

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЗРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВОВОЗДУШНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Г.-Ж. Лю, Ф.-Цз. Хоу, Б.-Ю. Цао, Л.-Цз. Се, Чж.-У. Шэнь, Т.-Ц. Чжоу

Факультет механики и машиностроения, Китайский университет науки и технологий, Хэфэй 230027, Аньхой, Китай, diglyme@mail.ustc.edu.cn

В полевых условиях исследованы характеристики взрыва топливовоздушных взрывчатых веществ. Эксперименты проводились с топливами различной рецептуры (полностью состоящие из твердых компонентов; являющиеся смесью твердых и жидких компонентов), а также с зарядом тротила той же массы. Результаты показывают, что на расстоянии $3 \div 6$ м от центра взрыва взрывное действие топлив бесспорно лучше, чем заряда тротила той же массы, причем среди топлив составы только из твердых компонентов проявили себя лучше, чем смеси жидких и твердых компонентов. Предложена новая формула для максимального избыточного давления во фронте воздушной ударной волны, полученная на основе анализа большого количества экспериментов. Максимальное значение тротилового эквивалента для исследуемых топлив составило 5.35. Эффект диспергирования в воздухе смесевых топлив лучше, чем у тротила той же массы; пламя в случае топлив также существовало дольше. Высокоскоростная фотосъемка показала, что время существования огненных шаров в случае твердых топлив подходящей рецептуры близко к времени существования огненных шаров топлив, состоящих из смеси твердых и жидких компонентов. Анализируется причина разновременности двух моментов — достижения максимального избыточного давления, вызванного взрывом смесевого топлива, и достижения максимального диаметра огненного шара. Обсуждается механизм однократного инициирования.

Ключевые слова: топливовоздушные взрывчатые вещества, механизм однократного инициирования, ударная волна, высокоскоростная фотосъемка, тротильный эквивалент.

ВВЕДЕНИЕ

Топливоздушные взрывчатые вещества (FAE) впервые были использованы во Вьетнаме. Их появление стало важным шагом в реформировании традиционных типов вооружения [1]. В дальнейшем FAE были значительно усовершенствованы, в основном в плане увеличения мощности [2, 3] за счет улучшения топливных составов и взрывных методов. Топливо напрямую определяет мощность FAE, а также безопасность и надежность его изготовления и использования. Поэтому чрезвычайно важен поиск топлив для FAE, способных к однократному инициированию и при этом высокоэнергетических [4], надежных в применении, нетоксичных, без побочных эффектов, безопасных и легких в обращении.

В настоящей работе проведено сравнение эффективности твердых (состоящих полностью из твердых компонентов — SF) и жидких (состоящих из смеси твердых и жидких

компонентов — LF) топлив различной рецептуры. Экспериментальные результаты анализировались с использованием теории взрыва и ударных волн. Обсуждается также механизм однократного инициирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Эксперименты проводились с двумя сборками цилиндрической формы (рис. 1). Внутренний диаметр заряда топлива 20 мм, наруж-

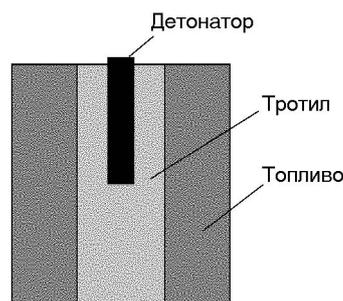


Рис. 1. Заряд топлива

ный — 59 и 60 мм, длина 70 и 100 мм соответственно. Оболочки изготавливались из поливинилхлорида. Торцы заряда были надежно герметизированы. Полная масса топлива в обеих сборках составляла 1.8 кг. Сборка помещалась на станину, находящуюся на высоте 30 см над уровнем земли, так что ее центр находился на высоте 40 см над уровнем земли. Взрыв инициировался детонатором № 8, расположенным в центральной части сборки.

Система для измерения давления состояла из датчиков давления CY-YD203, электрометрического усилителя KD5003 и двух 8-канальных устройств сбора данных IDTS (рис. 2). Перед экспериментами проводилась калибровка датчиков давления. Датчики находились на расстоянии 3, 5, 6 м от центра заряда (рис. 3).

Для съемки экспериментов использовалась высокоскоростная система фоторегистрации HG-LE производства фирмы «Redlake», установленная на безопасном расстоянии от места взрыва на той же высоте, что и центр заряда. Съемка проводилась с частотой 2 000 кадр/с.

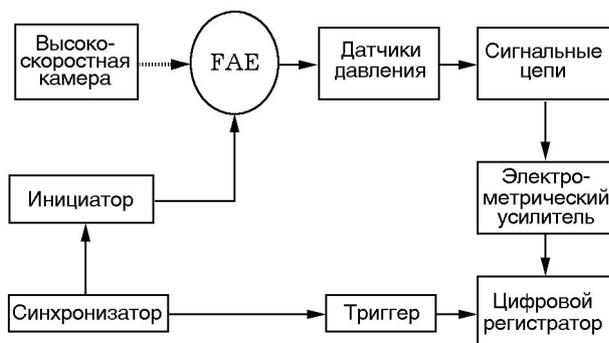


Рис. 2. Схема измерительной системы

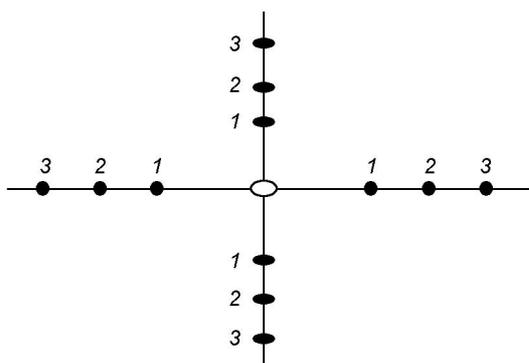


Рис. 3. Схема расположения датчиков

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты выполнялись с тремя составами твердых топлив SF и двумя составами топлив LF, обозначенными соответственно SF01, SF02, SF03 и LF04, LF05. Сравнение проводилось с зарядами тротила той же массы. SF представляют собой смесь гексогена (RDX) с алюминием: SF01 — 70 % RDX + 30 % Al, SF02 — 40 % RDX + 60 % Al, SF03 — 80 % RDX + 20 % Al. LF — это смесь тротила с 1,2-эпоксипропаном (PO): LF04 — 70 % тротила + 30 % PO, LF05 — 50 % тротила + 50 % PO. Избыточное давление для каждого топлива рассчитывалось как среднее значение результатов измерения в четырех точках, находящихся на одном и том же расстоянии от центра взрыва. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, избыточное давление во фронте ударной волны исследуемых топлив и тротила быстро ослабевает, причем на одних и тех же расстояниях оно выше у топлив. На расстоянии 5 м избыточное давление для всех топлив выше, чем при взрыве тротила, а давление в опытах с SF01 на 7 % выше, чем со смесью LF04. На расстоянии 6 м скорость ослабления избыточного давления у топлив ниже, чем у тротила. Средние значения избыточного давления для всех топлив SF, за исключением SF03, на 36.4 % выше, чем для топлив LF, и в 2.03 раза выше, чем для тротила.

Согласно формуле М. А. Садовского [5]

$$\Delta p = 0.076 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.255 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^2 + 0.65 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^3 \quad (1)$$

Таблица 1

Избыточное давление на различных расстояниях от центра взрыва

Топливо	p , МПа при r , м		
	3	5	6
Тротил	0.2794	0.0484	0.0326
SF01	0.3243	0.0952	0.0644
SF02	0.3411	0.0844	0.0679
SF03	0.3246	0.0763	0.0479
LF04	0.3258	0.0884	0.0483
LF05	0.2825	0.0612	0.0487

или

$$\Delta p = \frac{0.076}{\bar{r}} + \frac{0.255}{\bar{r}^2} + \frac{0.65}{\bar{r}^3}. \quad (2)$$

Согласно формуле Х. Л. Броде [6]

$$\Delta p = -0.0019 + 0.0975 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.1455 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^2 + 0.585 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^3 \quad (3)$$

или

$$\Delta p = -0.0019 + \frac{0.0975}{\bar{r}} + \frac{0.1455}{\bar{r}^2} + \frac{0.585}{\bar{r}^3}. \quad (4)$$

Здесь Δp — максимальное избыточное давление на фронте ударной волны, МПа; ω — масса заряда ТНТ, кг; r — расстояние от центра заряда, м; $\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}}$, м/кг^{1/3}. Максимальное избыточное давление на фронте воздушной ударной волны в настоящей работе определялось по формуле [7]

$$\Delta p = 0.084 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^3 \quad (5)$$

или

$$\Delta p = \frac{0.084}{\bar{r}} + \frac{0.27}{\bar{r}^2} + \frac{0.7}{\bar{r}^3}. \quad (6)$$

Параметры приведенных выше формул получены на основе анализа большого количества экспериментов.

При взрыве заряда топлива на земле ударные волны распространяются в полубесконечное пространство. Количество воздуха, вовлекаемого в движение ударными волнами, уменьшается на 50 %. При взрыве на жесткой поверхности (бетонной или каменной) можно считать, что его действие эквивалентно заряду удвоенной массы, взрывающемуся в свободном пространстве. В этом случае

$$\Delta p_G = 0.106 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.43 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^2 + 1.4 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^3, \quad (7)$$

$$1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10 \simeq 15, \quad (8)$$

где Δp_G — максимальное избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве заряда на жесткой поверхности.

При взрыве заряда топлива на обычном грунте часть энергии поглощается, т. е. коэффициент отражения меньше 2. В этом случае, положив коэффициент равным 1.8, получим

$$\Delta p_g = 0.102 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.399 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^2 + 1.26 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} \right)^3, \quad (9)$$

$$1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10 \simeq 15, \quad (10)$$

где Δp_g — максимальное избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве заряда на обычном грунте.

Результаты расчета тротилового эквивалента исследованных смесей представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что на больших расстояниях от центра взрыва тротильный эквивалент твердых топлив (за исключением SF03) выше, чем у топлив, являющихся смесью жидких и твердых компонентов. Наибольшее его значение (5.35) получено для состава SF01.

Анализ значений избыточного давления и тротилового эквивалента показал, что топлива SF01 и LF04 имеют хорошие взрывные характеристики. Фотографии взрыва этих двух топлив были выбраны для сравнения с тротилом. На рис. 4 представлена высокоскоростная съемка взрыва топлив SF01, LF04 и для сравнения — фотографии взрыва тротила.

При подрыве твердого топлива форма взрывного облака близка к сфере. При подрыве

Таблица 2

Тротильный эквивалент топливоздушных смесей на различных расстояниях от центра взрыва

Топливо	ТЭ при r , м		
	3	5	6
SF01	2.48	5.35	3.37
SF02	2.63	4.29	3.37
SF03	2.48	3.81	2.46
LF04	2.48	4.29	2.46
LF05	1.79	1.95	2.46

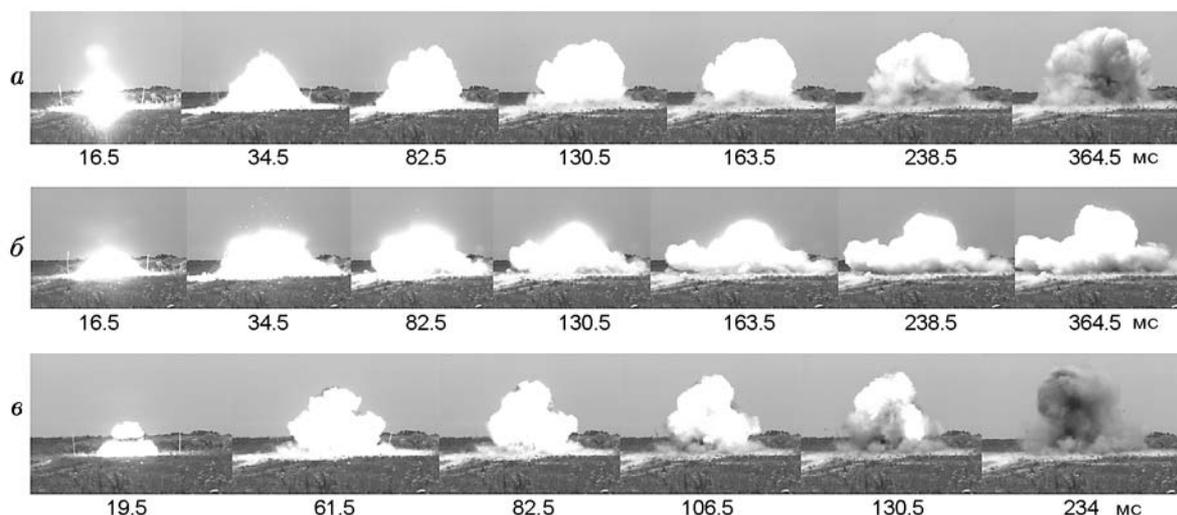


Рис. 4. Фотографии взрыва топлив SF01 (а), LF04 (б) и тротила (в), полученные с помощью высокоскоростной камеры

топлива, состоящего из смеси жидких и твердых компонентов, взрывное облако принимает форму знака плюс. Взрывное облако тротила близко к сфере. При той же массе заряда огненный шар в случае твердого топлива существовал в течение более длительного времени, чем при взрыве тротила, — в среднем 291 мс, в случае топлив, состоящих из смеси жидких и твердых компонентов, — 387 мс, в случае тротила — 234 мс. Через 364.5 мс световое излучение от взрыва топлив все еще регистрировалось, тогда как в случае тротила оно отсутствовало уже через 234 мс после подрыва заряда.

Параметры распространения огненных шаров тротила и топлив различной рецептуры были определены с помощью полученных фотографий, результаты обработки представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что длительность (t) существования огненных шаров исследованных составов составляла $197 \div 388$ мс, тогда как в случае тротила той же массы — 234 мс. Среднее время существования огненных шаров в случае топлив в 1.25 раза больше, чем у заряда тротила той же массы. Максимальный диаметр (d_{\max}) огненных шаров в случае топлив в $1.04 \div 1.49$ раза больше, чем у заряда тротила той же массы.

Анализ показал, что топлива в сравнении с тротилом той же массы характеризуются лучшим распространением взрывной волны в воз-

Таблица 3
Результаты обработки фотографий взрыва высокоэнергетических топлив и тротила

Топливо	t , мс	d , см
TNT	234	627
SF01	383	660
SF02	197	717.8
SF03	385	649
LF04	388	852.9
LF05	386	935

духе и большей длительностью существования огненных шаров. Время существования огненных шаров при взрыве твердых топлив подходящей рецептуры близко к времени существования огненных шаров от топлив, состоящих из смеси жидких и твердых компонентов.

Анализ результатов измерения избыточного давления и результатов высокоскоростной фотосъемки показал, что в случае твердых топлив моменты, когда достигаются максимальное избыточное давление и максимальный диаметр огненного шара, существенно различаются. Основная причина этого в том, что воспламеняемый порошок (включая металлический) в топливе характеризуется относительно небольшим временем задержки инициирования химической реакции, поэтому возмо-

жен только нестационарный взрыв, скорее даже инициируется дефлаграция, нежели настоящий взрыв. Дефлаграция имеет меньшую скорость распространения и более низкую скорость химической реакции, что приводит к сдвигу по фазе между ударной волной, возникающей при взрыве топлива, и ударной волной, вызванной нестационарным взрывом порошка. Это является также причиной того, что области взрыва от топлив и тротила различаются.

ВЫВОДЫ

Полевые эксперименты продемонстрировали превосходство взрывных характеристик топлив по сравнению с зарядом тротила той же массы. Более того, твердые топлива проявили себя лучше на расстояниях $3 \div 6$ м от центра взрыва, чем топлива, состоящие из смеси жидких и твердых компонентов.

Распределение давления во фронте ударной волны от топлива отличается от указанного в работе [8]. Согласно работе [9] радиус взрыва в воздухе заряда твердого топлива массой 1.8 кг составляет ≈ 2.05 м, тогда как в экспериментах [8] ближайшая точка, в которой проводились измерения, находилась на расстоянии 3 м от центра взрыва, т. е. на краю зоны протекания реакции. Поэтому избыточное давление монотонно уменьшается с увеличением расстояния от центра взрыва.

Твердые топлива и топлива, состоящие из жидких и твердых компонентов, различной рецептуры имеют похожее распределение избыточного давления во фронте ударной волны и сходные параметры распространения огненных шаров.

Дальнейшие исследования позволят оптимизировать состав твердых топлив с целью увеличения давления взрыва и температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wang Ying, Ma Fuxue.** The Theory of New Conception Weapon. Beijing: Enginery Industry Publ. Co, 1997. P. 485–488.
2. **Gui Dayong, Liu Jiping, Feng Shunshan.** Research of power performance of several typical fuel air explosive // Energetic Materials. 2002. V. 10, N 3. P. 121–124.
3. **Hui Junming, Liu Ronghai, Ge Guilun.** Study on increasing the power of FAE — selection of high energy fuels // J. Nanjing Univ. of Sci. and Technol. (Nature Sci.). 1995. V. 19, N 5. P. 472–476.
4. **Gui Dayong, Feng Shunshan, Liu Jiping.** The optimization selection of liquid fuels for high power FAE // Chinese J. Explosives and Propellants. 2002. V. 25, N 3. P. 14–16, 25.
5. **Садовский М. А.** Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Сборник научно-исследовательских работ в области физики взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952. № 1.
6. **Brode H. L.** Blast wave from a spherical charge // Phys. Fluids. 1959. V. 2. P. 217–229.
7. **Explosive and its effect** // The Eighth department of Beijing Industry Institute, National Defense Industry Publ. Company, 1979. P. 259–260.
8. **Wang Derun, Shen Zhaowu, et al.** Experimental study on single ignition of solid and liquid FAE // Explosion and Shock Waves. 2004. V. 24, N 5. P. 391–395.
9. **Zhao Hengyang.** Principles of Gas and Dust Explosion. Beijing: Beijing Inst. of Technology Press, 1996. P. 48–56.

*Поступила в редакцию 13/XII 2006 г.,
в окончательном варианте — 20/IV 2007 г.*