

РАСЧЕТ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

М. В. Баталова, С. М. Бахрах, В. Н. Зубарев

Экспериментальные исследования возбуждения детонации ударными волнами в жидких ВВ [1—4] показали достаточно четкую качественную картину возникновения и развития детонационной волны в гомогенных конденсированных ВВ. В обычной постановке экспериментов ударная волна передается в ВВ из инертной преграды. После распада разрыва на границе инертная преграда — жидкое ВВ по последнему распространяется ударная волна и в то же время начинается химическая реакция с выделением тепла, развитие которой на начальном этапе не сказывается на газодинамическом течении. После задержки, определяемой интенсивностью инициирующей ударной волны и начальной температурой ВВ, вблизи границы раздела происходит быстрое развитие реакции, сопровождающееся резким выделением энергии и повышением давления в узкой зоне, которую можно рассматривать как очаг формирования детонационной волны. Эта волна распространяется первоначально за фронтом ударной волны со скоростью, превышающей скорость нормальной детонации в исходном ВВ. После догона фронта первичной ударной волны в ВВ начинает распространяться пересжатая детонационная волна, амплитуда которой затем асимптотически приближается к параметрам нормального режима в исходном ВВ.

Цель расчетов, результаты которых приводятся ниже, состояла в том, чтобы в принятых предположениях о тепловом характере возбуждения детонации и принятой кинетике разложения ВВ (закон Аррениуса) проверить соответствие получающихся расчетных данных с экспериментально выявленной картиной развития процесса. В то же время расчеты позволили уяснить некоторые детали возбуждения детонации гомогенных ВВ ударными волнами, которые не всегда удается проследить экспериментально.

При проведении численных одномерных расчетов была принята модель среды, в которой предполагалась только химическая неравновесность, т. е. постулировалось, что в исходном веществе в продуктах разложения давление и температура успевают выравняться по мере протекания химической реакции. В расчетах была использована методика, подробно описанная в работах [5—7].

Чтобы иметь возможность сравнивать результаты расчета с экспериментальными данными, был выбран нитрометан (НМ), возбуждение детонации в котором ударными волнами исследовано достаточно полно [1—4]. Имитировалась наиболее распространенная экспериментальная схема, в которой ударная волна передавалась в ВВ из слоя инертного вещества (оргстекла). В нитрометане волна могла распространяться на расстояния не более 40 мм.

Уравнения состояния инертного слоя из оргстекла, исходного НМ и продуктов разложения задавались в виде [8]

$$\begin{aligned} p - p_1(\rho) &= \Gamma \rho [E - E_1(\rho)], \\ p_1(\rho) &= \frac{\rho_{\text{ОР}} c_0^2}{n} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_{\text{ОР}}} \right)^n - 1 \right], \\ E_1(\rho) &= \int_{\rho_{\text{ОР}}}^{\rho} p_1(\rho) \frac{d\rho}{\rho^2}, \\ E - E_1(\rho) &= C_T T, \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 1

Вещество	$\rho_{ок}$, г/см ³	c_0 , км/с	n	Γ	C_v , ккал/(кг·град)	T_0 , К	p_0	ρ_0 , г/см ³
Оргстекло	1,18	3,18	3,5	0,8	0,837	300	0	1,18
НМ	1,16	2,20	4	0,9233	1,72	300	0	1,13
ПВ НМ	—	0	—	1,2	1,72	—	—	—

где p , E , ρ — давление, удельная внутренняя энергия и плотность вещества, Γ — коэффициент Грюнайзена, $p_1(\rho)$ — давление на нулевой изотерме, $\rho_{ок}$ — плотность при нулевой температуре и нулевом давлении, C_v — теплоемкость при постоянном объеме, c_0 — скорость звука, T — температура. Численные значения констант, входящих в уравнения состояния, и параметры, определяющие начальные условия, даны в табл. 1. Они были подобраны по динамическим адиабатам оргстекла [9] и НМ [10]. Для продуктов взрыва (ПВ) нитрометана коэффициент Грюнайзена, определяющий при заданной скорости детонации D_0 остальные параметры нормальной волны, находился по калорийности, которая была принята 1,28 ккал/г.

Константы, входящие в кинетическое уравнение

$$d\alpha/dt = -v\alpha \exp(-E_a/RT), \quad (1)$$

где α — концентрация НМ, в первых расчетах были заимствованы из [1] и принимались равными $v = 4 \cdot 10^{14}$ с⁻¹, $E_a = 53,6$ ккал/моль. Значения C_v также брались из [1].

Давление и массовая скорость за фронтом ударной волны в оргстекле считались постоянными (столбчатый профиль волны). Величина давления варьировалась от 9 до 12 ГПа, что соответствует амплитудам волн в НМ от 8 до 11 ГПа.

Один из основных выводов выполненных расчетов — достаточно хорошее качественное соответствие между расчетной картиной возбуждения детонации и экспериментальными наблюдениями. В расчетах в соответствии с опытными данными был обнаружен сравнительно узкий интервал давлений, в котором происходит возбуждение детонации с задержкой. Вне этого интервала при выбранных масштабах расчета детонационный режим либо не реализуется совсем, либо детонация возникает на границе оргстекло — нитрометан без задержки.

Для понимания кинетики разложения ВВ наиболее интересен диапазон давлений, где существует задержка в инициировании детонационной волны. При этих давлениях процесс возбуждения детонации четко разделяется на несколько стадий:

1) распространение ударной волны в ВВ; реакция разложения за фронтом ударной волны протекает настолько медленно, что никак не влияет на движение среды;

2) в области сжатого ВВ, примыкающего к границе с инертной средой, происходит быстрое развитие реакции. Полностью энергия выделяется за время $\Delta t \approx 0,05$ мкс. Область, в которой практически одновременно развивается реакция, также невелика ($\Delta x = 0,25$ мм);

3) из очага повышенных давлений и энергий в инертную среду идет ударная волна, а по сжатому ВВ начинает распространяться детонационная волна, которая и «поджигает» оставшееся ВВ за фронтом ударной волны, пока детонационный фронт не догонит ударный разрыв;

4) возникающий после взаимодействия детонационного и ударного фронтов пересжатый режим детонации по мере распространения детонации по исходному ВВ переходит в нормальный детонационный режим.

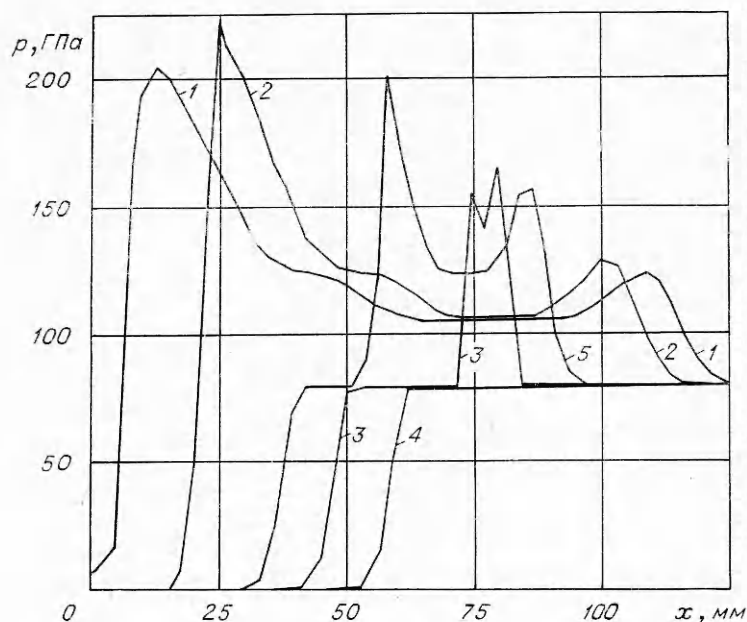


Рис. 1. Профили давлений в различные моменты времени. Иницирующий импульс в НМ $p=7,9$ ГПа. $E_a=41,2$ ккал/моль. t , мкс (от момента прихода волны к границе раздела НМ—оргстекло): 1—2,4, 2—2,2, 3—1,57, 4—1,30, 5—1,8.

Описанная стадийность процесса иллюстрируется на графиках, где изображены профили давлений для нескольких характерных моментов времени (рис. 1) и движение границы раздела с инертной средой при различных давлениях иницирующих импульсов (рис. 2). Профили $p(x)$ (см. рис. 1) отражают последовательные стадии движения ударных и детонационных фронтов и формирования за ними волн разрежения.

Характерные провалы массовой скорости на кривых $U(t)$ (см. рис. 2) связаны с торможением границы на стадии 2, когда происходит повышение давления при выделении энергии взрывчатого разложения. Последующее ускорение границы возникает по завершении реакции разложения ВВ в области, примыкающей к границе сред и формирования детонационной волны. Последняя создает поток вещества от границы и ускоряет ее до значения, отвечающего распаду разрыва инертная среда—продукты разложения ВВ. Область пониженных давлений, образующаяся в этом процессе, видна и на рис. 1. При экспериментальных измерениях движения границы раздела, по-видимому, можно регистрируемые «провалы» в массовой скорости рассматривать как меру повышения давления в начальной стадии формирования детонационной волны и как показатель размеров области, в которой это формирование происходит.

Результаты качественного сопоставления расчетных данных с экспериментальными следует рассматривать как несомненное свидетельство правильности принятых в расчетах представлений о кинетике разложения НМ при инициировании ударными волнами.

Количественное сравнение, однако, не дает оснований считать, что кинетические константы, определяемые в статических экспериментах для ВВ нормальной плотности, остаются неизменными и для сжатого вещества. Так, времена задержки, рассчитанные с указанными ранее значениями констант, оказались намного превышающими экспериментальные значения [3, 4]. Чтобы получить количественное согласие с

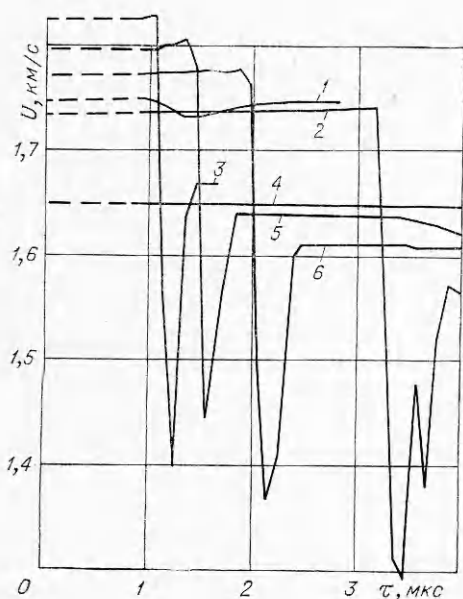


Рис. 2. Скорость движения границы раздела НМ — оргстекло при различных инициирующих импульсах.
 p , ГПа: 1 — 11, 2 — 9,7, 3 — 10,4, 4 — 9, 5 — 10,2, 6 — 10.

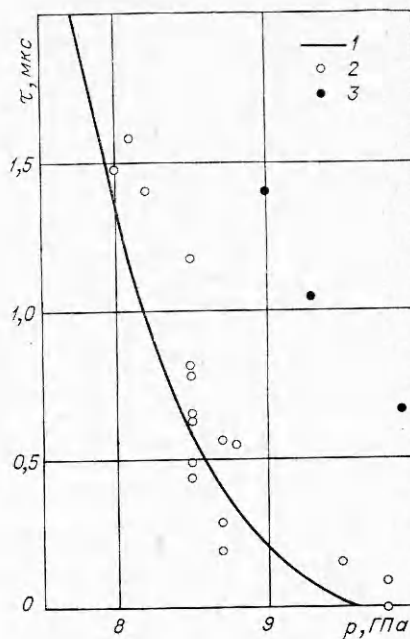


Рис. 3. Зависимость времени задержки детонации от давления инициирующей волны в НМ.
 1 — расчет $E_a = 41,2$ ккал/моль; 2 — экспериментальные данные [3]; 3 — эксперимент [4].

экспериментом, была проведена серия расчетов при различных энергиях активации и при неизменном инициирующем импульсе. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2. (Давление ударной волны в НМ составляло 88,5 кбар.) В этой же таблице приведены данные о влиянии начальной температуры ВВ на период индукции. Изменение температуры на 20° вдвое изменяет время задержки инициирования, что находится в соответствии с экспериментом [3].

При заданном инициирующем импульсе согласие с экспериментальными данными о времени задержки достигается при уменьшении энергии активации на 15% (по данным [4]) или на 23% (по данным [3]). Со значением энергии активации, уменьшенным на 23% (до 41,2 ккал/моль), была рассчитана зависимость времени задержки от амплитуды инициирующей волны. Ее сравнение с экспериментальными данными дано на рис. 3. В среднем согласие во всем интервале давлений удовлетворительное, что также свидетельствует о применимости кинетического уравнения Аррениуса для описания процесса возбуждения детонации в гомогенных ВВ.

На рис. 4 приведено сравнение расчетной $x-t$ -диаграммы с диаграммой, построенной в [10] на основе измеренных скоростей распространения ударных и детонационных волн. Это сравнение, контролирующее, в частности, правильность описания сред выбранными уравнениями состояния, показывает хорошее согласие эксперимента и расчета.

Температурный интервал, в пределах которого наблюдается возбуждение детонации с задержкой, так же как и ин-

Таблица 2

E_a' ккал/моль	T_0 , К	τ , мкс
53,6	330	2,8
45,6	300	1,66
45,6	320	0,81
45,6	280	3,76
42,9	300	0,60
41,2	300	0,30

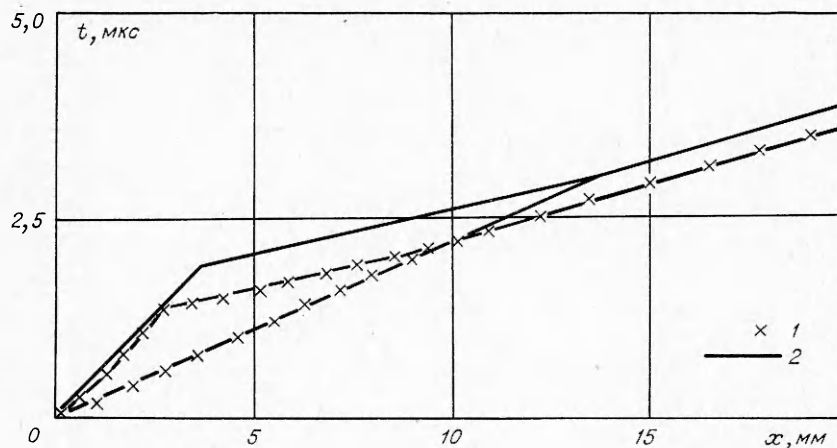


Рис. 4. $x-t$ -диаграмма движения границы ударных и детонационных фронтов.

1 — расчет; 2 — эксперимент.

тервал давлений ($p=8 \div 9,5$ ГПа), относительно узок. Температура сжатого НМ изменяется в этой области от 840 до 970 К, что намного ниже температуры за фронтом детонационной волны при выгорании вещества ($T=4500$ К). Это может служить объяснением очень быстрого ускорения реакции, после того как произошло разложение осциллирующей доли ВВ.

Поступила в редакцию
9/II 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. C. Davis, J. R. Travis. Phys. of Fluids, 1961, 4, 4, 498.
2. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
3. J. G. Verke, R. Show a. o. 5-th Symposium on Detonation, California, 1970.
4. И. М. Воскобойников, В. М. Богомоллов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 3, 610.
5. В. Л. Загускин, В. А. Сараев и др. 1-й Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докл. М., «Наука», 1968.
6. М. В. Баталова, С. М. Бахрахи др. ПМТФ, 1971, 3, 73.
7. С. М. Бахрах, В. Н. Зубарев, А. А. Шанин. 3-й Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. М., «Наука», 1972.
8. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
9. А. А. Баканова, И. П. Дудололадов, Р. Ф. Трунин. ФТТ, 1965, 7, 6, 1616.
10. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1960, 131, 4, 793.
11. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973.

КРИТИЧЕСКИЕ ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ ДЛЯ УДАРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ВВ

В. В. Сильвестров

Влияние изменения начальной температуры T на детонационные пределы однородных ВВ описывается различными моделями на основе теории теплового взрыва. Однако предсказания этой теории для неоднородных ВВ часто не соответствуют экспериментальным данным [1—3]. Цель этой работы показать, что на основе понятия критической энер-