

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, С. Д. Савров, А. Н. Андриевский. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1, 2.
2. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ПМТФ, 1963, 6.
3. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
4. Е. А. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1968, 4, 3.
5. Е. А. Александров, В. А. Веретенников и др. ФГВ, 1967, 3, 4.
6. В. А. Веретенников. Канд. дисс. ИХФ АН СССР. М., 1969.
7. А. М. Гольдбиндер, Л. М. Светлова. Докл. АН СССР, 1962, 192.
8. S. Jacobs, T. Liddiard, B. Grimmer. 9-th Symposium (International) on Combustion, Ac. Pres., 1963.

УДК 534.222.2 + 662.217

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ ВВ, СОДЕРЖАЩИХ МЕТАЛЛЫ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

*Л. Н. Стесик*  
(Москва)

В предлагаемой работе изложены результаты расчета параметров детонации смесей ВВ с металлами. Основное внимание уделено составам с алюминием, поскольку он довольно широко используется в промышленных ВВ [1]. Кроме этого, рассмотрены смеси с бериллием и бором.

Широкое использование алюмосодержащих ВВ в промышленности обусловило интерес к ним со стороны исследователей. В ряде работ были изучены взрывчатые характеристики различных составов с алюминием [1—6]. В результате этих исследований было установлено, что добавление алюминия к мощным вторичным ВВ с нулевым или отрицательным кислородным балансом (тротил, гексоген, амматол и др.) или к нитрату аммония, как правило, существенно увеличивает работоспособность этих ВВ [1, 6]. Бризантность или импульс детонационной волны, измеренные с помощью столбиков Гесса [1] или бризантометра Каста [5], в некоторых пределах содержания алюминия во вторичных ВВ остаются неизменными. Скорость детонационной волны во вторичных ВВ и давление на ее фронте уменьшаются [2, 4, 5]. Увеличение скорости детонации наблюдается в смесях алюминия с нитратом аммония [1, 2].

Объясняя понижение скорости детонации вторичных ВВ при добавлении к ним алюминия, авторы выдвигают следующие возможные причины.

1. Уменьшение показателя политропы в уравнении состояния продуктов детонации, вызванное наличием в них конденсированной фазы ( $Al_2O_3$ ) [1].

2. Образование в детонационной волне главным образом низших оксидов алюминия ( $Al_2O$ ,  $AlO$ ) в газообразном состоянии, сопровождающееся незначительным тепловыделением [3, 4].

3. Неполное превращение алюминия в зоне химической реакции детонационной волны вследствие малой скорости окисления частиц металла по сравнению с разложением основного ВВ [1].

При обосновании причин снижения скорости детонации все авторы явно или неявно исходят из известного выражения для скорости детонации

$$D = \sqrt{2(n^2 - 1)Q}, \quad (1)$$

где  $Q$  — тепловыделение в детонационной волне;  $n$  — показатель политропы уравнения состояния продуктов детонации. Согласно этой формуле, скорость детонации алюминизированных ВВ должна бы существенно увеличиваться, так как при полном окислении металла величина  $Q$  возрастает вдвое и даже больше.

Однако применение формулы (1) к ВВ, содержащим в продуктах детонации конденсированную фазу, неправильно. Это можно легко показать на примере систем, подчиняющихся уравнению состояния идеального газа. Рассмотрение детонации ВВ с высокими плотностями в настоящей работе не производится.

Как известно [7], ударная адиабата продуктов детонации имеет следующий вид:

$$\frac{D^2}{2} - \frac{(D-u)^2}{2} = I - I_0, \quad (2)$$

где  $D$  и  $u$  — скорости детонации и потока продуктов;  $I_0$  — удельное теплосодержание исходного ВВ;  $I$  — полное удельное теплосодержание продуктов детонации. Величина  $I$  записывается в виде

$$I = \sum n_i (\Delta H_{fi} + \Delta H_{mi}) + H(T). \quad (3)$$

Здесь  $n_i$  и  $\Delta H_{fi}$  — весовая доля и удельная теплота образования компонентов продуктов детонации;  $\Delta H_{mi}$  — теплота фазового перехода. Обозначив

$$\sum n_i (\Delta H_{fi} + \Delta H_{mi}) - I_0 = -Q, \quad (4)$$

получим

$$\frac{D^2}{2} - \frac{(D-u)^2}{2} = H(T) - Q. \quad (5)$$

Величина  $H$  для двухфазной смеси записывается следующим образом:

$$H(T) = \alpha \frac{c_k}{\mu_k} T + (1 - \alpha) \frac{c_p}{\mu_r} T, \quad (6)$$

где  $\alpha$ ,  $c_k$  и  $\mu_k$  — весовая доля, молярная теплоемкость и молекулярный вес конденсированной фазы;  $c_p$  и  $\mu_r$  — молярная теплоемкость и молекулярный вес газовой фазы. Подставив в формулу (6) выражение для температуры ( $T$ ) через давление ( $p$ ) и объем  $V$  из уравнения состояния идеального газа и пренебрегая объемом конденсированной фазы, получим

$$H = \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{c_k}{R} \frac{\mu_r}{\mu_k} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) p V. \quad (7)$$

Здесь  $\gamma$  — показатель изэнтропии газообразных продуктов детонации;  $R$  — газовая постоянная.

Подставив выражение (7) в формулу (5) и заменив  $(D-u)^2$  через  $p$  и  $V$  из законов сохранения вещества и импульса [7], в случае  $p \gg p_0$ , получим

$$D^2 \left[ 1 - \frac{V^2}{V_0^2} - 2 \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{c_k}{R} \frac{\mu_r}{\mu_k} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left( 1 - \frac{V}{V_0} \right) \frac{V}{V_0} \right] = -2Q \quad (8)$$

Отношение  $V/V_0$  в детонационной волне определяется из условия Чепмена — Жуге  $D - u = a$ . Величина скорости звука ( $a$ ) в продуктах детонации может быть найдена из уравнения изэнтропы двухфазной смеси:

$$p V^k = \text{const}, \quad (9)$$

$$k = \frac{\frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{c_p \mu_k}{c_k \mu_r}}{\frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{c_v \mu_k}{c_k \mu_r}}.$$

Выражение для отношения объемов имеет обычный вид

$$\frac{V}{V_0} = \frac{k}{k+1}. \quad (10)$$

Подставив это отношение в формулу (8), получим

$$D^2 = \frac{2(k+1)^2 Q}{2k \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{c_k \mu_r}{R \mu_k} + \frac{1}{\gamma-1} \right) - 1}. \quad (11)$$

Как видно из формулы (11), величина скорости определяется в основном значениями  $Q$  и  $\alpha$ . При  $\alpha$ , приближающемся к единице, она стремится к нулю, при  $\alpha=0$  выражение (11) превращается в формулу (1). Однако и другие параметры, характеризующие продукты детонации  $k$ ,  $\gamma$ ,  $\mu_r$ ,  $\mu_k$ ,  $c_k$ , могут оказать существенное влияние на величину скорости. Эти параметры определяют степень влияния конденсированной фазы на скорость детонации. Чем меньше величина  $\mu_r$  и удельной теплоемкости конденсированной фазы ( $c_k^0 = c_k/\mu_k$ ), тем слабее это влияние.

Удельные теплоемкости  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{BeO}$  в жидком состоянии соответственно равны 0,34; 0,44; 0,40 и 0,64 кал/г·град. Следовательно, наименьшее влияние на скорость детонации будет оказывать  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , наибольшее  $\text{BeO}$ . Состав газообразных продуктов оказывает влияние на скорость детонации главным образом через параметры  $\mu_r$  и  $\gamma$ . Конденсированная фаза влияет на скорость детонации также и через показатель изэнтропы  $k$ , который уменьшается с ростом. Однако, как будет показано ниже, изменение его невелико.

Таким образом, появление конденсированных продуктов в детонационной волне действует в сторону уменьшения ее скорости. Одновременно возрастает величина  $Q$ , если в качестве добавок к ВВ используются высокоэнергетические металлы. Изменение скорости детонации определяется соотношением этих двух факторов.

Полученное выражение для скорости детонации (11) является приближенным, поскольку многие его параметры ( $k$ ,  $\gamma$ ,  $\mu_r$ ,  $Q$ ) зависят от температуры и состава продуктов детонации, что не учитывалось при выводе. Соответственно оно позволяет производить лишь качественные оценки.

Расчет параметров детонационной волны и состава продуктов детонации может быть проведен с достаточно высокой точностью при использовании электронно-вычислительных машин. Такие расчеты были проведены с помощью вычислительной машины М-20.

При составлении программы расчета предполагалось, что в точке Чепмена — Жуге продукты детонации находятся в термодинамическом равновесии, а скорости движения и температура конденсированной и газовой фаз равны. Объемом, занимаемым конденсированной фазой, пренебрегали, поскольку он много меньше объема газовой фазы. Для по-

Таблица 1

ВВ	Al, %	$D$ , м/сек	$u$ , м/сек	$p$ , атм	$V$ , л/кг	$T$ , °К	$k$	$\alpha$	$\delta$
39% H <sub>2</sub> + +61% O <sub>2</sub>	0	3808	1619	12,92	2935	2384	1,247	—	—
	5	3796	1626	13,55	2773	2486	1,234	0,094	1,000
	15	3750	1631	14,91	2452	2692	1,211	0,283	1,000
	20	3716	1626	15,60	2297	2795	1,200	0,378	1,000
	25	3674	1621	16,34	2140	2898	1,188	0,471	0,998
	30	3622	1618	17,16	1980	3000	1,170	0,563	0,991
ТЭН	0	2194	1024	223	53,8	3806	1,150	—	—
	5	2201	1031	234	50,7	4003	1,140	0,084	0,890
	10	2212	1032	251	48,1	4207	1,143	0,167	0,883
	15	2212	1038	266	45,4	4397	1,142	0,244	0,840
	20	2200	1031	288	42,5	4540	1,130	0,290	0,765
Пирокси- лин	0	2124	971	204	54,3	3435	1,182	—	—
	5	2150	991	222	51,2	3672	1,164	0,091	0,966
	10	2168	1003	239	48,4	3897	1,159	0,180	0,950
	15	2172	1016	256	45,6	4091	1,153	0,257	0,905
	20	2151	1019	271	42,5	4177	1,130	0,300	0,795
Гексоген	0	2371	1092	257	53,9	3959	1,162	—	—
	5	2373	1104	272	50,9	4127	1,150	0,072	0,765
	10	2368	1099	286	48,3	4280	2,154	0,141	0,748
	15	2343	1095	297	45,5	4364	1,149	0,188	0,630
	20	2295	1067	303	42,8	4349	1,141	0,288	0,550
Тротил	0	1996	903	179	54,8	2710	1,208	—	—
	5	1971	922	192	50,7	2848	1,140	0,031	0,327
	10	1924	905	194	47,7	2900	1,121	0,050	0,262
	15	1868	879	191	45,3	2926	1,133	0,063	0,224

следней принималось уравнение состояния идеального газа. Термодинамические функции для расчета равновесия взяты из справочника [8].

Прежде всего были рассчитаны параметры детонационной волны, распространяющейся по взвеси алюминия в газообразной смеси водорода с кислородом при начальном давлении 1 атм и температуре 293°К. Исходная газообразная смесь соответствовала максимальному значению скорости детонации и содержала 39% водорода по весу. Начальный объем ( $V_0$ ) составлял 5106 л/кг. При введении алюминия в смесь соотношение между водородом и кислородом не изменялось. Начальный объем смеси принимался равным 5106 (1— $\beta$ ) л/кг ( $\beta$  — весовая доля алюминия).

Результаты этих расчетов представлены в табл. 1, где указаны значения скорости детонации ( $D$ ), скорости потока продуктов ( $u$ ), температуры ( $T$ ), давления ( $p$ ) и удельного объема ( $V$ ), показатель изэнтропы ( $k$ ), весовая доля конденсированной фазы в продуктах детонации ( $\alpha$ ) и для алюминия, превратившегося в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\delta$ ).

Как видно из табл. 1, скорость детонации монотонно уменьшается с ростом количества алюминия в смеси, тогда как скорость потока продуктов проходит через максимум. Температура и давление в детонационной волне растут, а показатель изэнтропы падает.

Дальнейшие расчеты позволили определить оптимальное соотношение газовых компонентов при заданном содержании алюминия. Оказалось, что рост концентрации металла требует увеличения водорода в смеси. Оптимальный состав с 20% алюминия содержит 54% водорода

по весу. Результаты расчета скорости детонации оптимальных составов изображены на рис. 1. В этом случае имеет место небольшое увеличение скорости детонации: при содержании 20% алюминия  $D=3827$  м/сек.

Последующие расчеты были выполнены для смесей тэна, пироксилина (13,2% азота), гексогена и тротила с алюминием, бериллием и бором. При их проведении принималось, что  $p_0=1$  атм,  $T_0=293^\circ$  К,

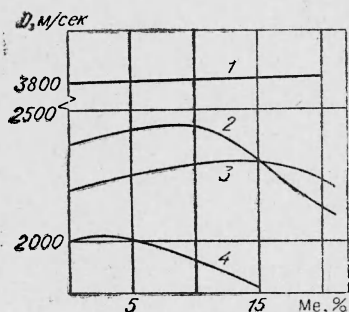


Рис. 1. Скорости детонации смесей с металлами.

1 —  $H_2+O_2+Al$ ; 2 — гексоген + Ве;  
3 — тэн + Ве; 4 — тротил + Ве.

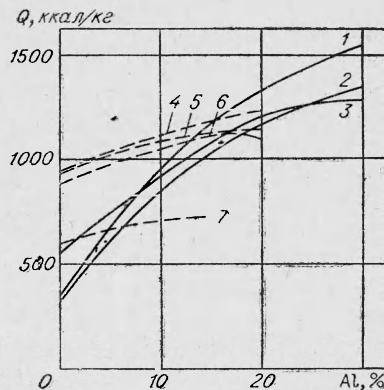


Рис. 2. Тепловыделение при детонации смесей ВВ с алюминием.

1 —  $NH_4NO_3$ ; 2 —  $NH_4ClO_4$ ; 3 —  $C_2(NO_2)_6$ ;  
4 — тэн; 5 — пироксилин; 6 — гексоген;  
7 — тротил.

$V_0=100(1-\beta)$  л/кг. Результаты расчетов составов с алюминием тоже представлены в табл. 1. На рис. 2 показано влияние алюминия на величину тепловыделения ( $Q$ ) в детонационной волне этих составов, которая вычислялась по равновесному составу продуктов детонации в точке Чепмена — Жуге.

Кроме смесей алюминия с вторичными ВВ были рассмотрены смеси с окислителями: гексанитроэтаном, нитратом и перхлоратом аммония (см. рис. 2). Результаты этих расчетов представлены в табл. 2.

При анализе полученных результатов прежде всего обращает на себя внимание слабое влияние алюминия на скорость детонации ВВ с от-

Таблица 2

ВВ	Al, %	$D$ , м/сек	$u$ , м/сек	$p$ , атм	$V$ , л/кг	$T$ , °К	$k$	$\alpha$	$\delta$
Гексанитроэтан	0	1831	839	153	54,17	3298	1,177	—	—
	10	1974	918	200	48,16	4309	1,147	0,188	0,994
	20	2023	947	237	42,57	5092	1,106	0,334	0,885
	25	2003	943	250	39,78	5237	1,096	0,361	0,757
	30	1980	931	261	37,11	5411	1,122	0,368	0,648
$NH_4NO_3$	0	1575	703	110	55,40	1702	1,230	—	—
	10	1974	919	200	48,07	3149	1,141	0,189	0,999
	20	2073	978	251	42,28	3947	1,118	0,378	0,996
	25	2087	982	271	39,72	4221	1,120	0,470	0,995
	30	2089	987	298	36,91	4400	1,111	0,542	0,971
$NH_4ClO_4$	0	1519	675	102	55,58	1920	1,240	—	—
	10	1889	880	183	48,06	3457	1,140	0,185	0,978
	20	1983	933	229	42,37	4318	1,122	0,345	0,913
	25	1991	939	247	39,67	4615	1,120	0,405	0,858
	30	1985	936	263	36,99	4820	1,117	0,445	0,784



рицательным кислородным балансом. Несмотря на существенное увеличение тепловыделения (в смесях с тэном и пироксилином примерно на 30%), максимальное увеличение скорости детонации составляет всего около 2%.

Доля полностью окислившегося алюминия зависит от температуры и содержания кислорода во взрывчатом веществе. В смесях с окислителями она существенно выше, чем в составах с вторичными ВВ. Соответственно рост тепловыделения существенно больше; в смесях с  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$  и  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  происходит его увеличение более чем в 4 раза, в смеси с гексанитроэтаном — в 2,4 раза. Конечно, более сильное относительное увеличение тепловыделения в смесях с окислителями объясняется главным образом низким выделением тепла при детонации чистых окислителей, которое в 2/2 раза меньше, чем у вторичных ВВ. Однако при содержании алюминия, превышающем 20%, абсолютные величины тепловыделения в смесях с окислителями выше.

Высокое относительное увеличение  $Q$  у окислителей обуславливает более сильный рост скорости детонации, хотя абсолютные значения скорости у смесей алюминия с вторичным ВВ, кроме тротила, выше. Дело в том, что максимум тепловыделения в смесях с окислителями соответствует составам, содержащим от 20 до 30% алюминия, при этом в продуктах детонации содержится от 33 до 55% конденсированной фазы, в то время как оптимальные по скорости составы вторичных ВВ содержат не более 25% конденсированной фазы в продуктах детонации.

Соотношение между ростом тепловыделения и количеством конденсированных продуктов в смесях вторичных ВВ с алюминием таково, что скорость детонации изменяется незначительно. Смеси с другими металлами могут дать иное изменение скорости. Это иллюстрируется рис. 1, на котором показаны результаты расчета скорости детонации составов с бериллием. Подъем скорости детонации несколько больше, чем с алюминием. У тэна он составляет 5%, у гексогена — 3%. Даже в смеси с тротилом наблюдается увеличение скорости детонации примерно на 1%.

Расчет параметров детонаций смесей с бором показал, что в большинстве случаев в продуктах детонации не образуется конденсированной фазы. Основные продукты окисления бора —  $\text{HBO}_2$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_2$  — находятся в газообразном состоянии. В смесях бора с тротилом образуются конденсированный углерод и нитрид бора.

Таким образом, на примере систем, подчиняющихся идеальному уравнению состояния, показано, что в смесях металлов с ВВ, имеющими отрицательный кислородный баланс, максимальное увеличение скорости детонации составляет небольшую величину (2—5%), несмотря на высокую степень окисления металла (75—90%). Более существенное увеличение скорости детонации (на 10—30%) имеет место в смесях алюминия с окислителями.

Совершенно очевидно, что полученные результаты нельзя непосредственно распространять на детонацию ВВ с высокой плотностью. Однако можно предполагать, что и в этом случае характер влияния металлов на скорость детонации ВВ, различных по составу, будет аналогичным, т. е. относительно небольшое увеличение скорости в смесях с вторичными ВВ и более существенное в смесях с окислителями.

Автор выражает глубокую благодарность Л. С. Салакатовой, В. М. Васильеву, Ю. М. Петрову и Н. С. Шведовой за помощь в производстве расчетов.

*Поступила в редакцию  
7/VI 1970*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Я. Светлов. Сб. «Взрывное дело», № 52/9. М., Госгортехиздат, 1963.
2. М. А. Cook, A. S. Fillerttal. J. Phys. Chem. 61, 1957, 2, 189.
3. Ю. Б. Харитон, С. Б. Ратнер. ЖФХ, 1946, 20, 2.
4. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил, М. И. Арифов. Докл. АН СССР, 1960, 131, 5.
5. А. Я. Апин, Е. П. Бардин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 52/9. М., Госгортехиздат, 1963.
6. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. Сб. «Физика взрыва», № 4, 1955.
7. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеец. Теория детонации. М., 1955.
8. Справочник «Термодинамические свойства индивидуальных веществ». М., Изд-во АН СССР, 1962.

УДК 532.593 + 662.217.7

### РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ СО СПАДАЮЩИМ ПРОФИЛЕМ ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКИХ ВВ

*С. Н. Буравова, А. Н. Дремин*  
(Москва)

Механизм возбуждения реакции ударной волны принято считать тепловым, хотя прямое доказательство такого фактора отсутствует. Оценки температуры ударно сжатого вещества [1—5] показывают, что температура за фронтом ударной волны достаточно велика, и тепловой механизм возбуждения реакции может объяснить особенности развития реакции за ударной волной.

Время развития реакции и однородных ВВ мало — несколько микросекунд и менее, что позволяет пренебречь процессами переноса и рассматривать взрыв в адиабатических условиях без отвода тепла.

Предполагается, что константы скорости мономолекулярного распада не зависят от степени сжатия вещества, иными словами, молекула в процессе сжатия не деформируется, а характеристические частоты колебаний атомов в молекуле не меняются.

Химические реакции в ударной волне принято описывать реакцией нулевого порядка [1—5]. Эта модель упрощает действительные кинетические закономерности и наиболее проста и удобна при количественной обработке экспериментального материала, поскольку не учитывает зависимость скорости реакции от концентрации продуктов.

Когда ударная волна не имеет прямоугольного профиля (за ударной волной следует волна разряжения), в сжатом веществе происходит два конкурирующих процесса: химическая реакция увеличивает температуру вещества, волна разряжения — снижает. От преобладания одного из процессов зависит, будет ли иметь место быстрое самоускорение реакции, необходимое для развития взрыва. Если волна разгрузки компенсирует увеличение температуры, реакция теряет взрывной характер.

Данная работа предпринята с целью провести учет действия волны разряжения.

Задача сводится к совместному решению уравнений гидродинамики и кинетики. В общем случае такая система может быть решена численно на электронно-вычислительной машине. Однако для определения возможности взрыва и оценки периода индукции за ударной волной задача