

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАЛИВНЫХ ЭВВ МЕТОДОМ «ПЛАСТИНЫ-СВИДЕТЕЛЯ»

П.А. Брагин⁽¹⁾, Горинов С.А.⁽²⁾, И.Ю. Маслов⁽³⁾

ЗАО «Спецхимпром»

Россия, 117036, г.Москва, ул. Профсоюзная, 3, офис., 600

e-mail: ⁽¹⁾ pavelbragin83@mail.ru, ⁽²⁾ akaz2006@yandex.ru, ⁽³⁾ ilmaslov@mail.ru

Показано что, существует принципиальная возможность экспериментального нахождения показателя политропы продуктов взрыва методом «пластины-свидетеля». Знание коэффициента политропы, плотности заряжания и скорости детонации ЭВВ позволяет осуществить оценку работоспособности ЭВВ в полигонных условиях простым, экономичным и доступным методом.

Ключевые слова: метод определения работоспособности ВВ, детонационные параметры, коэффициент политропы, физико-механические свойства материала «пластины-свидетеля».

It is shown that, there is a basic possibility of experimental finding of an indicator of a polytrope of products of explosion by the "plates witness" method. The knowledge of factor of a polytrope, density of loading and speed of a detonation of emulsion explosives allows to carry out an assessment of operability of emulsion explosives in polygonny conditions a simple, economic and available method.

Keywords: method of determination of operability of explosives, detonation parameters, factor of a polytrope, physicomachanical properties of the material "plates witness"

В России в связи с генеральным планом развития минерально-сырьевой базы 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 увеличенное потребление промышленных ВВ. Это, несомненно, коснется и эмульсионных ВВ (ЭВВ). При этом последние будут производиться, как на модульных заводах непосредственно на местах их потребления, так и будет 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 завоза) 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 взрывчатых веществ экспериментальная оценка

их разрушительных свойств остается во многом проблематичной. Решение 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 отбойки 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 и(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 рентгено съемки [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 вопросом 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 60мм.

Представляет интерес создание полноценной методики оценки работоспособности наливных ЭВВ методом «пластины-свидетеля». В основе данного метода лежит фиксация разрушений в толстой металлической пластине (для мягкой стали - 12-18мм) при торцевом воздействии на нее вплотную примыкающего цилиндрического заряда испытуемого ВВ. Длина заряда обычно составляет 6-10 калибров. Инициирование 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 «пластины-свидетеля» на несколько порядков меньше времени разрушительного воздействия на окружающую заряд 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

$$\left(P = P_o + A \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^n - B, \text{ где } P, P_o - \text{текущее и начальное давление в материале; } \rho - \text{плотность среды при давлении } P \right).$$

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 «пластины-свидетеля». 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_o / 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]:

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

где $\mathfrak{G} = D_o / D_*$ (коэффициент усиления давления в продуктах взрыва при отражении от пластины).

Принимая, что D_x равно [17]:

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

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 разряджения:

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

Обозначим через $\tau_*(r)$ - время прихода боковой волны разряджения в точку на границе раздела сред, удаленную от оси заряда на расстояние r . Тогда удельный импульс, переданный материалу пластины в данном месте,

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

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

$$\text{Величина } \tau_*(r) = (R_o - r) / c, \quad (7)$$

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

$$\text{принимаем: } c \approx \frac{kD}{k+1} \mathfrak{G}^{\frac{k-1}{2k}}. \quad (8)$$

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

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

На основании экспериментальных данных по динамической сжимаемости металлов [18] можно показать, что сталь Ст.3 и медь в широком диапазоне P_* (0,5-1,0ГПа) и k (2,5-3,0) имеет значение $\mathfrak{G} \approx 2$. При $\mathfrak{G} \approx 2$ величина $\mathfrak{G} / \left(1 + u_x / D_x \right)^k \cong 1,58$ при k (2,5-3,0). Тогда на основании (2), (8), (9), для «пластин-свидетелей» из указанных материалов, получаем

$$\frac{R_{\oplus}}{R_o} \approx 1 - \frac{1,76kh}{R_o} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_* \rho_m}}{\rho_* D \left(1,58 + \frac{2(k+1)}{k} \beta \right)}. \quad (10)$$

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 $\frac{R_{\oplus}}{R_o}$ от детонационных

параметров ВВ, физико-механических свойств материала «пластины-свидетеля» и геометрических размеров заряда и пластины, то для обработки экспериментальных данных на основании (10) предлагается нижеприведенная зависимость (11):

$$\frac{R_{\oplus}}{R_o} = \zeta_o \left[1 + \frac{\zeta_1}{\rho_* D} \frac{h}{R_o} (\zeta_2 \beta (k+1) - k) \right], \quad (11)$$

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{Z} может быть найдена из термодинамических критериев:

а). критерий Давыдова-Дубнова-Гришина [15]

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

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]

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

При определении относительной

работоспособности $f^{(i)} = \frac{\mathfrak{Z}^{(i)}}{\mathfrak{Z}_{станд}^{(i)}}$, где $(i=1; 2)$,

$\mathfrak{Z}_{станд}^{(i)}$ - (i) работоспособность эталонного ВВ,

значения $f^{(1)}$ и $f^{(2)}$ отличаются незначительно, поэтому в инженерных расчетах можно пользоваться любым из представленных критериев. 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 низкотемпературной 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., ротапонт СФТГП 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. Власова Е.А., Державец А.С., Козырев С.А. 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. Кудзило С., Кохличек П., Тржчинский В.А., Зеeman С. // Физика горения и взрыва, 2002, Т.38, №4, С.95-102.
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, p.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.

- Старшинов А.В., Литовка О.Б., Колпаков В.И., Григорьев Г.С. // Взрывное дело №103/60, М.: 2010, С.178-188.
14. Bjarnholt G. Suggestions on standart for measurement and data evalusion in the underwater explosion test // Propellants and Explosives. 1980. V. 5, №2/3. P.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.- 408с.
17. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва.- М.: Физматгиз, 1959.- 800с
18. Оrlenко Л.П. Физика взрыва и удара.- М.: Физматлит, 2008.- 304с.

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 Mountain magazine, 2011, №8, p. 91-93.
2. Viktorov S.D. Detonation characteristics ifzanitov // Yearbook V Scientific and technical problems of mineral development. M., offset duplicator SFTGP IPE Academy of Sciences, 1974, P.18-24.
3. Demidyuk GP Methods for evaluation of explosive properties of the simplest ВВ // Explosive case № 74/31, Moscow, Nedra, 1974, p.119-133.
4. Polyk G.A., Levchik S.P., Kukib B.N. Assessment of the effectiveness of safety explosives for the blast in the sand // Explosive case № 68/25, Moscow, Nedra, 1970, p.111-115.
5. Kukib B.N., Ioffe V.B., V. Alexandrov B.E. Assessment of performance as a result of explosions in the sand // Explosive case № 84/41, Moscow, Nedra, 1982, P.83-89.
6. Afanasenkov A.N., Kotova L.I., Kukib B.N. On the performance of industrial explosives // Combustion, Explosion, 2001, T.37, № 3, p.115-125.
7. Weinstein B.I., Chernov K.S., Pesotsky M.K. Analysis of methods for determining the efficiency of explosives // Explosive case № 84/41, Moscow, Nedra, 1982, P.75-83.
8. Score explosive characteristics and gas hazard industrial explosives. Vlasova E.A., Derzhavets A.S., Kozyrev S.A. etc. // The Explosive case № 99/56, Moscow, 2008, p.119-136.
9. Sosnin V.A., Smirnov S.P., Sahipov B.C. Assessment of performance and completeness of emulsion explosive transformation of industrial compounds // Combustion, Explosion, 1998, v.34, № 5, p.118-121.
10. Performance of Emulsion Explosives. Kudzu S. Kohlicek P. Trzcinski VA, S. Seemann // Combustion, Explosion, 2002, v.38, № 4, p.95-102.
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, p.181-213.
12. Viktorov S.D., Starshinov A.V, Zhamyan J. Experimental evaluation and comparison of the performance of composite explosives of different composition. // Explosive case № 105/62, Moscow, 2011, p.142-150.
13. Determination of the effectiveness of the explosive compression of commercial explosives to lead the column through an air gap. Starshinov A.V., Litovka O.B., Kolpakov V.I, Grigoriev G.S. // The Explosive case №103/60, Moscow, 2010, p.178-188.
- 14 Bjarnholt G. Suggestions on standart for measurement and data evalusion in the underwater explosion test // Propellants and Explosives. 1980. V. 5, №2/3. P.67-74.
15. Davydov V.Y., Dubnov L.V., Grishkin A.M. Universal thermodynamic efficiency criterion explosives // Combustion, Explosion, 1992, T.28, № 4, p.102-107.
16. Vlasov O.E. Fundamentals of the theory of the explosion. – Moskow, Izd. VIA 1957. - 408s.
17. Baum F.A., Stanyukovich K.P., Schechter B.I. Physics of the explosion. - Moscow: Fizmatgiz, 1959. - 800S.
18. Orlenko L..P Physics of explosion and shock. - Moskow, Fizmatlit , 2008. - 304s.