_* D^2 k}{(k^2 - 1)(k + 1)} \left[\frac{k + 1}{2k} - \left(\frac{k}{(k + 1)\Psi} \right)^{k-1} \right].$$

При определении относительной работоспособности

$f^{(i)} = \frac{\mathfrak{S}^{(i)}}{\mathfrak{S}_{\text{станд}}^{(i)}}$, где $(i=1; 2)$, $\mathfrak{S}_{\text{станд}}^{(i)}$ – (i) работоспособность эталонного ВВ, значения $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ отличаются незначительно, поэтому в инженерных расчетах можно пользоваться любым из представленных критериев.

ВЫВОДЫ. Таким образом, для определения работоспособности ВВ необходимо определить коэффициенты ζ_i ($i=0; 1; 2$).

В настоящее время осуществляются исследования по отработке методики эксперимента и повышению точности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутузов Б.Н., Маслов И.Ю., Брагин П.А. Производство эмульсионного ВВ «Эмулан ППВ–А–70» для ООО «Олекминский рудник» на основе низко-

температурной эмульсии // Горный журнал. – 2011. – № 8. – С. 91–93.

2. Викторов С.Д. Детонационные характеристики ифзанитов // Ежегодный сборник V Научно-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. – М.: Ротапринт СФТП ИФЗ АН СССР, 1974. – С.18–24.

3. Демидюк Г.П. О методах оценки взрывных свойств простейших ВВ // Взрывное дело. – № 74/31. – М.: Недра, 1974. – С. 119–133.

4. Поляк Г.А., Левчик С.П., Кукиб Б.Н. Оценка эффективности предохранительных ВВ по результатам взрывов в песке // Взрывное дело. – № 68/25. – М.: Недра, 1970. – С. 111–115.

5. Кукиб Б.Н., Иоффе В.Б., Александров В.Е. Оценка работоспособности по результатам взрывов в песке // Взрывное дело. – № 84/41. – М.: Недра, 1982. – С. 83–89.

6. Афанасенков А.Н., Котова Л.И., Кукиб Б.Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 115–125.

7. Вайнштейн Б.И., Чернов К.С., Песоцкий М.К. Анализ методов определения работоспособности ВВ // Взрывное дело. – № 84/41. – М.: Недра, 1982. – С. 75–83.

8. Оценка взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ / Е.А. Власова, А.С. Державец, С.А. Козырев и др. // Взрывное дело. – № 99/56. – М., 2008. – С. 119–136.

9. Соснин В.А., Смирнов С.П., Сахипов Р.Х. Оценка работоспособности и полноты взрывчатого превращения эмульсионных промышленных составов // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 118–121.

10. Рабочие характеристики эмульсионных взрывчатых веществ / С. Кудзило, П. Кохличек, В.А. Тржчинский, С. Зеэман // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 4. – С. 95–102.

11. Nyber U., Arvanitidis I., Olsson M., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives // Explosives and Blasting Technique. Holmberg (ed), 2003. – Swets @ Zeitlinger, Lisse. – PP. 181–213.

12. Викторов С.Д., Старшинов А.В., Жамьян Ж. Экспериментальная оценка и сравнение работоспособности смесевых взрывчатых веществ различного состава // Взрывное дело. – № 105/62. – М., 2011. – С. 142–150.

13. Определение взрывной эффективности промышленных ВВ по обжатию свинцового столбика через воздушный промежуток / А.В. Старшинов, О.Б. Литовка, В.И. Колпаков, Г.С. Григорьев // Взрывное дело. – № 103/60. – М., 2010. – С.178–188.

14. Bjarnholt G. Suggestions on standart for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // Propellants and Explosives. – 1980. – Vol. 5, № 2/3. – PP. 67–74.

15. Давыдов В.Ю., Дубнов Л.В., Гришкин А.М. Универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28, № 4. – С. 102–107.

16. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва. – М.: Изд. ВИА, 1957. – 408 с.

17. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.

18. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: Физматлит, 2008. – 304 с.

THEORETICAL BACKGROUND FOR WORKING CAPACITY ESTIMATION OF BULK EMULSION EXPLOSIVES BY MEANS OF «WITNESS TEST PLATE» METHOD

P. Bragin, S. Gorinov, I. Maslov

«Speckhimprom», CJSC, Moscow

ul. Profsouznaya, 3, Moscow, 117036, Russia. E-mail: pavelbragin83@mail.ru, ilmaslov@mail.ru

It is shown the basic possibility of experimental finding of polytrope index of explosion products by the «witness test plate» method. Knowing the polytrope index, packing degree and detonation speed of bulk emulsion explosives allows to carry out the assessment of working capacity of bulk emulsion explosives in the testing conditions by simple, economical and available method.

Key words: method of explosive working capacity determination, detonation parameters, polytrope index, physical and mechanical properties of the material "witness plate".

REFERENCES

1. Kutuzov B.N., Maslov I.Yu., Bragin P.A. Production of emulsion explosive «Emulan PVV–A–70» for JSC Olyokminsky rudnik on the basis of a low-temperature emulsion // *The mining journal*. – 2011. – № 8. – PP. 91–93. [in Russian]

2. Viktorov S.D. Detonation characteristics of ifzantes // *Annual collection book of V Scientific and technical problems of mineral development*. – М., SFTGP IPE Academy of Sciences, 1974. – PP. 18–24. [in Russian]

3. Demidyuk G.P. Methods for evaluation of explosive properties of elementary explosives // *Blasting work*. – № 74/31. – Moscow: Nedra, 1974. – PP. 119–133. [in Russian]

4. Polyk G.A., Levchik S.P., Kukib B.N. Assessment of the effectiveness of safety explosives for the blast in the sand // *Blasting work*. – № 68/25. – Moscow: Nedra, 1970. – PP. 111–115.

5. Kukib B.N., Ioffe V.B., V. Alexandrov B.E. Efficiency assessment as a result of explosions in the sand // *Blasting work*. – № 84/41. – Moscow: Nedra, 1982. – PP. 83–89. [in Russian]

6. Afanasenkov A.N., Kotova L.I., Kukib B.N. On the performance of industrial explosives // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2001. – Vol. 37, № 3. – PP. 115–125. [in Russian]

7. Weinstein B.I., Chernov K.S., Pesotsky M.K. Analysis of methods for explosive efficiency determining // *Blasting work*. – № 84/41. – Moscow: Nedra, 1982. – PP. 75–83. [in Russian]

8. Assessment of explosive characteristics and gas hazard of industrial explosives / E.A. Vlasova, A.S. Derzhavets, S.A. Kozyrev etc. // *Blasting work*. – № 99/56. – Moscow, 2008. – PP. 119–136. [in Russian]

9. Sosnin V.A., Smirnov S.P., Sahipov B.C. Assessment of performance and completeness of emulsion explosive transformation of industrial compounds // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1998. – Vol. 34, № 5. – PP. 118–121. [in Russian]

10. Kudzu S., Kohlicek P., Trzcinski V.A., Seemann S. Performance of Emulsion Explosives // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2002. – Vol. 38, № 4. – PP. 95–102. [in Russian]

11. Nyberg U., Arvanitidis I., Olsson M., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives // *Explosives and Blasting Technique*. Holmberg (ed), 2003. – Swets @ Zeitlinger, Lisse. – PP. 181–213.

12. Viktorov S.D., Starshinov A.V., Zhanyan J. Experimental evaluation and comparison of the performance of mixed explosives of different composition // *Blasting work*. – № 105/62. – Moscow, 2011. – PP. 142–150. [in Russian]

13. Starshinov A.V., Litovka O.B., Kolpakov V.I., Grigoriev G.S. Determination of the effectiveness of the explosive compression of commercial explosives to lead the column through an air gap // *Blasting work*. – № 103/60. – Moscow, 2010. – PP. 178–88. [in Russian]

14. Bjarnholt G. Suggestions on standart for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // *Propellants and Explosives*. – 1980. – Vol. 5, № 2/3. – PP. 67–74.

15. Davydov V.Y., Dubnov L.V., Grishkin A.M. Universal thermodynamic efficiency criterion of explosives // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1992. – Т. 28, № 4. – PP. 102–107. [in Russian]

16. Vlasov O. E. *Fundamentals of the explosion theory*. – Moscow: Publ. VIA, 1957. – 408 p. [in Russian]

17. Baum F.A., Stanyukovich K.P., Schechter B.I. *Physics of explosion*. – Moscow: Fizmatgiz, 1959. – 800 p. [in Russian]

18. Orlenko L.P. *Physics of explosion and blasting*. – Moscow: Fizmatlit, 2008. – 304 p. [in Russian]

Стаття надійшла 25.09.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Воробйовим В.В.