

уменьшении p_0 от 2,5 атм вплоть до $p_{10}^* \simeq 0,8$ атм. Аналогичная картина, т. е. ПГД в области от $p_0 = 2,5$ атм до некоторого p^* , наблюдается и для других схем, описанных выше.

Наряду с описанными экспериментами значительный интерес представляет начальная стадия воспламенения многоочагового ламинарного пламени и его последующее ускорение. Оптимизация условий перехода горения в детонацию требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J. H. Initiation of gaseous detonation // Ann. Rev. Phys. Chem.— 1977.— 28.— P. 75—104.
2. Васильев А. А. Пространственное возбуждение многофронтной детонации // ФГВ.— 1989.— 25, № 1.— С. 113—119.
3. Knystautas R. et al. Direct initiation of spherical detonation by a hot turbulent gas jet // 17th Symp. (Int.) on Combust.— 1978.— P. 1235—1245.
4. Moem I. O. et al. Transition to detonation in a flame jet // Combust. Flame.— 1989.— 75.— P. 297—308.
5. Liu Y. K., Lee J. H., Knystautas R. K. Effect of geometry on the transmission of detonation through an orifice // Ibid.— 1984.— 56.— P. 215—255.
6. Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчий М. Е. Детонационные волны в газах // ФГВ.— 1987.— 23, № 5.— С. 109—131.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 25/VII 1991,
после доработки — 30/IX 1991

УДК 534.222.2

В. А. Пырьев, В. С. Соловьев

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В результате анализа имеющихся экспериментальных и теоретических результатов исследований детонации вторичных ВВ построена диаграмма детонационных характеристик гексогена в координатах скорость детонации, диаметр, плотность цилиндрического заряда. Диаграмма с единых позиций представляет детонацию зарядов различной структуры (монокристалл, аэровзвесь, прессованный или насыпной заряды) в предельном, критическом и неидеальном режимах. Она позволяет по-новому трактовать зависимость скорости детонации от плотности зарядов разного диаметра, а также определять параметры заряда, детонирующего с требуемой скоростью.

Исследование детонационных явлений проводится не одно десятилетие. За это время подробно изучены основные параметры, характеризующие этот процесс. В числе других получены для многих взрывчатых веществ (ВВ) экспериментальные зависимости скорости детонации от диаметра цилиндрического заряда $D(d)$ при различных плотностях, скорости детонации от плотности заряда $D(\rho)$ при различных диаметрах зарядов и критического диаметра от плотности заряда $d_{кр}(\rho)$. Максимальную (идеальную) скорость детонации D_∞ получали по экспериментальной зависимости скорости детонации от обратного диаметра $D\left(\frac{1}{d}\right)$ при $\frac{1}{d} \rightarrow 0$. Кроме того, теоретические численные расчеты по термодинамическим моделям позволяют определить зависимость идеальной скорости детонации от плотности заряда $D_\infty(\rho)$.

Отметим, что указанные зависимости носят разобщенный характер потому, что, как правило, они рассматривались отдельно друг от друга, а их значения получены в узком диапазоне изменения диаметров и плотности.

В данной работе на примере ВВ типа гексогена предпринята попытка обобщить эти результаты во всем диапазоне возможных физико-механических структур заряда, на одной плоскости свести зависимости $D(d)$ и $D(\rho)$. При анализе использовались данные работ [1—7] и результаты

представленного исследования. Вместе с тем из-за недостатка материала придется воспользоваться ссылками на некоторые примеры для других ВВ и исходить из возможной аналогии при анализе общей картины детонации подобных зарядов.

Будем считать, что цилиндрические заряды состоят из частиц одного диаметра и под это условие подбирать опытные данные. Во всем диапазоне плотностей зарядов физико-механическая структура различается: монокристалл, чистый или с каркасным наполнителем насыпные заряды, аэрозоль. Предельная скорость детонации $D_{пр}$, согласно [1], составляет 98 % от идеальной, поэтому считаем, что $D_{пр} \approx D_{\infty}$. В этом случае для гексогена и ВВ подобного типа характерно следующее:

$$\frac{\partial D}{\partial \rho} > 0 \text{ при } d = \text{const}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial D}{\partial d} > 0 \text{ при } d_{кр} < d < d_{пр}, \rho = \text{const}, \quad (2)$$

$$D = D_{пр}, \frac{\partial D}{\partial d} = 0 \text{ при } d \geq d_{пр},$$

$$D = D_{кр} \text{ при } d = d_{кр},$$

где $d_{пр}$ — предельный диаметр заряда; $D_{кр}$ — критическая скорость детонации заряда данной плотности;

$$d_{кр} \rightarrow d_{пр}, D_{кр} \rightarrow D_{пр} \text{ при } \rho \rightarrow \rho_{пр}, \quad (3)$$

где $\rho_{пр}$ — предельная плотность заряда (максимальная плотность, соответствующая плотности монокристалла).

Детонация считается идеальной при $D = D_{пр}$ и неидеальной при $D_{кр} \leq D < D_{пр}$.

Закономерности стационарной высокоскоростной детонации (1)–(3) заряда гексогена представим диаграммой, построенной в координатах D, ρ, d (см. рисунок). Назовем ее диаграммой детонационных характеристик ($D, d_{кр}, d_{пр}, \rho, d, D_{кр}, D_{пр}$). Она представляет собой совокупность функциональных зависимостей скорости детонации от диаметра заряда при заданной плотности $D(d, \rho = \text{const})$ (кривые 1–3) и от плотности ВВ при определенном диаметре заряда $D(\rho, d = \text{const})$ (кривая 6), а также зависимости плотности заряда от диаметра ВВ, обеспечивающих фиксированную скорость детонации $\rho(d, D = \text{const})$ (кривая 9) в плоскостях координат $(D, d), (D, \rho), (d, \rho)$.

Введем понятие поверхности детонационных характеристик ВВ. Каждая точка этой поверхности соответствует скорости детонации заряда конкретного диаметра и плотности. Теперь зависимости диаграммы

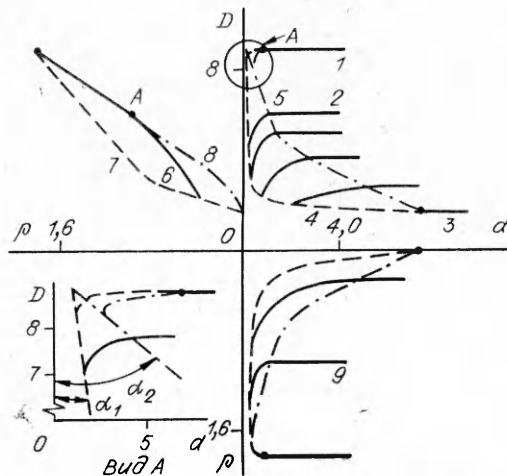
детонационных характеристик являются проекциями линий пересечения с поверхностью детонационных характеристик секущих плоскостей, параллельных соответствующим плоскостям координат.

На плоскости (D, d) имеем типичные зависимости $D(d)$, которые часто аппроксимируют уравнением вида [1]:

$$D = D_{\infty} \left(1 - \frac{a_1}{d - a_2} \right),$$

где a_1, a_2 — константы ВВ данной плотности.

Через их критические и предельные точки проходят кривые 4, 5 скоростей детонации, соответ-



ствующих критическим $D_{кр}(d_{кр})$ и предельным $D_{пр}(d_{пр})$ значениям диаметров зарядов различной плотности. Они являются проекциями критических $D_{кр}(d_{кр}, \rho)$ и предельных $D_{пр}(d_{пр}, \rho)$ кривых поверхности детонационных характеристик на плоскость (D, d) .

В диапазоне плотностей $(1,77 \div 1,81) \cdot 10^3$ кг/м³, соответствующем переходу от прессованной к монокристаллической структуре, вид $D_{кр}(d_{кр})$, $D_{пр}(d_{пр})$ не определен и их можно интерполировать по-разному. При линейной аппроксимации кривые пересекаются на уровнях критического диаметра прессованного заряда и скорости детонации монокристалла. Следовательно, на последнем они должны претерпевать функциональный разрыв к параметрам детонации монокристалла.

В других случаях кривые существенно меняют свое поведение, монотонно стремясь к соответствующим параметрам детонации монокристалла. Причем зависимость $D_{пр}(d_{пр})$ терпит разрыв при переходе от предельных к критическим параметрам (условие $d_{пр} \rightarrow d_{кр}$) или при $d_{кр} = d_{пр}$ пересекается с кривой $D_{кр}(d_{кр})$. Последний случай и приведен на диаграмме. При плотности 900–700 кг/м³ зависимости $D_{кр}(d_{кр})$ и $D_{пр}(d_{пр})$ резко изменяют наклон. Именно в этом диапазоне плотностей происходит изменение механизма распространения детонации [3, 4]. Углы наклона этих кривых к оси $OD - \alpha_1, \alpha_2$ соответственно, и разница $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ определяются структурными и термокинетическими характеристиками ВВ. Для ВВ с открытой пористостью (прессованные) значения $\alpha_1, \alpha_2, \Delta\alpha$ меньше, чем для ВВ с закрытой пористостью (литые), и для индивидуальных ВВ меньше, чем для механической смеси ВВ с инертной добавкой.

С уменьшением плотности заряда ниже плотности монокристалла зависимости $D(d)$ имеют тенденцию к «выполаживанию»: увеличивается неидеальный участок по диаметру заряда (разница между $d_{пр}$ и $d_{кр}$) и уменьшается разница между $D_{пр}$ и $D_{кр}$. При достижении некоторой минимальной, критической плотности $\rho_{кр}$, для которой еще реализуется стационарный процесс, скорость детонации будет иметь минимальное значение для данного ВВ и не зависеть от диаметра системы, в которой находится аэровзвесь. Опыты подтверждают [8], что скорость детонации аэродисперсных систем высокоэнергетических материалов не зависит от диаметра заряда, причем она была ниже соответствующего рассчитанного термодинамического значения из-за несовершенства расчетной модели. Кроме этого, при критической плотности кривая $D_{пр}(d_{пр})$ терпит разрыв. Условие (3) будет дополнено соотношениями:

$$d_{кр} \rightarrow d_{пр}, D_{кр} \rightarrow D_{пр} \text{ при } \rho \rightarrow \rho_{кр}.$$

Положение нижней границы детонационной способности гексогена не определено и зависит от многих известных факторов. На данный момент зафиксирована [5] детонация со скоростью 1680 м/с аэровзвеси гексогена плотностью 1,3 кг/м³, заключенной в стальную трубу диаметром 73 мм. Это значение можно принять в качестве нижнего порога детонации гексогена.

На плоскости (D, ρ) приведены зависимости скорости детонации зарядов разного диаметра от плотности. Для них характерно то, что от плотности монокристалла до некоторой плотности (точка А для линии 6), различной для зарядов разного диаметра, кривая $D(\rho)$ совпадает с предельной скоростью детонации $D_{пр}(d_{пр})$ (линия 8). Далее с уменьшением плотности начинается неидеальный участок зависимости, который заканчивается точкой на критической кривой $D_{кр}(\rho)$ плоскости (D, ρ) (кривая 7).

При изучении влияния плотности на скорость детонации зарядов разного диаметра [6] опытные данные аппроксимируют сходящимися с предельной кривой в одной точке прямыми $D = a_4 + a_3\rho$. Диаграмма же указывает, что эти линии не прямые, а с изломом, сходятся не в одной точке, а на одной кривой, соответствующей предельной скорости детонации. Причем для каждого диаметра заряда при определенной плотности

существует этот переход с идеальной на неидеальную ветвь зависимости. Данный излом для $D(\rho)$ не связан с изломом кривой $D_{пр}(\rho)$ из-за изменения конечного состава продуктов взрыва [6]. Результаты численных расчетов трактуют последний с разных позиций: смещения термодинамического равновесия в сторону образования продуктов с меньшим эффектом тепловой реакции [7], изменения механизма конденсации углерода [9] и др.

Для гексогена он наблюдается при $\rho = 1100$ кг/м³. Можно было бы на примере гексогена данный излом трактовать и с позиции смены механизма распространения детонации при $\rho = 800 \div 1000$ кг/м³. Однако тогда эта интерпретация не объяснит изломы $D_{пр}(\rho)$ для тэна [7], тротила и ТГ50/50 [9] при $\rho = 1400, 1550, 1450$ кг/м³ соответственно. Вместе с тем именно при этой плотности для гексогена происходит резкое изменение кривизны зависимости $D_{пр}(\rho)$. Таким образом, механизм детонации, а следовательно, и структура заряда определяют критические условия распространения детонации, что подтверждает результаты работы [10].

На плоскости (d, ρ) построены функциональные зависимости между плотностью и диаметром зарядов, обеспечивающих заданную скорость детонации. Любая из них является линией пересечения плоскости $D = \text{const}$ с поверхностью детонационных характеристик. Данные кривые получаются только геометрическим построением при наличии экспериментально полученного набора зависимостей $D(\rho)$ или $D(d)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика взрыва/Под ред. К. П. Стацюковича.— М.: Наука, 1975.— 704 с.
2. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ.— М.: Мир, 1973.— 352 с.
3. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах.— М.: Наука, 1970.— 164 с.
4. Соловьев В. С., Андреев С. Г., Леванговский А. В. и др. Горение и взрыв: Материалы третьего Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— М.: Наука, 1972.— 451 с.
5. Lee F. F., Kauffman C. W., Sichel M. et al. AIAA 23rd Aerospace sci. meeting.— Reno (USA), 1985.
6. Имховик Н. А., Соловьев В. С. // Детонация: Материалы IX Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черногоровка, 1989.
7. Steinberg D. J. // 8th Symp. (Int.) on Detonation.— Albuquerque (USA), 1985.
8. Борисов А. А., Хасанов Б. А., Вейсьер Б. // Хим. физика.— 1991.— 10, № 2.— С. 250.
9. Дремин А. И., Першин С. В., Пятернев С. В. и др. Об изломе зависимости скорости и детонации от начальной плотности ТНТ // ФГВ.— 1989.— 25, № 5.— С. 141.
10. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н. и др. Исследование детонации сильно-разбавленных пористых ВВ. I. Влияние инертной добавки на параметры детонации // Там же.— 1980.— 16, № 3.— С. 92.

г. Москва

Поступила в редакцию 27/VIII 1991

УДК 532.529 + 541.126

А. В. Федоров

СТРУКТУРА ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ, ДИСПЕРГИРОВАННЫХ В КИСЛОРОДЕ

Дан обзор работ в области математического моделирования интегральных и локальных параметров гетерогенной детонации аэрозвесей. Постановка задачи об иницировании детонации смеси частиц алюминия и кислорода, воздействия створенного объема газозвесей на окружающую среду дана в рамках неравновесного одномерного, нестационарного течения. Проведен анализ стационарных течений газозвесей алюминия с кислородом, получено удовлетворительное согласие расчетных данных по зависимости скорости детонации от содержания частиц с экспериментальными.