

6. А. В. Пинаев. ФГВ, 1983, 19, 1.
 7. А. В. Пинаев, А. И. Сычев. ФГВ, 1982, 18, 6.
 8. С. А. Лесняк, М. А. Назаров, Я. К. Трошин.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1980.

ОЦЕНКА ЭНЕРГИЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ РАСПЫЛОВ

С. А. Ждан

(Новосибирск)

Один из важных вопросов исследования гетерогенной (газ — капли) детонации — определение критических условий ее возбуждения. Установлено [1—3], что детонация в двухфазной системе с каплями диаметром $d_0 \geq 100$ мкм инициируется только ударными волнами с определенными характеристиками. В экспериментах по возбуждению взрывной волны цилиндрической [4] и сферической [5] детонации распылов найдены критические энергии инициирования. Получение теоретических значений критических энергий, как правило, связано с существенными математическими трудностями. (Приходится решать [6—8] полную систему нестационарных уравнений механики гетерогенных сред [9].) Поэтому представляет интерес построение различных полуэмпирических моделей, позволяющих оценивать энергии возбуждения детонации распылов.

В данной работе на основе закономерности поведения минимума скорости нестационарной детонационной волны (НДВ), полученной из большого количества нестационарных расчетов, и экспериментальной связи между временем задержки воспламенения и временем разрушения капли описан простой алгоритм для оценок критических энергий инициирования гетерогенной (газ — капли) детонации.

1. Математическое моделирование нестационарных процессов [6—8], протекающих при прямом инициировании гетерогенной (газ — капли) детонации, позволило установить немонотонное поведение скорости D нестационарной детонационной волны. Для сверхкритических режимов инициирования распространяющаяся на начальной стадии ослабевающая пересажатая НДВ «проскакивает» значение стационарной детонации Чепмена — Жуге (D_0), достигает минимума D_{\min} и только после этого начинает медленно ускоряться, приближаясь снизу к значению D_0 . Такой характер поведения скорости детонации в двухфазной реагирующей среде есть следствие формирующейся за фронтом ударной волны (УВ) конечной зоны энерговыделения, длина которой определяется параметрами газа и капель за фронтом. Многочисленные расчеты сферического ($\nu = 3$), цилиндрического ($\nu = 2$) и плоского ($\nu = 1$) инициирования монодисперсных (диаметром d_0) распылов капель углеводородов в кислороде и воздухе показали, что дефект скорости НДВ $\Delta D = D_0 - D_{\min}$ практически прямо пропорционален диаметру капель d_0 и обратно пропорционален так называемому динамическому радиусу $r_0 = (E_{ov}/p_0)^{1/\nu}$, где E_{ov} — энергия инициирующего взрыва, Дж · м^{ν-3}; p_0 — начальное давление смеси, Н/м². На рис. 1 представлены относительные значения минимальных скоростей D_{\min}/D_0 в зависимости от параметра $z = 10^3 d_0/r_0$, где d_0 и r_0 — в метрах. Заметим, что в указанных переменных ΔD не зависит от ν . Найденные значения D_{\min} достаточно точно аппроксимируются простой аналитической зависимостью

$$D_{\min} = D_0(1 - 0,79z). \quad (1)$$

2. Время механической релаксации t_p в двухфазной среде определяется временем разрушения капель жидкости за фронтом УВ. Для широкого диапазона d_0 , скоростей относительного потока $u_1 - u_2$, плотностей жидкости ρ_2 экспериментально установлено, что полное время разрушения $t_p = 4 \div 5t_0$, где характерное время $t_0 = d_0(\rho_2/\rho_1)^{1/2}/(u_1 - u_2)$, ρ_1 — плотность газа за УВ. Важным параметром, характеризующим реакцион-

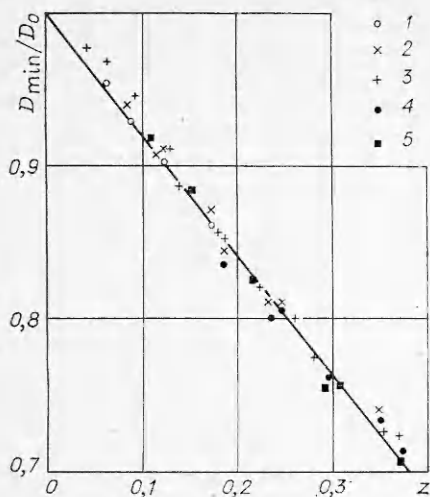


Рис. 1. Зависимость D_{\min}/D_0 от параметра z .
 d_0 , мкм: 1 — 200, 2 — 400, 3 — 600, 4 — 800, 5 — 1000.

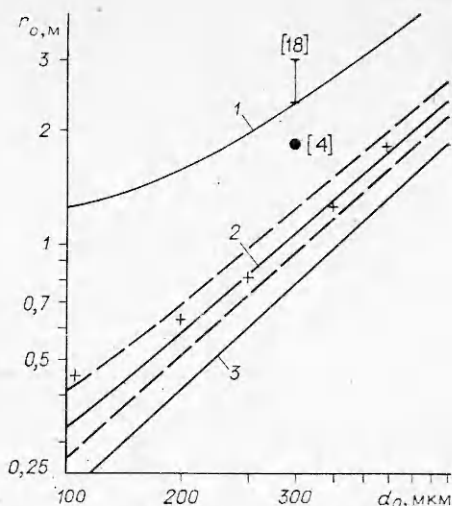


Рис. 2. Зависимости критических значений динамического радиуса от диаметра каплеи.

ную способность смеси, является время задержки воспламенения t_3 . Для гетерогенных систем t_3 включает в себя помимо периода индукции химических реакций (τ_n) дополнительно и время протекания подготовительных физических процессов (t_n): разогрев поверхности капли, срыв слоя жидкости с капли, перемешивание. В [10] показана возможность аддитивного представления t_3 в виде $t_3 = t_n + \tau_n$. Эксперименты по воспламенению капель жидкого горючего за проходящей УВ [11] в диапазоне детонационных чисел Маха $3 < M < 6$ позволили установить, что $t_n \approx 0,4t_0$. Период индукции химических реакций представим в виде аррениусовской зависимости

$$\tau_n = K[\text{O}_2]^\alpha (\rho_0/\rho_1)^n (T_0/T_1)^l \exp(\varepsilon/RT_1). \quad (2)$$

Здесь ρ_1 , T_1 — плотность и температура газа за фронтом УВ; ε — энергия активации; $R = 1,987$ кал/(моль · град) — газовая постоянная; $[\text{O}_2]$ — мольная концентрация кислорода в газе.

Экспериментальные исследования детонации в кислородных аэрозвесах углеводородов (см. обзоры [1, 2]) показали, что существует связь между соотношением времен t_3 и t_p и возможностью распространения детонационной волны. Установлено, что при

$$t_3 \leq 2,5t_0 \quad (3)$$

гетерогенная детонация возможна. Этот экспериментальный факт будет использован в дальнейшем для замыкания системы уравнений и получения оценок критических энергий инициирования гетерогенной детонации.

Критерий инициирования: взрыв с энергией E_{0v} инициирует гетерогенную (газ — капли) детонацию, если для возбужденной им НДВ в каждый момент времени справедливо неравенство (3).

Вследствие существования минимальной скорости НДВ достаточно проверять критерий инициирования при $D = D_{\min}$. Ясно, что для фиксированной газок капельной среды с падением энергии инициирования уменьшается значение D_{\min} и увеличиваются задержки воспламенения так, что при некоторой минимальной скорости волны неравенство (3) перестает выполняться. Будем называть энергию E_{0v}^* критической, если при $D = D_{\min}$ в (3) выполняется строгое равенство.

Параметры потока за УВ с введением эффективного показателя ударной адиабаты (γ_1) за фронтом представимы в виде [12]

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{1 + \gamma_0 M^2}{\gamma_1 + 1} + \frac{1}{\gamma_1 + 1} \left[(1 + \gamma_0 M^2)^2 - (\gamma_1^2 - 1) \left(\frac{2\gamma_0}{\gamma_0 - 1} M^2 - 1 \right) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\frac{u_1}{c_0} = \left(\frac{p_1}{p_0} - 1 \right) / \gamma_0 M, \quad \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{p_1/p_0 (\gamma_1 + 1) / (\gamma_1 - 1) + 1}{(\gamma_0 + 1) / (\gamma_0 - 1) + p_1/p_0}, \quad \frac{T_1}{T_0} = \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1}^{\gamma_1}$$

где $M = D/c_0$ — число Маха волны; $c_0 = \sqrt{\gamma_0 p_0 / \rho_0}$ — скорость звука; $\gamma_0 = 1,396$. Из термодинамического расчета параметров за УВ эффективный показатель адиабаты для кислорода в диапазоне $3 \leq M \leq 8$ с точностью не хуже $\pm 0,1\%$ можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\gamma_1 = 1,3737 - 2,075 \cdot 10^{-2}(M - 3) + 1,22 \cdot 10^{-3}(M - 3)^2. \quad (5)$$

Алгоритм расчета критических энергий состоит в следующем: при заданных параметрах конденсированной фазы из соотношений (2)–(5) итерациями по числу Маха находим такое значение M_{\min}^* , что в (3) выполняется строгое равенство. Подставив M_{\min}^* в (1), определим r_0^* , а следовательно, и значения критических энергий инициирования E_{0v}^* плоской, цилиндрической и сферической гетерогенной детонации. С изменением диаметра капель энергии инициирования E_{0v}^* , естественно, будут меняться.

3. По сформулированному алгоритму проведем оценки E_{0v}^* для взвесей капель керосина и гептана в кислороде: 1) керосин — O_2 ($\Phi = 1$); 2) керосин — O_2 ($\Phi = 0,33$); 3) гептан — O_2 ($\Phi = 1$), где $\Phi = m_{\text{гор}}/m_{\text{ст}}$ — эквивалентное отношение. Начальные параметры для кислорода: $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Н/м², $\rho_0 = 1,309$ кг/м³, $T_0 = 298$ К. Исходные данные для указанных взвесей и константы в выражении для периода индукции химических реакций ($\alpha = 0$, $\beta = 0$) приведены в табл. 1. Диаметр капель варьировался в диапазоне $100 \leq d_0 \leq 1000$ мкм. Для стехиометрической керосинокислородной взвеси рассчитанные по (1)–(5) значения M_{\min}^* , r_0^* , E_{0v}^* при различных d_0 указаны в табл. 2. Четко прослеживается увеличение критических энергий инициирования E_{0v}^* с ростом размеров капель в распыле. Зависимость динамического радиуса r_0^* от диаметра капель керосина изображена на рис. 2 (кривая 2). Там же (крестиками) нанесены рассчитанные в [8] по нестационарным уравнениям механики гетерогенных сред значения r_0^* . Видно хорошее соответствие данных оценок и расчетов [8]. Максимальное отличие критического значения динамического радиуса r_0^* в 1,3 раза наблюдается при $d_0 = 100$ мкм.

Поскольку период индукции химических реакций экспериментально определяется с некоторым разбросом, то на примере стехиометрической керосинокислородной взвеси рассмотрим влияние отклонений в $\tau_{\text{и}}$ на значения критических параметров. Для этого предэкспонент в $\tau_{\text{и}}$ изменяли в $\pm e$ раз ($e \approx 2,718...$). Найденные критические значения r_0^* приведены на рис. 2 (штриховые линии). Видно, что для гетерогенной (газ — капли) детонации критические энергии инициирования имеют существенно более слабую зависимость от $\tau_{\text{и}}$, чем при инициировании газовой детонации [16]. Заметим, что при заданных $\tau_{\text{и}}$ интервал значений r_0^* , ограничивае-

Таблица 1

| Номер смеси | Φ | ρ_2 , кг/м ³ | D_0 , м/с | K , с | e , $\frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$ | Источник |
|-------------|--------|------------------------------|-------------|-----------------------|---|----------|
| 1 | 1,00 | 830 | 2310 * | $1,05 \cdot 10^{-11}$ | 40,0 | [13] |
| 2 | 0,33 | 830 | 1876 * | $1,05 \cdot 10^{-11}$ | 40,0 | [13] |
| 3 | 1,00 | 683 | 2300 | $1,61 \cdot 10^{-12}$ | 36,2 | [14] |

* Данные работы [15].

Т а б л и ц а 2

| d_0 , МКМ | M_{\min}^* | r_0^* , М | E_{01}^* , $\frac{\text{кДж}}{\text{м}}$ | E_{02}^* , $\frac{\text{кДж}}{\text{м}}$ | E_{03}^* , кДж |
|-------------|--------------|-------------|--|--|------------------|
| 200 | 5,13 | 0,585 | 59,3 | 34,7 | 20,3 |
| 400 | 4,939 | 1,063 | 107,7 | 114,5 | 121,7 |
| 600 | 4,834 | 1,518 | 153,8 | 233,4 | 354,3 |
| 800 | 4,762 | 1,96 | 198,5 | 389,2 | 762,7 |
| 1000 | 4,708 | 2,393 | 242,4 | 580,1 | 1388,2 |

мых на рис. 2 штриховыми линиями, можно также интерпретировать как эффект влияния численного значения коэффициента в эмпирическом соотношении (3) на результаты расчета критических параметров. Указанный интервал соответствует изменению коэффициента в формуле (3) в широком диапазоне $1,2 \div 6$ и в отличие от утверждений работы [17] слабо влияет на критические параметры.

Критическим значениям динамического радиуса для взвеси керосин — O_2 ($\Phi = 0,33$) соответствует кривая 1 на рис. 2. С целью сравнения проведенных оценок для этой же взвеси нанесены экспериментальная [4] и расчетная [18] точки при $d_0 = 400$ мкм. Видно, что найденная по (1)–(5) величина r_0^* отличается от экспериментального значения [4] всего на 30%. И наконец, кривой 3 показаны критические параметры r_0^* для стехиометрической гептанокислородной взвеси. Для других распылов углеводородов в кислороде при известных выражениях τ_i и необходимых исходных данных по алгоритму (1)–(5) также могут быть проведены оценки критических энергий инициирования гетерогенной (газ — капли) детонации.

В заключение автор выражает благодарность В. В. Митрофанову за обсуждение работы и ряд критических замечаний.

Поступила в редакцию 30/VIII 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Dabora, L. P. Weinberger. Acta Astron., 1974, 1, 3–4, 361.
2. Б. Е. Гельфанд. — В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черногловка, 1977.
3. М. А. Nettlefon. Comb. Flame, 1977, 28, 1, 3.
4. J. A. Nicholls, R. Bar — Or, Z. Gabrijel e. a. AIAA Paper, N 288, 1979.
5. D. C. Bull, M. A. Mcleod, G. A. Migner. — In: Gasdynamics of detonations and explosions, 1981.
6. С. А. Ждан, В. В. Митрофанов. — В кн.: Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. Черногловка, 1978.
7. V. V. Mitrofanov, A. V. Pinaev, S. A. Zhdan. Acta Astron., 1979, 6, 3–4.
8. С. А. Ждан. ФГВ, 1981, 17, 6, 105.
9. Р. И. Нигматулин. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
10. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко. Arch. termodyn. i spalau., 1975, 6, 1, 77.
11. А. В. Пинаев, А. И. Сычев. ФГВ, 1982, 18, 6, 81.
12. Т. В. Баженова, Л. Г. Гвоздева. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977.
13. Е. С. Щетинков. Физика горения газов. М.: Физматгиз, 1966.
14. P. L. Lu, N. Slagg a. o. Acta Astron., 1979, 6, 7–8, 815.
15. А. В. Пинаев. ФГВ, 1977, 13, 3.
16. В. А. Левин. Докт. дис. МГУ, 1975.
17. Е. К. Dabora. Acta Astron., 1979, 6, 3–4, 269.
18. S. A. Zhdan. Book of abstracts. Eighth Intern. Colloquium on gasdynamics of explosions and reactive systems. Minsk, 1981.