

Эта система была решена на электронно-вычислительной машине для параметров:

$$\beta=0,0522, \alpha=0,0794, \frac{\tau_0}{\delta} = 0,0282, \frac{u_0}{c_0} = 0,343,$$

характерных для условий во фронте нормальной детонационной волны смеси нитрометан/ацетон 75/25 по объему [9]. Период индукции, определенный численно, оказался равным 1,63, а вычисленный по формуле (1) — 1,37.

Таким образом, неучет выгорания вещества приводит к ошибке в определении периода индукции порядка 20—30%.

Неучет действия волны разгрузки, идущей за фронтом ударной волны, приводит к ошибке, которая вблизи «порога инициирования» (критическое давление, при котором реакция теряет взрывной характер) может достигать огромных величин ~ 100% и более.

Поступила в редакцию  
17/1 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. S. Davis, I. R. Travis. Phys. Fluids, 1961, 4, 4.
2. C. L. Mader. Phys. Fluids, 1965, 8, 10.
3. I. W. Enig, F. I. Petrone, Phys. Fluids, 1966, 9, 2.
4. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Л. Апин. Физика твердого тела, 1967.
5. A. N. Dremin, O. K. Rozanov, V. S. Trofimov. Combustion and Flame, 1963, 7, 2.
6. А. Г. Мержанов. Лекции по теории воспламенения. МФТИ, 1964.
7. Ф. А. Баум, К. П. Станюкевич, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
8. К. П. Станюкевич. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., Гостехиздат, 1955.
9. А. Н. Дремин, О. К. Розанов, И. Г. Коба. ФГВ, 1965, 1, 3.

УДК 534.222.2

#### О ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ РЕЖИМЕ ДЕТОНАЦИИ

*В. И. Ващенко, Ю. Н. Матюшин,  
А. К. Парфенов, Ю. А. Лебедев, А. Я. Апин  
(Москва)*

Дискретность режимов детонации, т. е. стационарное распространение детонационной волны с двумя различными скоростями при изменении величины инициирующего импульса, является одним из интересных вопросов теории детонации конденсированных ВВ. Значение большей из двух стационарных скоростей (нормальная скорость) согласуется с расчетами, выполненными на основе гидродинамической теории. Значение меньшей скорости (так называемая малая скорость детонации) отличается от нормальной в несколько раз (почти в четыре раза в случае НГЦ).

Явление малой скорости детонации наиболее подробно изучено применительно к жидким ВВ [1—3]. До недавнего времени исследований стационарных низкоскоростных режимов детонации в гранулированных ВВ не проводилось. Лишь в работах [4, 5] отмечалась возможность распространения малой скорости детонации и в подобных взрывчатых системах. В последнее время [6—8] было проведено систематическое исследование низкоскоростных режимов детонации в порошкообразных ВВ. На основе ряда экспериментальных результатов был сделан вывод о том, что химическая реакция при этом протекает в форме взрывного горения [9, 10], а тепловыделение за фронтом ударной волны, вызывающей химическое превращение, является неполным. Неполнота превращения обусловлена конечными размерами детонирующего заряда, ограничивающими время горения зерен ВВ приходом волны разрежения с боковой поверхности, а также относительно небольшими абсолютными скоростями горения в условиях детонационной волны ( $p \sim 10$  кбар). Основная часть зерен ВВ в детонационной волне фактически является инертной добавкой, которую с хорошим приближением можно считать несжимаемой и непрогреваемой. Тепловыделение от догорания частиц не сказывается на значении скорости детонации, поскольку оно происходит за пределами стационарной зоны за передним ударным фронтом. Быстрое падение давления при разлете реагирующих частиц может привести к полному затуханию горения и прекращению реакции.

В работе [11] описан эксперимент, в котором после детонации заряда пороха насыпной плотности ( $D=2,3$  км/сек) удалось обнаружить неразложившиеся зерна пороха, средний вес этих частиц соответствовал приблизительно разложению лишь 30% исходного вещества. По-видимому, эта оценка является завышенной, так как нельзя утверждать, что обнаруженные непрореагировавшие частицы пороха соответствуют таковым непосредственно на конце стационарной зоны за фронтом ударной волны.

Затухание горения происходит за поверхностью Чепмена — Жуге. В работе [5] приводятся интересные визуальные наблюдения за детонацией открытых зарядов тротила, детонирующего с двумя различными стационарными скоростями. «Белое» облако продуктов при детонации с малой скоростью связывали с неполнотой химического превращения в этих условиях.

Помимо возможной неполноты превращения, обусловленной чисто физическими причинами, при детонации с малой скоростью возможна неполнота, связанная с условиями протекания химической реакции. Состав продуктов превращения из-за различия давлений в детонационной волне нормальной детонации и детонации с малой скоростью (они отличаются для порошкообразных ВВ примерно в 3 раза) также может быть различным. Количественных данных о теплотах взрывчатого превращения при низкоскоростном стационарном распространении детонации нет. Настоящая работа посвящена экспериментальному определению теплоты взрыва и состава продуктов взрывчатого превращения при детонации с малой скоростью. Такие данные могут внести определенную ясность в понимание процессов низкоскоростного распространения детонации порошкообразных ВВ и подтвердить либо опровергнуть предполагаемый механизм [7].

Измерение теплот взрывчатого разложения проводилось на калориметрической установке конструкции ИХФ АН СССР [12]. Тепловое значение установки  $k=30750 \pm 30$  кал/град.

Опыты проводились с цилиндрическими зарядами порошкообразного кристаллического тетрила ( $\rho=0,95$  г/см<sup>3</sup>,  $d=20$  мм,  $l=100$  мм, раз-

мер частиц 1,0—1,6 мм), помещаемыми в водяные оболочки, толщина которых варьировалась в широких пределах (до 25 мм). Для инициирования низкоскоростного режима распространения детонации ( $D=2,1$  км/сек) применялась схема передачи детонации от активных насыпных зарядов смеси ТНТ/NaCl (50/50) через тонкую плексигласовую преграду или от насыпных зарядов гексогена через медную пластину. Нормальная скорость детонации ( $D=4,5$  км/сек) возбуждалась от промежуточного насыпного заряда гексогена. Измерение скорости детонации посредством СФР показало, что значение малой скорости детонации не зависит от толщины оболочки.

Водяная оболочка вокруг зарядов необходима для закалки продуктов разложения и торможения догорания отдельных частиц ВВ при разлете в объеме калориметрической бомбы. При детонации зарядов без оболочек практически никакой разницы в измеряемых теплотах взрыва независимо от того, какая из двух стационарных скоростей возбуждалась в исследуемых зарядах, обнаружено не было. Это связано с догоранием частиц ВВ при разлете продуктов.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные измерения теплоты взрывчатого превращения в зависимости от толщины оболочки для двух режимов детонации порошкообразного тетрила (вода жидкая). При нормальной детонации теплота взрыва возрастает с толщиной оболочки, что связано со смещением равновесия реакции генераторного газа в сторону большего тепловыделения. Этот результат типичен для ВВ с отрицательным кислородным балансом и описан в работе [13]. В противоположность этому, при распространении детонации с малой скоростью теплота взрывчатого превращения, отнесенная к единице массы исходного ВВ, существенно уменьшается с толщиной оболочки. Разность теплот взрывчатого превращения при нормальном и низкоскоростном режимах достигает 470 кал/г при увеличении толщины оболочки до 16 мм.

Проводился газовый анализ продуктов взрыва. При расчете состава продуктов взрыва тетрила продукты взрыва инициирующего заряда вычитались из общего количества образовавшихся газов. Некоторые результаты газового анализа продуктов детонации тетрила приведены в таблице.

**Результаты анализа продуктов взрыва тетрила\***

$D$ , км/сек	$Q$ , кал/г	моль/моль ( $C_7H_8O_8N_4$ )			
		$CO_2$	$CO$	$O$	$H_2$
4500	938	0,86	5,40	—	1,62
2100	616	0,06	3,60	2,28	0,50

\* Плотность  $\rho=0,95$  г/см<sup>3</sup>; толщина оболочки  $\delta=16$  мм;  $Q$ —теплота взрыва, вычисленная на основании закона Гесса по результатам анализа ( $H_2O$ —пар).

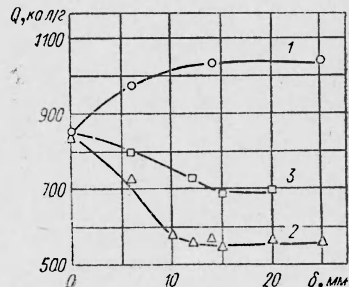


Рис. 1. Зависимость теплоты взрыва тетрила от толщины водной оболочки.

1 — нормальная скорость детонации; 2 — малая скорость детонации без учета непрореагировавшего тетрила; 3 — малая скорость детонации с учетом непрореагировавшего тетрила.

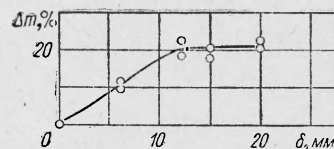


Рис. 2. Зависимость относительного количества неразложившегося тетрила от толщины водной оболочки.

Применение оболочки существенно изменяет состав газообразных продуктов взрыва. При толщинах оболочки 16 мм состав продуктов взрыва практически не меняется, а при низкоскоростной детонации в их составе обнаружены значительные количества окиси азота. Окись азота

является продуктом неполного горения частиц тетрила. Однако не весь тетрил реагирует с образованием неравновесной окиси азота, часть его не разлагается совсем. Исследование твердого остатка, собранного в калориметрической бомбе после низкоскоростной детонации, показало, что в нем содержится значительное количество тетрила. На рис. 2 показана зависимость относительного количества неразложившегося тетрила от толщины оболочки. С увеличением толщины оболочки количество непрореагировавшего вещества достигает 20% от исходной массы заряда. При нормальной детонации никаких остатков ВВ при всех толщинах оболочки обнаружено не было.

На рис. 1, 3 приведена зависимость теплоты взрыва при низкоскоростной детонации от толщины оболочки с учетом поправки на массу непрореагировавшего вещества.

Обнаружение при детонации с малой скоростью непрореагировавшего ВВ и газообразных продуктов неполного распада подтверждает очажный механизм взрывного горения, при котором частицы ВВ воспламеняются в отдельных точках поверхности и сгорают параллельными слоями.

На основе развитых выше представлений и используя экспериментальные результаты, рассчитаем параметры низкоскоростной детонационной волны. Исходным является несжимаемость и непрогреваемость в детонационной волне той доли ВВ, которая не разлагается в детонационной волне. Удельный объем смеси продуктов взрыва и неразложившегося ВВ в детонационной волне можно представить в виде

$$v^* = \beta \bar{v} + \gamma v_1, \quad (1)$$

где  $\beta$  — весовая доля разложившегося ВВ;  $\gamma$  — весовая доля добавки (нераагирующего ВВ);  $v$  — удельный объем продуктов взрыва;  $v_1$  — удельный объем добавки ( $v_1 = \text{const}$ ).

В случае несжимаемой и непрогреваемой добавки уравнение сохранения энергии и условие Чепмена — Жуге для смеси ВВ с добавкой сводятся к соответствующим уравнениям для ВВ, но при той плотности, которой ВВ обладает в смеси.

Для оценки параметров детонационной волны в указанной постановке задачи было применено уравнение состояния, предложенное Больцманом:

$$p v = n R T \sigma \left( \frac{b}{v} \right), \quad (2)$$

где

$$\sigma \left( \frac{b}{v} \right) = 1 + \frac{b}{v} + 0,625 \left( \frac{b}{v} \right)^2 + 0,287 \left( \frac{b}{v} \right)^3 + 0,193 \left( \frac{b}{v} \right)^4. \quad (3)$$

Здесь  $n$  — число молей газообразных продуктов взрыва на 1 г ВВ;  $b$  — второй вириальный коэффициент газовых молекул, независимый от температуры. Для смеси продуктов взрыва можно считать

$$b = \sum b_i n_i, \quad (4)$$

где  $n_i$  — число молей  $i$ -ой компоненты продуктов взрыва;  $b_i$  — вириальный коэффициент этой компоненты. Если записать исходное уравнение состояния в форме

$$p [v - \alpha(v)] = n R T, \quad (5)$$

где  $\alpha(v)$  — коэффциентом газобразных молекул, то

$$\alpha = v \left( 1 - \frac{1}{\sigma} \right), \quad \frac{d\alpha}{dv} = 1 - \frac{1}{\sigma} - \frac{x}{\sigma^2} \frac{d\sigma}{dv}, \quad (6)$$

где  $x = \frac{b}{v}$ . Условие Чепмена — Жуге  $\left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = \frac{p}{v_0 - v}$  для данного уравнения состояния приводит к следующему выражению для удельного объема продуктов взрыва в детонационной волне:

$$v = \frac{k v_0 + \alpha}{k + 1}, \quad (7)$$

где

$$k = 1 + \frac{nR}{c_n} - \frac{d\alpha}{dv}. \quad (8)$$

Уравнение сохранения потоков массы и количества движения позволяет получить соотношения для скорости детонации и массовой скорости продуктов взрыва:

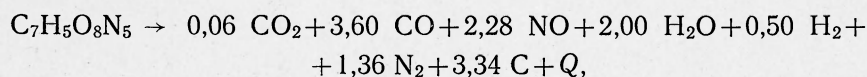
$$D = v_0^* \frac{k + 1}{v_0 - \alpha} \sqrt{\frac{nRT}{k\beta}}, \quad (9)$$

$$U = \sqrt{\frac{nRT}{k} \beta}. \quad (10)$$

Уравнение сохранения энергии имеет вид

$$\bar{c}_v (T - T_0) = Q + \frac{nRT}{2k}. \quad (11)$$

Таким образом, для расчета параметров детонационной волны имеются уравнения (5), (7), (9) — (11). Полученная система уравнений решалась методом последовательных приближений. Уравнения разложения ВВ в детонационной волне записывались с использованием результатов газового анализа:



$$Q = 616 \text{ кал/г (H}_2\text{O — пар)}.$$

Величина  $\beta = 0,8$  в соответствии с полученными выше экспериментальными результатами. Для скорости детонации решение дает значение  $D = 3,7 \text{ км/сек}$ , что значительно выше экспериментально определенного ( $2,1 \text{ км/сек}$ ). Это несогласие связано, по-видимому, с тем, что экспериментально найденное относительное количество непрореагировавшего ВВ ( $\sim 20\%$ ) не отвечает таковому в конце реакционной зоны. В детонационной волне не разлагается значительно большее ( $\sim 70\%$ ) относительное количество исходного ВВ. Частично зерна ВВ реагируют уже за пределами поверхности Чепмена — Жуге, что дает суммарный тепловой эффект, не влияющий на величину скорости распространения детонационной волны. Вопрос о том, где именно за ударным фронтом происходит закалка равновесия и прекращается горение разлетающихся частиц, не вполне ясен, что затрудняет отождествление измеренной теплоты взрыва при низкоскоростном распространении с тем теплом, которое выделяется в детонационной волне и определяет скорость детонации.

Анализ состава продуктов взрыва указывает на крайнюю нежелательность реализации низкоскоростных режимов детонации в условиях

