

УДК 662.215.1

ГИДРОМЕХАНИКА

А. В. ДУБОВИК, В. К. БОБОЛЕВ

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЗРЫВА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ СО СПАДАЮЩИМ ПРОФИЛЕМ ДАВЛЕНИЙ

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 20 VI 1974)

1. Исследование критических условий инициирования взрывчатых веществ (ВВ) ударными волнами важно для углубленного понимания имеющихся представлений о переходе горения в детонацию, чувствительности к ударной волне, природе критического диаметра и т. д. В опытах по измерению величины критического давления инициирования в качестве генераторов ударных волн обычно используют достаточно удлиненные заряды ВВ большого диаметра, создающих в исследуемом веществе импульс давления, профиль которого близок к прямоугольному. Экспериментально показано (^{1, 2}), что для большинства гомогенных ВВ критические давления p_* составляют около 100 кбар. При этом ударный разогрев вещества достигает $\sim 1000^\circ \text{K}$, а задержка возникновения взрыва t_0 (отсчитывается с момента вступления фронта волны), связанная с наличием индукционного периода реакции взрывчатого превращения вещества, измеряется единицами микросекунд. По сравнению с характерным временем θ_0 спада давления вследствие расширения (соответственно охлаждения) вещества в осевой (или боковой) волне разрежения (оно же определяет характерное время ударного эксперимента) период индукции t_0 является достаточно малой величиной.

Несколько иная картина представляется в случае воздействия на исследуемое ВВ ударного импульса с быстро спадающим во времени профилем давлений. Такая ситуация возникает при инициировании осколком, тонкой пластиной или при использовании активного заряда достаточно малых размеров. Если θ_0 соизмеримо с t_0 , то при воздействии ударной волны с максимальной амплитудой $p_0 = p_*$ инициирование ВВ может не произойти вследствие значительного возрастания индукционного периода реакции, продолжительность которого выйдет за пределы времени ударного эксперимента.

Хотя приведенные рассуждения в общих чертах считаются известными (^{2, 3}), специальные эксперименты в этом направлении, насколько мы знаем, не проводились, по-видимому, из-за различных технических трудностей. В настоящей работе выполнен приближенный теоретический анализ явления инициирования однородного ВВ ударной волной, за фронтом которой (в волне разрежения) расширение вещества происходит по заданному закону. Предполагаем, что по типу тел ВВ относится к молекулярным кристаллам, а при термической активации распадается по механизму теплового взрыва с константой скорости $k = ze^{-E/RT}$. Задача сводится к определению адиабатического периода индукции воспламенения в среде с нестационарными параметрами при их известных начальных значениях.

2. Обозначим индексом 0 параметры среды на фронте инициирующей ударной волны. Пусть закон изменения объема при разгрузке имеет вид

$$v = v_0 e^{\alpha t}, \quad (1)$$

где $\alpha^{-1} = \theta$ — характерное время расширения вещества.

Наше предположение состоит в том, что малое изменение температуры не должно приводить к заметному по сравнению со скоростью химической реакции изменению теплоемкости вещества. Такой случай осуществляется при не слишком резком падении параметров за фронтом волны. При этом условии также допустимо предположение о постоянстве коэффициента Грюнайзена.

В модели молекулярного кристалла (³, ⁴) адиабатическая связь температуры и объема дается, с учетом сказанного, выражением

$$T/T_0 = (v_0/v)^{\Gamma_0}, \quad \Gamma_0 = c_v^{-1} \Gamma^0 / c_v; \quad (2)$$

здесь Γ^0 — коэффициент Грюнайзена, который для органических соединений в нормальных условиях равен 3. c_v^{-1} , c_v — соответственно теплоемкость межмолекулярного взаимодействия и полная теплоемкость при постоянном объеме. При достаточно высоких температурах полагают $c_v^{-1} \approx 6RM^{-1}$, $c_v \approx 3NR\kappa M^{-1}$, где N — число атомов в молекуле соединения, M — молекулярный вес и $\kappa \leq 1$. Для нитроглицерина (НГЦ) $N=20$ и поэтому $\Gamma_0 \approx 0,3$. Малая величина этого параметра свидетельствует о сравнительно слабом уменьшении температуры при расширении вещества: с учетом (1) и (2) $T = T_0 e^{-\alpha \Gamma_0 t}$.

В соответствии с п. 1 в результате протекания конкурирующих процессов тепловыделения вследствие химической реакции и охлаждения при разгрузке ударно сжатого вещества возникает нестационарное поле температур, которое для случая реакции нулевого порядка описывается уравнением

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Qz}{c_v(T)} e^{-E/RT} - \alpha \Gamma_0 T \quad (3)$$

с начальным условием $T(0) = T_0$; здесь Q — теплота реакции на единицу массы ВВ.

Введем безразмерные переменные $y = T/T_0$, $\tau = t/t_0$,

$$t_0 = \frac{c_v(T_0) R T_0^2}{QzE} e^{E/RT_0},$$

t_0 — адиабатический период индукции нормального теплового взрыва в среде с постоянной температурой T_0 .

Для решения (3) воспользуемся методом разложения экспонента, предложенным в (⁵). При $T - T_0 = \Delta T \ll T_0$ имеем

$$e^{-E/RT} \approx e^{-n} e^{n\Delta T/T_0} \approx e^{-n} (1 + n\Delta T/T_0) \approx e^{-n} (1 + \Delta T/T_0)^n = e^{-n} \cdot y^n, \\ n = E/RT_0.$$

Обозначая $\alpha t_0 = \beta$ и учитывая малое изменение $c_v(T)$, преобразуем (3) к виду

$$\frac{dy}{d\tau} + \Gamma_0 \beta y = \frac{y^n}{n}, \quad y(0) = 1. \quad (4)$$

Интегрируя (4), находим

$$y = e^{-\Gamma_0 \beta \tau} \left[1 - \frac{n-1}{n\Gamma} (1 - e^{-\Gamma \tau}) \right]^{-1/(n-1)}, \quad (5) \\ \Gamma = \Gamma_1 \beta, \quad \Gamma_1 = \Gamma_0 (n-1).$$

Выражение для периода индукции воспламенения определим из условия $y \rightarrow \infty$. Тогда

$$t_i/\theta = \Gamma_1^{-1} \ln(1 - n\Gamma_0 t_0/\theta)^{-1}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при $\alpha \rightarrow 0$ (расширение вещества не происходит) $t_i/t_0 \rightarrow n/(n-1)$. В области не слишком высоких температур $n \gg 1$ (для НГЦ $E=35$ ккал/моль (⁶) и $n=17,5$ при $T_0=1000^\circ\text{K}$), поэтому $t_i \approx t_0$. Во всех

остальных случаях $t_i > t_0$, а при $\theta \rightarrow \theta_* = nt_0 \Gamma_0$ $t_i \rightarrow \infty$. Величина θ_* характеризует критические условия возбуждения взрыва ударной волной со спадающим профилем давлений.

Ниже представлены рассчитанные по (6) значения t_i/t_0 в зависимости от t_0/θ для случая иницирования НГЦ при $n=19$, $\Gamma_0=0,5$ (ударное сжатие с $p_0 \approx 100$ кбар):

t_0/θ	0,165	0,100	0,050	0,010	0,001
t_i/t_0	6,340	3,329	1,432	1,109	1,061

Отметим быстрое возрастание t_i/t_0 при $t_0/\theta \rightarrow 0,1053$. Напротив, $t_i/t_0 \approx 1$ при $t_0/\theta < 0,01$. Каким-то образом этот факт объясняет, почему ряд авторов (¹⁻³), экспериментируя с различными взрывными устройствами, получали близко совпадающие значения критических параметров иницирования ВВ. Заметим, что приведенные расчеты следует рассматривать только как иллюстрацию обнаруженного эффекта.

Если зависимость (1) задана в виде $v = v_0(1 + \alpha t)^m$, $m > 0$, то аналогичное (6) выражение для периода индукции записывается так:

$$t_i/\theta = (1 - \theta_*/\theta)^{-1/(m\Gamma_1 - 1)} - 1, \quad \theta_* = nt_0(m\Gamma_1 - 1)/(n - 1).$$

Для известных критических условий иницирования экспериментально возможно зарегистрировать профиль давлений за фронтом волны. Покажем, как от зависимости $p(t)$ перейти к $v(t)$.

Используя уравнение состояния молекулярного кристалла (⁴) $p = p_x(v) + \Gamma^0 c_v^{-1} T/v$, находим адиабатическую связь давления и объема $p = p_x(v) + p^0 (v_0/v)^{\Gamma_0 + 1}$; здесь $p_x(v)$ — изотерма ВВ при температуре $T^0 = 0^\circ \text{К}$, $p^0 = \Gamma^0 c_v^{-1} T^0/v_0$. Для более грубых расчетов можно воспользоваться уравнением состояния конденсированного вещества типа $p = p_0 [(v_+ - v)/(v_+ - v_0)]^k$, где v_+ и k можно считать постоянными величинами.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
4 VI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ A. W. Campbell, W. L. Davis, J. R. Travis, Phys. Fluids, v. 4, 498 (1961). ² А. Н. Дремин, С. Д. Сагров и др., Детонационные волны в конденсированных средах, «Наука», М., 1970. ³ И. М. Воскобойников, Докт. дисс., М., 1970. ⁴ Цянь Сюэ-сень, Физическая механика, «Мир», М., 1965. ⁵ Я. Б. Зельдович, В. В. Воеводский, Тепловой взрыв и распространение пламени в газах, М., 1947. ⁶ А. И. Сербинов, ЖФХ, т. 33, № 12 (1959).