

**РАСЧЕТ ДАВЛЕНИЙ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВА
ГОМОГЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ**

И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Я. Апин

(Москва)

При инициировании гомогенных взрывчатых веществ ударной волной взрыв развивается за столь малые промежутки времени, в течение которых явлениями переноса можно полностью пренебречь. Это обстоятельство позволяет рассматривать возникающий взрыв как адиабатический. В случае мономолекулярного распада ВВ задержка адиабатического взрыва τ связана с температурой T и энергией активации E выражением

$$\tau = \frac{c_V RT^2}{z QE} \cdot e^{E/RT}, \quad (1)$$

где Q — теплота взрыва; c_V — удельная теплоемкость; R — газовая постоянная; z — предэкспонент в аррениусовском законе изотермического распада.

Для расчета давлений инициирования адиабатического взрыва гомогенных ВВ ударной волной необходимо знать температуру ударного сжатия и кинетику мономолекулярного распада при повышенных давлениях. Если относительно кинетики почти общепринятым является предположение о сохранении той же константы скорости, что и при более низких давлениях, то относительно уравнения состояния гомогенных ВВ, без которого не может быть произведен расчет температур ударного сжатия, такого единства нет, хотя первое предположение накладывает определенные ограничения на выбор уравнения состояния.

В настоящей работе показана возможность расчета критических давлений инициирования адиабатического взрыва гомогенных ВВ при использовании уравнения состояния молекулярного кристалла, считая, что в процессе ударного сжатия молекулы не деформируются. В этом предположении константа скорости мономолекулярного распада не зависит от степени сжатия.

1. Результаты, полученные при исследовании инициирования гомогенных ВВ ударными волнами, могут быть применены для анализа кинетики распада ВВ при больших температурах и давлениях, если четко определены следующие условия проведения опыта: временной профиль давления инициирующей ударной волны и время задержки адиабатического взрыва ВВ при заданной инициирующей ударной волне. Наиболее желательным является определение зависимости задержки взрыва τ как функции давления p на фронте ударной волны с прямоугольным профилем, поскольку в этом случае выдержано сохранение параметров состояния p , V , T в течение времени индукции.

Зависимость $\tau(p)$ можно получить в двух типах экспериментов, измеряя или время задержки инициирования детонации ударной волной

через пластину инертного материала, или время задержки адиабатического взрыва в тонких слоях ВВ. Поскольку время развития адиабатического взрыва в детонацию много меньше задержки взрыва, то оба метода дают очень близкие зависимости $\tau(p)$, хотя эффективнее и надежнее второй. Первый тип постановки эксперимента был использован в работах [1—3], причем данные [1] наиболее отвечают упомянутому

Таблица 1

ВВ	p_{τ} , кбар		τ , мксек	T_{τ} , °К
	эксперимент	расчет		
Нитрометан жидкий	93	115	1,0	1100
Тэн кристаллический	112	122	0,3	700
Гексоген	170	162	1,0	770
Тетрил	—	150	1,0	810
Тротил	—	200	0,7	1000
Тротил жидкий	125	125	0,7	1000
Тетранитрометан жидкий	86	82	1,0	700
Нитроглицерин	110	120	0,3	760

требованию о постоянстве давления в инициирующей волне. Второй тип постановки экспериментов был описан в работе [4]. Величины задержки адиабатического взрыва приводятся в табл. 1; ударные адиабаты исследованных ВВ взяты из работ [1, 5—8], для тэна ударная адиабата предполагалась той же, что у тексогена, а для тетранитрометана была получена в виде

$$D = 1,04 + 2,00U - 0,1U^2,$$

где D — скорость ударной волны; U — массовый поток за фронтом.

2. При экспериментальном определении задержек адиабатического взрыва, когда разложение ВВ инициируется ударной волной, величины задержек τ сопоставляются со значениями давлений, поскольку последние известны с большей достоверностью, чем остальные параметры состояния. Анализ кинетики разложения ВВ в ударных волнах вряд ли возможен при неизвестных температурах ударного сжатия. Отсутствие экспериментальных значений этих температур для органических жидкостей вынуждает прибегнуть к расчету, требующему выбора уравнения состояния исследуемых ВВ (жидкостей или монокристаллов). В настоящей работе за критерий такого выбора взята возможность расчета наблюдаемых в эксперименте давлений инициирования при заданной задержке адиабатического взрыва.

В качестве первого приближения было рассмотрено уравнение состояния молекулярного кристалла или жидкости в предположении неизменности внутримолекулярных частот в процессе сжатия. В рамках этого предположения сохраняется неизменной при различных давлениях кинетика молекулярного разложения.

Температура на ударном фронте находилась при совместном решении уравнения сохранения энергии и уравнения изотермы:

$$0,5 p (V_0 - V) - \int_{V_0}^V p_{из} dV = \int_{T_0}^T c_V dT,$$

$$p - p_{из} = \frac{3R \Gamma_0}{MV} (T - T_0),$$

где p , V , T — давление, удельный объем и температура вещества на

ударном фронте; $\Gamma = \frac{\beta c_0^2}{3R}$ — коэффициент Грюнайзена; M — молекулярный вес; β — коэффициент термического расширения; c_0 — скорость звука в веществе в начальном состоянии. Теплоемкость записывалась в виде

$$c_V = 3R + R \sum_v \epsilon_v,$$

где ϵ_v — функции Эйнштейна, характеризующие вклады внутримолекулярных колебаний.

На рис. 1 приводятся рассчитанные зависимости температура — давление на ударном фронте для ряда ВВ. Процедура расчета давления в инициирующей ударной волне, при котором происходит взрыв исследуемого ВВ с заданной задержкой τ , сводится к определению по формуле (1) температуры T_τ , а затем по графику $T(p)$ рис. 1 — соответствующего давления p_τ .

По изложенной схеме были найдены давления инициирующей ударной

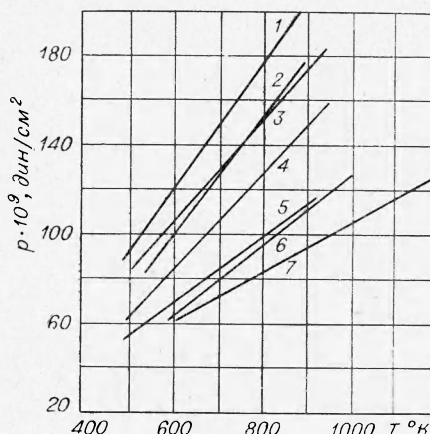


Рис. 1. Зависимость температуры от давления на ударной адиабате (расчет) для ряда ВВ. 1 — гексоген; 2 — тэн; 3 — тетрил и кристаллический тротил; 4 — нитроглицерин; 5 — тетранитрометан; 6 — тротил расплавленный ($T_0=85^\circ\text{C}$); 7 — нитрометан.

волны для ряда ВВ (табл. 1). Использованные при вычислениях начальные данные сведены в табл. 2. Имеется вполне удовлетворительное согласие результатов расчета и эксперимента, расхождение которых, как правило, не превосходит 10 кбар, может быть объяснено как за счет сделанных упрощений, так и за счет погрешностей в выборе исходных данных, под которыми понимается следующее:

1) расчет T_τ по величинам задержек адиабатического взрыва с привлечением кинетических параметров, полученных разными авторами, приводит к разбросу в T_τ до 100°K [9, 10], чему соответствует неопределенность в давлении инициирования не менее 10 кбар;

2) точность определения ударных адиабат ВВ часто не указывается, лишь очень немногие вещества исследовались разными авторами. Расхождение в ходе ударных адиабат, имеющееся в работах [5, 7], дает неопределенность в расчете давлений при неизменной кинетике распада в 5 кбар;

3) для большинства ВВ отсутствуют надежные сведения о коэффициенте теплового расширения, изотермической сжимаемости, скорости звука и теплоемкости, что создает сложности в построении изотермы.

Чрезмерные уточнения, предпринятые в работе [11], кажутся недостаточно обоснованными, поскольку сделанные авторами допущения не позволяют рассматривать достигнутое совпадение результатов расчета и эксперимента иначе, чем случайное в общем плане решения задачи для многих ВВ. По существу, в указанной работе произведен подбор схемы расчета температур ударного сжатия под задержки ини-

Т а б л и ц а 2

ВВ	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$c_0, \text{м/сек}$	$\beta_0 \cdot 10^3, \text{1/град}$	Константа скорости разложения
Нитрометан	1,14	1340	1,32	$K = 10^{13,7} \exp \left\{ -\frac{49,2 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [10]
Тетранитрометан	1,64	1040	1,06	$K = 10^{17,53} \exp \left\{ -\frac{40,875 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [12]
Нитроглицерин	1,59	1740	0,85	$K = 10^{14} \exp \left\{ -\frac{35,0 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [13]
Тротил ($T_0=85^\circ\text{C}$)	1,45	1550	0,70	$K = 10^{11,4} \exp \left\{ -\frac{34,4 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [14]
Тротил ($T_0=20^\circ\text{C}$)	1,64	2160	0,32	$K = 10^{11,4} \exp \left\{ -\frac{34,4 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [14]
Тэн	1,77	2420	0,50	$K = 10^{10,1} \exp \left\{ -\frac{39,5 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [13]
Гексоген	1,80	2620	0,51	$K = 10^{15,5} \exp \left\{ -\frac{41,5 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [14]
Тетрил	1,73	2170	0,32	$K = 10^{16} \exp \left\{ -\frac{40,0 \cdot 10^3}{RT} \right\}$ [15]

циирования адиабатического взрыва для двух жидких ВВ при отсутствии четкой модели уравнения состояния.

Измерение зависимости $\tau(p)$ при разных начальных температурах и сравнение давлений инициирования при фиксированной задержке адиабатического взрыва и разных начальных температурах может послужить дополнительной проверкой расчета давлений инициирования, поскольку при таком сравнении удастся исключить ряд систематических ошибок.

Способ определения зависимостей $\tau(p)$ при разных начальных температурах тот же, что описан в работе [4], но кювета с исследуемой жидкостью (нитрометан) помещается внутрь другого сосуда, наполненного, например, тающим льдом или кристаллизующимся гипосульфидом. Условия термостатирования нитрометана контролировались термомпарами в течение всего времени перед подрывом. Определение $\tau(p)$ проводилось при 2, 20 и 45°С (рис. 2).

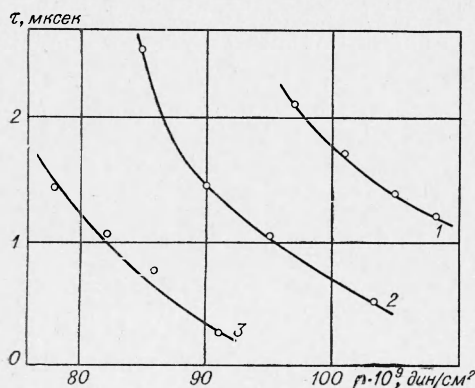


Рис. 2. Зависимости $\tau(p)$ для нитрометана при разных начальных температурах, °К.

1 — 275; 2 — 293; 3 — 318.

Равной задержке адиабатического взрыва отвечает равная температура на ударном фронте, которая складывается из начального значения и изменения температуры в процессе сжатия. Сравнивая давления, отвечающие задержке адиабатического взрыва нитрометана при $\tau=1,4$ мксек, получаем изменение давления инициирования в 0,55 кбар/°К.

Соответствующие расчеты давлений инициирования для этой задержки взрыва при разных начальных температурах дают величину $0,31 \text{ кбар}/^\circ\text{К}$, что находится в неплохом согласии с предыдущим результатом.

В работе [1] содержатся данные по определению задержек адиабатического взрыва τ при одной амплитуде ударной волны и разных начальных температурах. Они сильно отличаются в разных партиях нитрометана, чего не наблюдалось в наших опытах. По этой причине данные работы [1] не использовались в ходе рассмотрения $\tau(p)$ при разных начальных температурах.

* *
*

Настоящей работой показана возможность расчета критических давлений ударных волн, инициирующих взрыв гомогенных ВВ, при использовании уравнения состояния молекулярного кристалла и предположения о неизменности характеристических частот колебаний атомов в молекуле в процессе ударного сжатия.

Поступила в редакцию
14/VI 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. C. Davis, J. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 4.
2. R. F. Chaiken. 8-th Symposium (International) on Combustion, 1961.
3. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андреевский. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.
4. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 2.
5. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР, 1960 131, 4.
6. W. B. Garn. Chem. Phys., 1959, 30, 3.
7. S. J. Jacobs, T. F. Liddiard, B. E. Drimmer. 9-th Symposium (International) on Combustion, 1963.
8. C. H. Winning. Initiation of Nitroglycerine. Explosivstoffe 79828, N T—2, 1963.
9. T. L. Cottrell, T. B. Graham, T. G. Reid. Trans. Far. Soc., 1951, 47, 564.
10. A. Makovsky, T. B. Gruenewald. Trans. Far. Soc., 1959, 55, 952.
11. J. W. Enig, Fr. J. Petrone. Phys. Fluids., 1966, 9, 2.
12. J. M. Sullivan, A. B. Axworthy. Phys. Chem., 1966, 70, 10.
13. A. J. B. Robertson. Soc. Chem. Ind., 1948, 67, 221.
14. A. J. B. Robertson. Trans. Far. Soc., 1949, 45, 85.
15. Ф. И. Дубовицкий, Г. Б. Манелис, Л. П. Смирнов. ЖФХ, 1961, XXXV, 3.