

по горению капель серы в потоке воздуха. Скорость потока воздуха влияет на интенсивность горения капель при ее величине менее 3,5 м/с. Дальнейшее повышение скорости потока воздуха незначительно сказывается на величине константы скорости горения. Поэтому полученную в опытах величину энергии активации следует отнести к диффузионным процессам.

При повышении температуры окружающей среды происходит незначительное увеличение скорости горения капель серы за счет диффузионной составляющей горения. На взрывное горение повышение температуры почти не влияет, так как интенсивность взрывного горения капель серы определяется лишь скоростью перегруппировки молекулы жидкой серы, изменить которую можно, лишь увеличив или уменьшив температуру на поверхности капли, а она при горении постоянна и равна температуре кипения (444,6°C).

*Поступила в редакцию  
29/V 1979*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Hellem, A. Williams. *Combustion and Flame*, 1973, 20, 1, 133.
2. А. П. Шелякин, И. С. Капошин. *ЖПХ*, 1977, 50, 2, 416.
3. Основы практической теории горения. Под ред. В. В. Померанцева. Л., Энергия, 1973.
4. Теория топочных процессов. Под ред. Г. Ф. Кнорре, И. И. Палеева. М.—Л., Энергия, 1966.
5. А. П. Шелякин, С. В. Закарян и др. Докл. АН СССР, 1978, 239, 5, 1161.

### О ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ И ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

*В. Ф. Анисичкин  
(Новосибирск)*

Изучение ударной сжимаемости конденсированных веществ показало, что многие из них претерпевают фазовые превращения, в сложных веществах за короткие времена ударного сжатия протекают химические реакции. Такие вещества, как алмаз и нитрид бора, получены непосредственно с помощью взрыва. Ударно-волновые эксперименты — источник важных предварительных сведений о возможностях синтеза новых веществ в статических условиях, хотя механизмы протекания превращений в динамических и статических случаях могут существенно отличаться [1].

Нахождение фазовых переходов или химических реакций во фронте ударной волны могут указывать: изменение состава сохраненного вещества, резкие изменения сопротивления, прозрачности и других свойств непосредственно за ударным фронтом. При изучении переходов в твердом состоянии перспективна рентгеноимпульсная съемка [2]. Некоторые данные о превращениях можно получить из ударной сжимаемости веществ, так как скачкообразные изменения свойств приводят к изломам ударной адиабаты [3, 4]. Химические реакции при динамическом нагружении рассмотрены в [5].

Недостаток существующих методов анализа превращений заключается в трудности идентификации состояния и химического состава вещества непосредственно за ударным фронтом, в невозможности по из-

лomu ударной адиабаты отличить фазовый переход от химической реакции. По ударной адиабате превращенного вещества лишь приближенно удастся оценить плотность при нормальных условиях и некоторые другие свойства фазы высокого давления [6]. Предлагаемый ниже метод позволяет по ударной адиабате находить плотность превращенного вещества при нормальных давлении и температуре и эффективный молекулярный вес непосредственно за фронтом ударной волны.

В работе [7] показано, что большинство конденсированных веществ делится на две группы так, что ударные адиабаты веществ одной группы оказываются геометрически подобными с точностью до экспериментальных ошибок в координатах массовая скорость — скорость ударной волны. Коэффициент подобия для веществ первой группы, в которую входят элементы, находящиеся в первой половине каждого периода системы Д. И. Менделеева, удовлетворительно описывается функцией, зависящей от начальной плотности вещества  $\rho_0$ , молекулярного веса  $\mu$  и заряда ядра  $z$  так, что обобщенная ударная адиабата имеет следующий вид:

$$D = u + 3,4(\rho_0/\mu)^{1/3} \cdot (z/\mu) \cdot u^{1/2} + 98(\rho_0/\mu)^{2/3} \cdot (z/\mu)^2, \quad (1)$$

где  $D$  — скорость ударной волны;  $u$  — массовая скорость. Во вторую группу входят остальные элементы и некоторые химические соединения простого строения:  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CS_2$ ,  $CCl_4$  и т. д. Обобщенная ударная адиабата веществ этой группы имеет вид

$$D = u + 3,4(\rho_0/\mu)^{1/3} \cdot u^{1/2} + 9,1(\rho_0/\mu)^{2/3}. \quad (2)$$

Алмаз — единственное вещество, ударная адиабата которого не описывается соотношением (2). Усложнение эмпирической аналитической зависимости (2) легко устраняет этот недостаток, что, однако, нецелесообразно делать из-за одного вещества.

В работе [8] предложено простое соотношение, связывающее давления  $p_r$  и  $p_n$  на ударных адиабатах сплошного и пористого веществ соответственно:

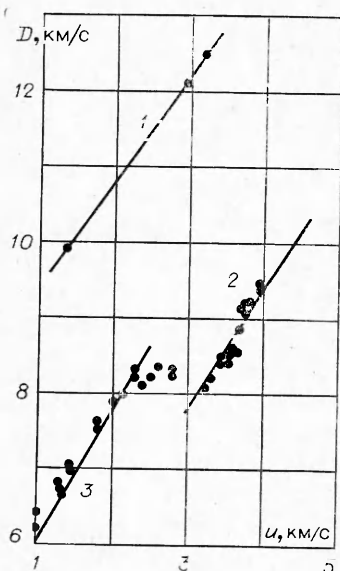
$$p_r/p_n = \rho_{0n}/\rho_0, \quad (3)$$

где  $\rho_{0n}$  — начальная плотность пористого вещества. Соотношение (3) справедливо, если не учитывать влияние пор и их содержимого на ударную сжимаемость. Пример такого «пористого» вещества — углерод. Для сильной ударной волны несущественны связи атомов перед фронтом. Поэтому после фазового перехода графита с  $\rho_0 = 2,2$  г/см<sup>3</sup> в алмаз ударную адиабату можно рассматривать как соответствующую пористому алмазу с  $\rho_{0n} = 2,2$  г/см<sup>3</sup>. «Пористыми» в этом смысле можно считать любые вещества со скачкообразно меняющейся в результате фазового перехода или химической реакции плотностью.

Из (2), (3) вместе с уравнением сохранения вещества при переходе через ударный фронт и для двух известных экспериментальных точек на ударной адиабате превращенного вещества имеем систему, включающую 6 уравнений для 6 неизвестных. Уравнение (2) выбрано потому, что в рассматриваемых ниже примерах все вещества входят во вторую группу:

$$\begin{aligned} D_i &= u_i + 3,4(\rho_0/\mu)^{1/3} \cdot u_i^{1/2} + 9,1(\rho_0/\mu)^{2/3}, \\ \rho_0 D_i u_i / \rho_{0n} D_{ni} u_{ni} &= \rho_{0n} / \rho_0, \quad i = 1, 2, \\ (1 - u_{ni}/D_{ni}) / \rho_{0n} &= (1 - u_i/D_i) / \rho_0. \end{aligned} \quad (4)$$

В систему (4) входят следующие известные величины:  $\rho_{0n}$  — начальная плотность вещества, которое считаем «пористым» по отношению к фазе высокого давления,  $u_{ni}$ ,  $D_{ni}$  — экспериментальные точки на ударной адиабате превращенного вещества (после излома ударной адиабаты). Неизвестные искомые величины:  $u_i$ ,  $D_i$  — точки на гипотетической удар-



ной адиабате фазы высокого давления;  $\rho_0$  — плотность фазы высокого давления при нормальных условиях;  $\mu$  — средний молекулярный вес превращенного вещества. В случае фазового перехода молекулярный вес вещества не меняется и  $\mu$  становится известной величиной. Если известна ударная адиабата фазы высокого давления, например, алмаза в системе графит — алмаз, то первое уравнение системы (4) можно исключить.

Рассмотрим переход графита в алмаз. Этот фазовый переход изучен наиболее полно как экспериментально, так и теоретически, что дает возможность всестороннего сравнения имеющихся результатов и получаемых решением системы (4). На рисунке показана найденная из эмпирического соотношения (2) ударная адиабата графита (кривая 3) с  $\rho_0 = 2,2 \text{ г/см}^3$  вместе с экспериментальными точками [9]. В качестве двух точек  $u_i, D_i$  на ударной адиабате алмаза

взяты экспериментальные данные [9] (кривая 1). Кривая 2 рассчитана из второго и третьего уравнений системы (4) в предположении, что произошел полный переход графита в алмаз. Видно, что расчет совпадает с экспериментальными данными [9].

Другой пример перехода при ударном сжатии в германии. Подстановка двух известных значений  $u_{pi}, D_{pi}$  на ударной адиабате превращенного вещества [6] в систему (4) дает плотность фазы высокого давления при нормальных условиях  $\rho_0 = 6,85 \text{ г/см}^3$ . В [6] путем сложных приближенных расчетов найдено, что плотность претерпевшего фазовое превращение германия должна составлять  $7,29 - 6,79 \text{ г/см}^3$ .

Из химических реакций в ударной волне достаточно полно изучено превращение жидкого сероуглерода  $\text{CS}_2$  с плотностью  $1,26 \text{ г/см}^3$  [10]. Предполагается, что в ударной волне происходит разложение  $\text{CS}_2$  на углерод и серу. Решение системы (4) с использованием точек  $u_{pi}, D_{pi}$  на известной ударной адиабате превращенного вещества приводит к следующим результатам. Плотность превращенного вещества при нормальных условиях должна быть равна  $2 \text{ г/см}^3$ , а средний молекулярный вес — 35, что приблизительно соответствует смеси углерода с  $\mu = 12$  и  $\rho_0 = 2,2 \text{ г/см}^3$  и серы с  $\mu = 32, \rho_0 = 1,9 \text{ г/см}^3$ . При анализе химической реакции в бензоле и четыреххлористом углероде [10] решение системы (4) приводит к выводу, что и в этих случаях происходит разложение вещества во фронте ударной волны.

Приведенные примеры показывают, что с помощью системы уравнений (4) можно легко получить важные сведения о проходящих при ударном сжатии фазовых переходах и химических реакциях. Недостатки предлагаемого метода заключаются в чувствительности системы (4) к экспериментальным ошибкам при нахождении ударных адиабат и в приближенности уравнений (1), (2), что может привести к неправильным выводам при рассмотрении химической реакции в случае неярко выраженного излома ударной адиабаты.

Автор признателен В. М. Титову за внимание к работе.

Поступила в редакцию  
7/VI 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Carl-Otto Leiber. High Temperatures — High Pressures, 1977, 9.
2. R. N. Keeler. Abstracts for the 6-th AIRAPT International High Pressure Conference. The University of Colorado, Boulder, 1977.

3. George E. Duvall and Y. Horie. Proceedings Fourth Symposium (International) on Detonation, White Oak, Maryland, 1965.
4. Л. В. Альтшулер. ПМТФ, 1978, 4.
5. С. С. Бацанов.— В сб.: Детонация. Черноголовка, 1978.
6. Р. Мак-Куин, С. Марш и др.— В сб.: Высокоскоростные ударные явления. М., Мир, 1973.
7. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 2.
8. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 6.
9. R. G. McQueen, S. P. Marsh. Symposium on the «Behavior of Dense Media under High Dynamic Pressure», IUTAM, Paris, 1967.
10. Richard D. Dick J. Chem. Phys., 1970, 52, 12.

## ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕВЫХ ВВ

Л. Н. Акимова

(Москва)

Смесевые взрывчатые вещества типа окислитель — горючее в области, где параметры детонации зависят от диаметра заряда, обладают рядом особенностей, которые отличают их от индивидуальных ВВ [1]. Эти особенности обусловлены наличием реакций взаимодействия продуктов разложения компонентов смеси. Настоящее исследование продолжает работу [1] и посвящено изучению детонационной способности смесей тэна, октогена и тротила с перхлоратом аммония, а также смесей тротила с перхлоратом калия в широком диапазоне изменения состава смеси. Параллельно в качестве инертной добавки использован хлористый калий, имеющий близкую с перхлоратом аммония плотность.

Исследованы смеси с дисперсностью компонентов 0,13 мкм (фракция — 0,16 + 0,1). При работе выдерживалась постоянная плотность заряда: 1,20 г/см<sup>3</sup> для зарядов тэна и октогена с перхлоратом аммония и 1,1 г/см<sup>3</sup> для зарядов на основе тротила. Исключение составляли смеси тротила с большим содержанием перхлоратов аммония и калия (80%). Для этих смесей плотность приходилось увеличивать до 1,2 г/см<sup>3</sup>, но относительная плотность зарядов при этом изменялась незначительно. Опыты проводились с зарядами длиной 15—20 диаметров в целлофановых оболочках толщиной 0,05 мм.

Поскольку детонационная способность тэна высока, критический диаметр тэна с добавками ПХА и КСl удалось измерить лишь при содержании добавки ( $\alpha$ ) от 70% и более (табл. 1, рис. 1). При содержании добавки менее 70% детонация в заряде с  $d = 3$  мм происходит в обеих смесях, но наблюдается разница в скоростях детонации: смеси с КСl детонируют с меньшей скоростью. При содержании добавки выше 70% смеси с КСl имеют более высокие критические диаметры и более низкие критические скорости детонации, чем смеси с ПХА. Это свидетельствует о том, что ПХА ведет себя активно в этих смесях. Аналогичные результаты получены и на смесях октогена с ПХА и КСl (табл. 2, рис. 2). Влияние ПХА на величину  $d_{кр}$  становится заметным лишь при  $\alpha = 70\%$  и более. При меньшем содержании ПХА не оказывает существенного влияния.

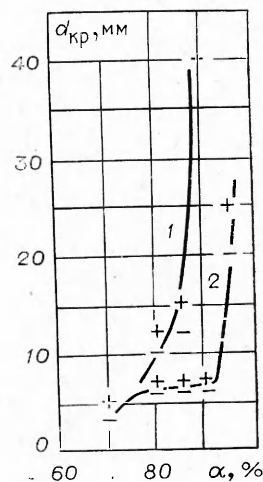


Рис. 1. Зависимость  $d_{кр}$  от состава для смесей тэна с КСl (1) и с ПХА (2).