

## ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ

А. А. Васильев

(Новосибирск)

В изучении вопросов нестационарного распространения взрывных волн в химически активных газовых смесях достигнут значительный прогресс [1, 2], но проблема определения энергии инициирования газовой детонации до сих пор, как правило, решается с помощью эксперимента. Это связано с тем, что расчетные в рамках модели точечного взрыва минимальные энергии инициирования оказываются на 3—4 порядка выше экспериментальных величин.

В данной работе предлагается оценка энергии инициирования многофронтной газовой детонации, основанная на предположении, что энергия инициирования детонации  $E$  в определенное число раз превышает энергию соударения поперечных волн  $E_1$ , имеющую в элементарной ячейке смысл энергии инициирования. Для определения коэффициента между  $E$  и  $E_1$  используются эксперименты, согласно которым многофронтная детонационная волна после выхода из узкого канала в широкую распространяется без затухания лишь в том случае, если ширина детонационного канала  $d$  больше критической величины  $d_*$ . При этом рассматривается направление, перпендикулярное оси канала, когда основную роль в поддержании детонационной волны играет лишь статическое давление продуктов.

Следует ожидать, что энергия  $E$  прямого инициирования многофронтной детонации во столько раз превышает энергию инициирования элементарной ячейки, во сколько раз площадь круга (цилиндрический случай), диаметр которого совпадает с предельной шириной канала  $d_*$ , превышает площадь элементарной ячейки. Рассматривая в первом приближении ячейку как ромб с диагоналями  $a$  и  $b$ , определим ее площадь как  $a \cdot b / 2$ . Тогда

$$E = E_1 \cdot \pi d_*^2 / 2ab. \quad (1)$$

При изучении выхода детонации из узкой трубки в объем [3] выяснено, что для дальнейшего распространения сферической детонационной волны необходимо, чтобы диаметр трубки был примерно в 10—15 раз больше поперечного размера ячейки  $a$ . Подобная величина приведена в [4, 5], и для случая распространения цилиндрической волны необходимо, чтобы ширина плоского канала была примерно на порядок больше  $a$ .

Выполненные в данной работе эксперименты (в постановке, аналогичной работам [4, 5]) показали, что величина  $d_*/a = 10 \div 15$  требуется для дальнейшего распространения цилиндрической волны лишь в случае очень малых ( $< 0,5 a$ ) глубин плоского канала, когда заметную роль играют потери. При глубинах канала  $\sim 1,5 a$  и выше необходимое количество ячеек, укладываемых на ширине канала, уменьшается примерно вдвое, т. е.  $d_* \approx (5 \div 7) a$ . Поскольку для большинства смесей  $a/b \approx 0,6$ , то из (1) получаем

$$E \approx (25 \div 50) E_1. \quad (2)$$

В работе [6] для  $E_1$  в случае цилиндрической симметрии приведено

$$E_1 \approx 4\epsilon\alpha\rho_0 D_0^2 b^2, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность смеси;  $D_0$  — скорость одномерной детонации Чепмена — Жуге;  $b$  — продольный размер ячейки;  $\alpha$  — коэффи-

циент, определяемый из закона сохранения энергии в автомодельной задаче о сильном точечном взрыве в инертной среде и зависящий лишь от показателя адиабаты этой среды [1];  $\epsilon$  — величина, меняющаяся для различных газовых смесей не более чем на 20%. Для смеси  $C_2H_2+2,5O_2$  при  $p_0=0,1$  атм расчет с использованием модели элементарной ячейки [6] дает величину  $E_1=2,2 \cdot 10^4$  эрг/см. Тогда из формулы (2) получаем для энергии инициирования цилиндрической детонации при выбранных условиях величину  $0,055 \div 0,110$  Дж/см.

В [7] обнаружено, что для инициирования цилиндрической детонации с помощью взрывающейся проволоки для этих же условий эксперимента необходимо, чтобы запасенная конденсатором электрическая энергия  $CU^2/2$  была не менее чем 2,7 Дж/см. Полагая, что коэффициент полезного действия разрядной цепи в [7] примерно составляет 1—5% (эти цифры экспериментально получены в [13] для аналогичной установки), получим  $E=0,027 \div 0,135$  Дж/см, что практически совпадает с рассчитанными по формулам (2), (3) величинами. Объединяя формулы (1)—(3) и используя результаты [6], получим для энергии прямого инициирования многофронтной детонации приближенную формулу  $E \approx 2,5 \rho_0 D_0^2 b^2$ . Поскольку детонационная волна является многоячейковой, энергию соударения поперечных волн  $E_1$  можно рассматривать как энергию, ниже которой заведомо невозможно прямое инициирование стационарной (в смысле постоянства средней скорости распространения) многофронтной детонации.

Воспользовавшись расчетными данными о скорости одномерной детонации  $D_0$  и размере элементарной ячейки, определим по формуле (3)  $E_1$  для ряда газовых смесей. Так, для смеси  $C_2H_2+2,5O_2$  при  $p_0=0,1$  атм, как упоминалось выше, получим  $E_1=2,2 \cdot 10^4$  эрг/см. Принимая это значение за единицу, определим относительные величины  $E$  для других смесей (при  $p_0=0,1$  атм):

Смесь	$E_1/2,2 \cdot 10^4$ эрг/см
$C_2H_2+2,5O_2+10,5Ar$	45
$C_2H_2$ +воздух (стехиометрия)	6000
$2H_2+O_2$	1900
$2H_2+O_2+7Ar$	3250
$H_2$ +воздух (стехиометрия)	$3,2 \cdot 10^4$
$CH_4+2O_2$	3450
$CH_4$ +воздух (стехиометрия)	$6,5 \cdot 10^7$

Отметим увеличение  $E_1$  при разбавлении смеси Ar или  $N_2$  (воздух).

В силу линейной зависимости  $\lg a$  от  $\lg p_0$   $\rho_0 b \approx \text{const}$ ; тогда  $E_1 \sim \sim b \sim 1/p_0$ , т. е. энергия соударения поперечных волн, а следовательно, и энергия инициирования цилиндрической детонации убывает обратно пропорционально начальному давлению смеси.

По сути изложенного, формула (2) не применима для распределенного во времени энерговыделения электрическая искра с относительно большим временем разряда), а также для случая внесения дополнительной массы (инициирование зарядами твердого ВВ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Коробейников. Задачи теории точечного взрыва в газах. М., «Наука», 1973.
2. В. А. Левин. Докт. дис. МГУ, 1975.
3. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖТФ, 1976, 26, 8.
4. В. В. Митрофанов, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1964, 159, 5.
5. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
6. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев. ФГВ, 1976, 12, 5.
7. J. H. Lee, B. H. Lee, R. Knystautas. Phys Fluids, 1966, 9, 1.