

ние $R_{\text{пл}}$ при высоких ρ_0 . Аналогичные явления ранее наблюдались на ТНТ и ТГ и были объяснены появлением алмаза при детонации плотных зарядов. Исходя из этого объяснения можно ожидать появления алмаза при детонации пикриновой кислоты высокой плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лямкин А. П., Петров Е. А., Ершов А. П. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // Докл. АН СССР.— 1988.— 302, № 3.— С. 611.
2. Greiner N. R., Phillips D. S., Johnson J. D. et al. Diamonds in detonation soot // Nature.— 1988.— 333, N 6172.— P. 440.
3. Sakovich G. V., Titov V. M., Brylyakov P. M. et al. Synthesis of diamond clusters by explosion // High Energy Rate Fabrication: 10th Int. Conf.— Ljubljana (Yugoslavia), 1989.— P. 179.
4. Titov V. M., Anisichkin V. F., Mal'kov I. Yu. Synthesis of ultrafine diamonds in detonation waves // 9th Symp. (Int.) on Detonation.— Prepr.— Portland (Oregon), 1989.— P. 175.
5. Johnson J. D. Carbon in detonations // Ibid.— P. 184.
6. Greiner N. R., Hermes R. Chemistry of detonation soot: diamonds, graphite, and volatiles // Ibid.— P. 522.
7. Kerley G. I. Theoretical equations of state for the detonation properties of explosives // 8th Symp. (Int.) on Detonation.— White Oak, 1986.— P. 540.
8. Van Thiel M., Ree F. H. Properties of carbon clusters in TNT detonation products: the graphite-diamond transition J. Appl. Phys.— 1987.— 62, N 5.— P. 1761.
9. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепекин В. П. и др. Влияние формы и размера кристаллов графита и алмаза на фазовое равновесие углерода и параметры детонации ВВ // IV Всесоюз. совещ. по детонации.— Черногоровка, 1988.— Т. I.— С. 13.
10. Urizar M. J., James E., Smith L. S. Detonation velocity of pressed TNT // Phys. Fluids.— 1961.— 4, N 2.— P. 262.
11. Shaw M. S., Johnson J. D. Carbon clustering in detonations // J. Appl. Phys.— 1987.— 62, N 5.— P. 2080.
12. Дремин А. П., Першин С. В., Пятернев С. В. и др. Об изломе зависимости скорости детонации от начальной плотности ТНТ.— Деп. в ВИНТИ 18.05.88, № 3817—В88.
13. Першин С. В. Об образовании алмаза при детонации тринитротолуола // IV Всесоюз. совещ. по детонации.— Черногоровка, 1988.— Т. I.— С. 1.
14. Дремин А. П., Першин С. В., Пятернев С. В. и др. Об изломе зависимости скорости детонации от начальной плотности ТНТ // ФГВ.— 1989.— 25, № 5.— С. 141.
15. Антипенко А. Г., Першин С. В., Цаплин Д. Н. Динамические исследования образования алмаза в продуктах детонации тротила // High Energy Rate Fabrication: 10th Int. Conf.— Ljubljana (Yugoslavia), 1989.— P. 170.
16. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ.— М.: Оборонгиз, 1960.
17. Антипенко А. Г., Дремин А. П., Якушев В. В. О зоне электропроводности при детонации конденсированных ВВ // Докл. АН СССР.— 1975.— 225, № 5.— С. 1086.
18. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. П. Физика взрыва.— М.: Физматгиз, 1959.
19. Дремин А. П., Першин С. В. К вопросу о динамической сжимаемости углерода // ФГВ.— 1968.— 4, № 1.— С. 112.
20. Жугин Ю. Н., Крупников К. К., Овечкин Н. А. Исследование особенностей превращения ударно-сжатого графита в алмаз // Хим. физика.— 1987.— 6, № 10.— С. 1447.

п. Черногоровка

Поступила в редакцию 20/IV 1990

УДК 532.528

А. В. Морозов, Е. И. Ермолович, Г. С. Доронин, Д. И. Мацуков

КОНФИГУРАЦИЯ ОБЛАКА ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПРИ РАСШИРЕНИИ В ВОЗДУХ

Методами теневой фоторегистрации зафиксированы конфигурации облаков ПВ в воздухе зарядов ВВ различной природы сферической и цилиндрической формы. Установлено, что конфигурация облака продуктов взрыва от цилиндрического заряда при достижении его предельных размеров существенно отлична от сферической формы. Облако продуктов взрыва достигает предельных размеров при величине 25—30 первоначальных радиусов вопреки результатам численного счета, дающего величину, не превышающую 15—16 первоначальных радиусов заряда.

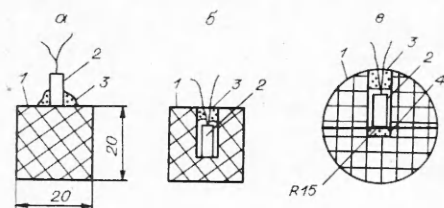


Рис. 1.

Взрыв зарядов конденсированных ВВ различной формы в воздухе исследовался экспериментально и в том или ином приближении численно [1—6]. Основное внимание при этом уделялось определению параметров ударных волн (УВ) и течениям за ними. Менее изученным остается вопрос экспериментального

определения параметров течения продуктов взрыва (ПВ).

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование пространственных конфигураций облаков ПВ, образующихся в воздухе от зарядов ВВ сферической и цилиндрической формы (рис. 1, 1 — заряд ВВ, 2 — электродетонатор, 3 — пластилин, 4 — порошок гексогена) при больших степенях расширения.

Эксперименты проводились по схеме теневой фоторегистрации. Заряд ВВ подвешивался на тонкой капроновой нити. Расширение ПВ фиксировалось на фотопленку с применением электронно-оптической камеры. Выбор короткофокусного объектива обеспечивал поле зрения размерами $\sim 1 \times 1$ м. За зарядом на расстоянии 0,25 м располагался экран из кальки в плоскости, перпендикулярной оптической оси камеры. Наличие реперных линий, нанесенных на кальку, обеспечивало в процессе обмера фотохронограмм определение масштаба увеличения оптической системы, и в экспериментах по целевой фоторегистрации позволило визуализировать положение участка фронта воздушной УВ. За экраном на оптической оси камеры располагалась импульсная лампа-вспышка с длительностью излучения 1,5—2 мс. Масштаб увеличения оптической системы определялся фотографическим методом [7]. Фоторегистрограммы и кинограммы измерялись на двухкоординатном измерительном приборе ДИП-1. Результаты обмера пересчитывались в реальные координаты радиус — время. При необходимости табличные зависимости радиус — время численно дифференцировались с применением сглаживающих кубических сплайнов [8].

В первой серии экспериментов использовались заряды цилиндрической формы из флегматизированных гексогена и октогена, алюминизированного октогена и тротила. Типичные кинограммы представлены на рис. 2. Регистрация в покадровом режиме осуществлялась с частотой съемки $1 \cdot 10^4$ кадр/с, время экспозиции одного кадра составило 20 мкс. Расстояние между параллельными реперными линиями на кальке — 200 мм. Кинограммы рис. 2, а, б соответствуют рис. 1, а, б.

Из анализа рис. 2 следует, что теневое изображение облака ПВ на различных стадиях расширения существенно отличается от сферического. Более того, отсутствуют какие-либо предпосылки, указывающие на его вырождение в сферу. Начиная с 300—400 мкс конфигурация облака ПВ и его размеры практически не меняются во времени. Следует отметить, что при значительной степени расширения ПВ наблюдаются струйные течения.

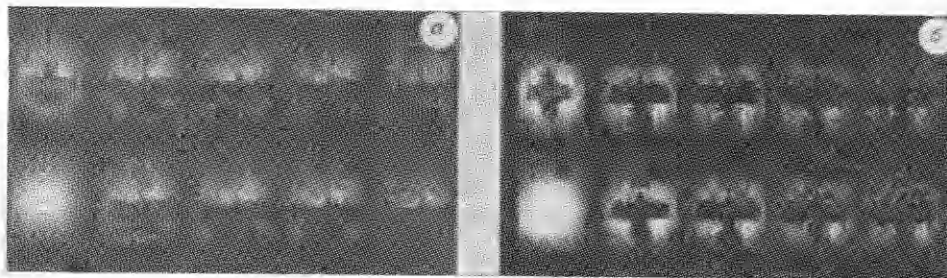


Рис. 2.

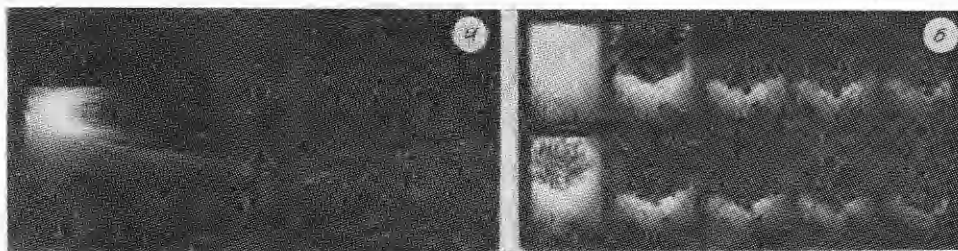


Рис. 3.

Изменение места инициирования зарядов с центрального на торцевое (см. рис. 1, б) незначительно меняет форму облака ПВ, так как она не зависит от природы ВВ. Для выяснения поведения ПВ на более поздних стадиях проведены эксперименты с зарядами по схеме рис. 1, б, в которых регистрация осуществлялась ~ 800 мкс через 1,0 и 2,2 мс от момента инициирования. Результаты опытов показывают, что форма облака ПВ и его размеры не меняются во времени до 3 мс. Эксперименты с зарядами ВВ увеличенных размеров (диаметр и высота 40 мм) показали отсутствие влияния масштабного фактора на форму облака ПВ.

Во второй серии использовались сферические заряды, склеенные из двух полусфер (см. рис. 1, в). Методика экспериментов аналогична описанной выше. Заряд инициировали миниатюрным электродетонатором «мгновенного» действия диаметром 5 и высотой 10 мм через промежуточный детонатор из порошкообразного гексогена.

На рис. 3 представлены щелевая фоторегистрограмма (а) и кинограмма (б) процесса расширения облака ПВ сферического заряда прессованного тротила ($\rho_0 = 1,53 \pm 0,01$ г/см³). Расширение на начальной стадии сопровождается яркой вспышкой, обусловленной собственным свечением ПВ и свечением, вызванным распространением сильной УВ в воздухе. Свечение практически прекращается в момент отхода от ПВ воздушной УВ. Последняя имеет сферическую форму, а отстающие от нее ПВ пространственно неоднородны, однако облако ПВ сохраняет сферическую конфигурацию. Эти неоднородности обусловлены неустойчивостью Релей—Тейлора. В этой связи в общем случае процесс расширения ПВ в воздухе необходимо рассматривать в трехмерной постановке. Однако, как показано в [9], расширение ПВ можно описывать в одномерной постановке, так как влияние неустойчивости Релей—Тейлора на размеры облака ПВ мало. Такой подход в настоящее время общепринят.

Зависимости радиус — время, вычисленные по результатам обмена фоторегистрограмм и кинограмм для тротила, представлены в безразмерных координатах (где $\bar{D} = 6750$ м/с) на рис. 4 (кривая 1 — УВ в воздухе). Две экспериментальные кривые расширения ПВ 3 и 5 получены в результате обмера кинограмм рис. 3, б. Эти линии характеризуют движения видимых границ ПВ с максимальной и минимальной скоростями соответственно. Аналогичная кривая 7, полученная по результатам щелевой фоторегистрации, находится между указанными выше. На рис. 4 нанесены результаты численных расчетов процессов расширения ПВ зарядов, используемых в эксперименте (2 — УВ в воздухе, 6 — ПВ).

Решалась одномерная задача со сферической симметрией в лагранжевых массовых переменных разностным методом по квази-

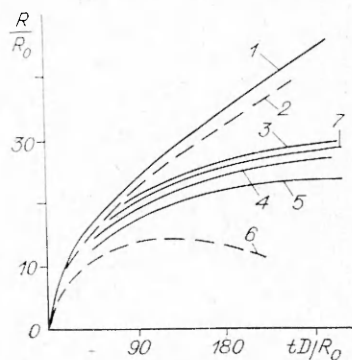


Рис. 4.

линейной, неявной, абсолютно устойчивой и полностью консервативной схеме. Расчеты проводились с применением уравнения состояния ПВ в форме JWL [10]

$$p = A [1 - \omega\rho/(R_1\rho_0)] \exp(-R_1\rho_0/\rho) + \\ + B [1 - \omega\rho/(R_2\rho_0)] \exp(-R_2\rho_0/\rho) + \omega\rho\varepsilon/\rho_0$$

с соответствующей изоэнтропой

$$p = A \exp(-R_1\rho_0/\rho) + B \exp(-R_2\rho_0/\rho) + C(\rho/\rho_0)^{-(1+\omega)},$$

где $A = 371,2$ ГПа; $B = 3,231$ ГПа; $C = 1,045$ ГПа; $R_1 = 4,15$; $R_2 = 0,95$; $\varepsilon = 7$ ГПа; $\omega = 0,3$; ρ_0 , ρ — начальная плотность заряда и ПВ соответственно; ε — внутренняя энергия на единицу объема.

Уравнение состояния воздуха бралось в виде

$$\varepsilon = p/[\rho(\gamma - 1)].$$

Здесь $\gamma = c_p/c_v = 1,4$; c_p , c_v — удельные теплоемкости.

По существующим представлениям облако ПВ при расширении в воздух достигает предельного размера на расстоянии 10—15 первоначальных радиусов заряда [5]. Результаты численного расчета дают близкий результат ($\sim 16 R_0$). Однако из экспериментов следует, что облако ПВ достигает предельных размеров на расстоянии (20—30) R_0 . Такое сильное различие требует объяснения.

Известно, что при взрыве заряда ВВ с отрицательным кислородным балансом или с различными добавками в ПВ образуется полидисперсная конденсированная фаза [11]. Если бы в ПВ не присутствовали конденсированные частицы, то они были бы прозрачны. Мелкие частицы к-фазы (диаметр $d \leq 10$ мкм) практически мгновенно по отношению к промежутку времени регистрации приобретают скорость газообразных ПВ и в дальнейшем отслеживают их движение. Отсутствие пульсаций в движении границы ПВ, предсказываемых численными расчетами [2], и более значительный объем, занимаемый ими в эксперименте по сравнению с расчетным, можно объяснить наличием в ПВ более крупных по размеру конденсированных частиц ($d > 10$ мкм). Последние приобретают несколько меньшую начальную скорость движения, чем газообразные ПВ, но зато и разлетаются дальше вследствие меньшего торможения.

Таким образом, торможение газообразных ПВ и мелкодисперсной к-фазы происходит в соответствии с законами газодинамики, а более крупной к-фазы — в соответствии с законом движения тела в среде с сопротивлением. В конечном итоге газообразные ПВ затормаживаются при $R/R_0 \approx 10 \div 15$, а более крупные частицы к-фазы при $R/R_0 \approx 20 \div 30$ (последнее фиксируется в экспериментах). Оценим приближенно верхнюю границу размера частиц к-фазы.

Предположим, что конденсированная частица из углерода имеет сферическую форму с коэффициентом сопротивления $C_d = 0,44$ [12] и скорость ее движения v_+ равна начальной скорости расширения ПВ (для ПВ тротила $v_0 = 6600$ м/с). При числе Рейнольдса $Re \gg 1$ движение частиц описывается законом [12]

$$m \frac{dv_+}{dt} = F, \quad (1)$$

где $F = 0,125\pi d^2 \rho_- C_d / v_- - v_+ / (v_- - v_+)$; $m = \pi d^3 \rho_+ / 6$; ρ_+ , ρ_- — плотность частиц и воздуха соответственно; v_- ; v_+ — скорость движения воздуха и частицы соответственно.

Интегрируя уравнение (1) при $v_+ = 6600$ м/с и $v_- = 0$, получаем

$$R = R_0 + (1/a) \ln [1 + av_+(t - t_0)], \quad (2)$$

где $a = 0,75 \rho_- C_d / d \rho_+$; R_0 , t_0 — начальные координата и время.

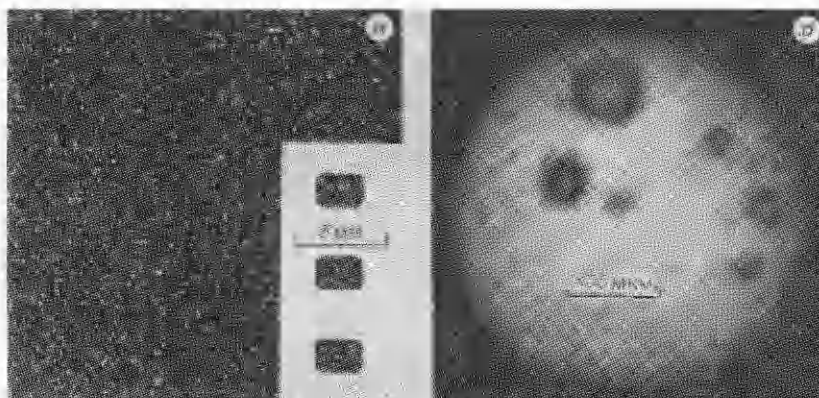


Рис. 5.

Для определения коэффициента a использованы экспериментальные зависимости радиус — время для ПВ в диапазоне времени 0—50 мкс. Кривая торможения частиц к-фазы, рассчитанная по (2), представлена на рис. 4, 4. Ход этой линии повторяют экспериментальные кривые расширения. Верхняя оценка размера (диаметра) частиц к-фазы (углерод), рассчитанная по (2), дает величину ~ 30 мкм. Аналогичные эксперименты и расчеты, проведенные для ПВ флегматизированных октогена и гексогена, дали такие же качественные результаты.

Подобные доводы для согласования экспериментальных результатов с расчетами можно использовать и для объяснения разлета ПВ от зарядов цилиндрической формы. Образующаяся на начальной стадии к-фаза несет информацию о начальной форме заряда ВВ и начальном распределении газодинамических параметров течения.

Наличие крупных частиц к-фазы в ПВ проверялось экспериментально по аналогии с работой [13]. Для этого на расстоянии ~ 300 мм от центра заряда (см. рис. 4, в) располагался массивный стальной диск, на поверхность которого предварительно накатывались с вакуумной смазкой фторопластовая пленка толщиной $\Delta = 10$ мкм и медная фольга с $\Delta = 30$ мкм. Эксперименты выполнялись в условиях разрежения. В результате воздействия ПВ поверхности пленки и фольги оказались покрытыми кратерами (рис. 5, а, б соответственно).

По результатам обмеров диаметров кратеров и их статистической обработки строились гистограммы распределений. Во всех случаях получались ярко выраженные полигоны логарифмически нормальных распределений. Их максимумы соответствуют 30 мкм для случая с флегматизированным гексогеном и 20 мкм для опытов с тротилом. Число кратеров, имевших большие размеры, вплоть до 100 мкм, для тротила составляли $\sim 15\%$ от общего числа, а для флегматизированного гексогена $\sim 20\%$. Оценки, проведенные в соответствии с работой [14], показывают, что диаметр кратера превосходит диаметр ударяющей частицы не более чем в 2—3 раза. Поэтому о порядке характерных размеров частиц можно судить по диаметру кратера. Следовательно, в реальных ПВ тротила и флегматизированного гексогена присутствуют в достаточно большом количестве частицы, диаметр которых по крайней мере больше 10 мкм.

Таким образом, можно полагать, что при теневой фоторегистрации расширения ПВ разрядов ВВ фиксируется облако полидисперсных частиц конденсированной фазы, наиболее крупные частицы которой (диаметром ~ 30 мкм) и определяют конфигурацию и скорость границы ПВ при фоторегистрации.

Авторы выражают признательность В. Л. Загускину за полезные обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский М. А. // Физика взрыва.— М.: Изд-во АН СССР, 1952.— № 1.
2. Brode H. L. // Phys. Fluids.— 1959.— N 2.— P. 217.
3. Фонарев А. С., Чернявский С. Ю. // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1968.— № 5.— С. 169.
4. Шуршалов Л. В. // ЖВММФ.— 1973.— 13, № 4.— С. 971.
5. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. Н. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
6. Сысоев Н. Н., Шугаев Ф. В. Ударные волны в газах и конденсированных средах.— М.: Изд-во МГУ, 1987.
7. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропотекающих процессов.— М.: Наука, 1975.
8. Завьялов Ю. С., Квасов Б. П., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций.— М.: Наука, 1980.
9. Анисимов С. И., Зельдович Я. Б. // Письма в ЖТФ.— 1977.— 3, № 20.— С. 1081.
10. Kury J. W., Hornig H. C., Lee E. L. et al. // 14th (Int.) Symp. on Detonation.— White Oak, 1965.
11. Рождественский В. В., Христофоров Б. Д., Юрьев В. Л. // Влияние неустойчивости Рэля — Тейлора на радиационные характеристики взрыва ВВ в воздухе // ПМТФ.— 1989.— № 2.— С. 173.
12. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1978.
13. Беляев А. Ф., Харитон Ю. Б. // Детонация конденсированных и газовых систем.— М.: Наука, 1986.
14. Мерзиевский Л. А., Титов В. М. Высокоскоростной удар // ФГВ.— 1987.— 23, № 5.— С. 92.

г. Москва

Поступила в редакцию 18/1 1990,
после доработки — 25/V 1990

УДК 662.215

Urtiew P. A., Hayes B.

PARAMETRIC STUDY OF THE DYNAMIC JWL-EOS FOR DETONATION PRODUCTS¹

The JWL equation of state describing the adiabatic expansion of detonation products is revisited to complete the description of the principal eigenvalue, to reset the secondary eigenvalue to produce a well-behaved adiabatic gamma profile, and to normalize the characteristic equation of state in terms of conventional parameters having a clear experimental interpretation. This is accomplished by interjecting a dynamic flow condition concerning the value of the relative specific volume when the particle velocity of the detonation products is zero. In addition, a set of generic parameters based on the statistical distribution of the primary explosives making up the available data base is presented. Unlike theoretical and statistical mechanical models, the adiabatic gamma function for these materials is seen to have a positive initial slope in accord with experimental findings.

Introduction

Equations of state of detonation products are mathematical expressions which characterize particle streamlines following the chemical reaction zone. They are used by research groups and laboratories to predict, simulate, and compare natural flow trajectories associated with energetic materials.

Presently, there are several renowned equations of state (EOS) for the detonation products. Each of these state equations was developed specifically to satisfy certain criteria and is used primarily by its originator. When it comes to choosing one EOS over another there are no clearly established rules. The choice usually is based on the ability to accommodate the algorithm into a computer program and its adaptability to desired changes and modifications. As an example, in his early review of compressibility of water, MacDonald [1] described four different polynomial and seven exponential equations of state that were applicable to solids and liquids. While demonstrating their usefulness he found none of them to be superior to any of the others.

¹ Work performed under the auspices of the U. S. Department of Energy by the Lawrence Livermore National Laboratory under contract No. W-7405-ENG-48.