

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ГОМОГЕННЫХ ВВ

И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Я. Апин  
(Москва)

При решении большого числа вопросов, связанных с возбуждением и распространением детонации в зарядах конденсированных ВВ, необходимы сведения о кинетике их разложения при высоких температурах и давлениях. Наиболее естественным источником получения этих сведений являются результаты исследования кинетики разложения гомогенных ВВ (жидких и монокристаллических) в условиях сжатия ударной волной.

Преимущества использования в кинетических исследованиях техники ударных волн определяются возможностью перевода ударным сжатием исследуемого вещества из начального состояния  $(p_0, v_0, T_0)$  в конечное  $(p, v, T)$  за времена, в течение которых вещество не успевает претерпеть какие-либо химические превращения. Важным обстоятельством в случае сжатия гомогенных веществ является создание высоких температур во всем образце, а не на некоторой контактной поверхности. Продолжительность поддержания высоких температур и давлений столь невелика, что протеканием явлений переноса можно пренебречь, а имеющий место при инициировании ударной волной взрыв с полным основанием считать адиабатическим.

Изучение разложения веществ при ударном сжатии до давлений в десятки и сотни килобар предполагает возможность решения следующих задач: 1) определение ударной адиабаты исследуемого вещества; 2) умение перейти от давлений ударного сжатия к температурам; 3) достаточно точное определение времен разложения ВВ при инициировании ударной волной.

Решение первой из перечисленных задач дает построение обобщенной ударной адиабаты органических веществ [1], а второй — выбор уравнения состояния молекулярного кристалла, сделанный на основании сопоставления результатов измерения температур ударного сжатия органических жидкостей с результатами расчета по различным уравнениям состояний [2]. Температура ударного сжатия находится при совместном решении уравнений, следующих из закона сохранения энергии и уравнения состояния

$$\Delta \epsilon_T = \int_{T_0}^T C_v dT = 0,5 u^2 - \int_{v_0}^v P_{T_0} dv,$$

$$p = P_{T_0} + \frac{3R \Gamma(v)}{M v} (T - T_0).$$

где  $p, u, T$  — давление, массовая скорость и температура вещества за ударным фронтом;  $P_{T_0}$  — изотерма вещества при начальной  $T_0$  температуре;  $v$  — удельный объем. Ударная адиабата предполагается известной, решение указанных уравнений должно удовлетворять термодинамическому тождеству

$$\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -1.$$

Способы измерения задержек адиабатического взрыва при нагружении ударной волной жидких и монокристаллических веществ были описаны неоднократно (см., например, [3, 4]). Обычно ударная волна возбуждается в образце исследуемого ВВ посредством детонации заряда мощного ВВ. Различные формы и размеры этого заряда могут явиться причиной расхождения в величинах задержек адиабатического взрыва при одинаковом давлении на ударном фронте из-за несовпадения скорости спада давления за фронтом во времени. Прямоугольный временной профиль давления инициирующей ударной волны является, вообще говоря, математической абстракцией, к которой на практике приближаются только при очень малых задержках взрыва. В большинстве же опубликованных исследований это заведомо было не так. Поэтому при сравнении результатов, полученных разными авторами, между собой и с расчетными данными желателен учет конкретного временного профиля давления в инициирующей ударной волне.

Осуществление такого учета облегчается тем, что за времена индукции адиабатического взрыва можно пренебречь выгоранием ВВ, а следовательно, изменением временного профиля давления в инициирующей ударной волне. Нетрудно показать, что при этом вероятность

адиабатического взрыва определяется интегралом  $\int_0^{\infty} \frac{dt}{\tau(T_s)}$ , где  $\tau(T_s)$  — задержка взрыва, соответствующая температуре  $T_s$  ( $T_s$  — функция времени, связанная с изменением давления за ударным фронтом).

Для построения изэнтропы при небольших степенях расширения вещества воспользуемся приемом, приведенным в [5]. Так как соответствующие выкладки проделаны там для уравнения состояния атомарного кристалла, то повторим их для молекулярного. Из второго начала термодинамики запишем

$$dS = \frac{d\varepsilon + pdv}{T},$$

или, подставляя выражение для внутренней энергии и давления

$$\varepsilon = \varepsilon_x(v) + \int^T C_v dT, \quad p = p_x(v) + \frac{3R\Gamma}{Mv} T,$$

$$dS = \frac{C_v dT}{T} + \frac{3R\Gamma}{Mv} dv,$$

где  $C_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме;  $M$  — молекулярный вес.

На изэнтропе  $dS \equiv 0$ ,

$$\frac{C_v dT}{T} = - \frac{3R\Gamma}{Mv} dv.$$

Интегрируя последнее уравнение, получаем зависимость температура — удельный объем в изэнтропической волне разрежения. Наиболее простое выражение имеем в приближении, что  $C_v$  и  $\Gamma$  постоянны,

$$\frac{T}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v} \right)^{\frac{3R\Gamma}{M \cdot C_v}}.$$

На рисунке сравниваются изменения температуры с давлением на фронте ударной волны и при изэнтропическом расширении для тетранитрометана (I) и нитрометана (II). Вторая из указанных зависимо-

стей очень слабая и в качестве первого приближения для достаточно длинных волн можно считать, что температура не меняется за фронтом ударной волны, а следовательно, задержка адиабатического взрыва при инициировании гомогенного ВВ ударной волной определяется только давлением на фронте.

В рамках модели молекулярного кристалла при предположении неизменности внутримолекулярного взаимодействия при сжатии энергия активации мономолекулярного распада должна сохраняться постоянной. Такое положение сильно облегчает задачу нахождения критических давлений инициирования жидких и монокристаллических образцов ВВ ударными волнами, которое может быть проведено следующим образом.

Геометрия заряда исследуемого ВВ, подвергнутого воздействию ударной волной, задает максимально возможную задержку адиабатического взрыва  $\tau$ . Эта задержка связана с температурой  $T_1$  уравнением

$$\tau = \frac{C_v R \cdot T_1^2}{Q \cdot E \cdot z} \exp \left\{ \frac{E}{RT_1} \right\},$$

где  $Q$  — тепловой эффект распада;  $R$  — газовая постоянная;  $E$  — энергия активации;  $z$  — предэкспонент в выражении для изотермической скорости распада.

По зависимости температура ударного сжатия — давление на фронте волны определяется давление, соответствующее  $T_1$ . Рассчитанная таким образом величина определяет минимальную интенсивность ударной волны, которая может в заданных условиях опыта инициировать взрыв исследуемого вещества.

С помощью описанной выше процедуры счета были оценены давления инициирования ряда ВВ, исследованных в работах [3, 4, 6]. Полученные значения сравниваются с экспериментальными в табл. 1. Наблюдается довольно хорошее согласие, которое свидетельствует о правильности выбранной модели уравнения состояния и справедливости основного положения о неизменности с давлением кинетических констант мономолекулярного распада.

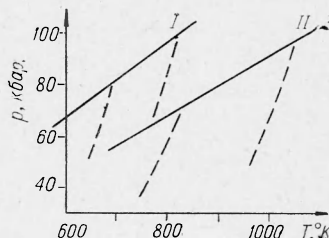


Таблица 1

Расчет давлений инициирования гомогенных ВВ

	$P_{кр}$ , кбар (опыт)	$P_{кр}$ , кбар (расчет)	$\tau$ , мксек	$T_0$ , °C	$T_1$ , °K
Нитрометан жидкий	93 [3]	115	1,0	20	1200
Тэн кристаллический	112 [4]	122	0,3	25	700
Гексоген кристаллический	170 [3]	162	1,0	20	770
Тетрил кристаллический	—	150	1,0	20	810
Тротил кристаллический	—	180	0,7	20	1000
Тротил жидкий	125 [3]	125	0,7	85	1000
Тетранитрометан жидкий	(70*) 86 [3]	82	1,0	20	700
Нитроглицерин жидкий	(120*) 110 [3]	120	0,3	20	760

\* Цифры в скобках получены автором работы [6]. Это — пороговое значение давления в условиях опыта. Величина  $\tau$  автором [6] не приводится.

На совпадении результатов расчета критических давлений инициирования с экспериментальными значениями сказываются неточности в выборе начальных данных. Например, расчет величины  $T_1$  по временам задержек адиабатического взрыва с привлечением кинетических параметров, полученных разными авторами, приводит к разбросу в  $T_1$  до

Таблица 2

ВВ	$E$ , ккал/моль
Алкилнитраты	38—39
Алкилдинитраты	36—37
Алкилтринитраты	35—36
Алкилнитриты	36—37
Нитроалканы	45—47
Гемдинитралканы	46—48
Диалкилнитра- мины	40—42
Алкилазиды	38—40
Нитросоединения ароматического ряда —	50—55
1,1,1-тринитралка- ны	35—37 ( $z=10^{17+18}$ )

100° К. Имеются расхождения в записи ударных адиабат тех немногих ВВ, которые были исследованы в нескольких работах; осреднение ударных адиабат обобщенной зависимостью также может вносить некоторую погрешность. Кроме того, не всегда известны значения коэффициентов теплового расширения и изотермической сжимаемости в начальных условиях. Оценка возможной ошибки в расчете температур ударного сжатия при давлениях 100—200 кбар из-за выбора исходных данных дает величину около 50° К. Учитывая возможную погрешность в нахождении  $T_1$ , получаем априорную ошибку расчета критического давления инициирования ВВ ударной

волной в 25 кбар. Наблюдаемое в табл. 1 расхождение экспериментальных и расчетных значений  $p_{кр}$  не превосходит этой величины<sup>1</sup>.

Поступила в редакцию  
14/III 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

- И. М. Воскобойников, А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов. ФГВ, 1967, 3, 4, 585.
- В. М. Богомолов. Канд. дисс. ИХФ АН СССР, 1967.
- И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 2.
- A. W. Campbell, W. C. Davis, I. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 4.
- Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
- С. Д. Савров. Канд. дис. ФИХФ АН СССР, 1966.

<sup>1</sup> При оценке критических давлений инициирования ударной волной однородных ВВ, для которых константы молекулярного распада неизвестны, можно использовать средние энергии активации, полученные обобщением имеющегося экспериментального материала при постоянном предэкспоненте  $z=10^{14}$  в выражении для изотермической скорости распада (см. табл. 2).