

шом количестве  $\text{Fe}_2\text{O}_4$  и  $\text{FeO}$ . Однако проведенные исследования показали, что такие соединения лишь незначительно увеличивают скорость горения, т. е. являются менее активными катализаторами, чем  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

На основании полученных результатов можно полагать, что механизм действия  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  при горении баллиститного пороха заключается в ускорении взаимодействия сажи с окисью азота с образованием  $\text{CO}_2$ -продукта с высокой теплотой образования. В связи с тем, что скорость горения пороха с комбинированной добавкой увеличивается, можно полагать, что ускорение указанного взаимодействия происходит в зоне, влияющей на скорость горения, т. е. в конденсированной фазе или непосредственно над поверхностью пороха.

Указанная схема отражает только начальное и конечное состояние веществ; вполне возможно, что она реализуется через стадию образования закиси азота — весьма реакционноспособного в условиях горения компонента. Не исключено также, что при окислении сажи окись железа может выполнять роль передатчика кислорода, отдавая его с поверхности саже и восстанавливаясь до металла, который быстро окисляется снова до  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , например, окисью азота. Существенным моментом при горении пороха с комбинированным катализатором является также и то, что в присутствии сажи, как и в случае свинцового катализатора [13], не наблюдается агломерация частиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , и таким образом сохраняется большая поверхность катализатора, что обеспечивает высокую эффективность его действия.

*Поступила в редакцию  
10/XII 1980*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Боболев, М. Л. Геп и др. ФГВ, 1971, 7, 3, 366.
2. О. П. Коробейничев, А. М. Викторенко и др. ФГВ, 1972, 8, 4, 511.
3. И. И. Лобанов, В. Н. Чуваев, И. И. Бахман. ФГВ, 1973, 9, 3, 398.
4. О. П. Коробейничев, А. М. Викторенко и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 345.
5. И. И. Лобанов, И. И. Бахман. Химическая физика процессов горения и взрыва. ИХФ АН СССР, 1977.
6. D. J. Hewkin, J. A. Hicks et al. Comb. sci. Techn., 1971, 2, 307.
7. А. П. Денисюк, А. Ф. Жевлаков и др. ФГВ, 1974, 10, 2, 197.
8. А. П. Денисюк, Т. М. Козырева, В. Г. Хубаев. ФГВ, 1975, 11, 2, 315.
9. Кубота, Олемиллер и др. РТК, 1974, 12, 12, 118.
10. А. С. Андросов, А. П. Денисюк и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 338.
11. А. С. Андросов, М. И. Денисенко и др. Изв. вузов. Химия и хим. технология, 1976, XIX, 8.
12. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1964, 4.
13. А. П. Денисюк, А. Д. Марголин и др. ФГВ, 1977, 13, 4, 576.

#### О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕДОСЖАТЫХ РЕЖИМОВ ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОПЛОТНЫХ ВВ

*В. С. Соловьев, В. П. Крамаренко,  
А. И. Чернов, С. Г. Андреев, М. М. Бойко  
(Москва)*

Возрастающий интерес к процессу детонации низкоплотных ВВ (плотность менее насыпной) объясняется, с одной стороны, возможностью использования его для решения ряда практически важных задач, а с другой, отличиями механизма детонации низкоплотных ВВ от

механизма детонации высокоплотных и жидких ВВ [1, 2]. Настоящая работа посвящена изучению возможностей реализации в низкоплотных ВВ недосжатых режимов детонации.

Теоретически, исходя из общих законов сохранения, возможность существования недосжатых режимов детонации в ВВ показана в работах [3—5]. Отмечалось, что для этого необходимо возбуждение реакции в детонационном комплексе со скоростью  $D_c$ , большей, чем скорость нормальной детонации для данного ВВ  $D_n$ . Причем реакция должна возбуждаться не за счет сжатия в ударной волне, а поджиганием, например светом. В отдельных работах отмечена возможность практической реализации недосжатых режимов детонации в зарядах высокоплотных или насыпных ВВ [3, 6, 7]. В то же время конкретных теоретических обоснований и доступных (для практической реализации недосжатых режимов) рекомендаций до настоящего времени нет.

Используя основные особенности процесса детонации низкоплотных ВВ [1, 2], в частности сравнительно небольшие скорости нормальной детонации ( $D_n = 2,0 \div 5,5 \cdot 10^3$  м/с), а также анализируя условия, необходимые для реализации недосжатых режимов [3—5], можно предположить, что в низкоплотных ВВ возможна практическая реализация недосжатых режимов детонации при возбуждении реакции с помощью тонких шнуров высокоплотного ВВ, обладающих большой скоростью детонации, проложенных в определенном порядке вдоль оси заряда. Такой подход аналогичен использованному в работах [6, 7]. В этом случае необходимо иметь в виду, что возбуждение реакции со скоростью  $D_c$  происходит не по диаметру заряда, а только в тех местах, где проложены шнуры. Поэтому недосжатый режим будет реализован не в каждом элементарном объеме заряда, а по истечении некоторого времени с момента возбуждения реакции и только при определенной частоте шнуров, обеспечивающей достаточно быстрое выравнивание давления в продуктах детонации между шнурами.

Возможность реализации недосжатых режимов детонации этим способом исследовалась на зарядах ВВ с продольно расположенными шнурами из листового ВВ толщиной 0,4 и шириной 3 мм. Частота расположения шнуров менялась. Аквариумным методом, а для  $\rho_0 < 0,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> с помощью пьезодатчиков измерялись давления в детонационном комплексе. Определялись расстояния между шнурами  $a$ , начиная с которых снижались эти давления. Схема экспериментов и типичные фоторегистрации приведены на рис. 1, 2.

Анализ полученных данных показывает, что для зарядов с  $\rho_0 \leq 0,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> при  $a \leq 10$  мм резко падает пиковое давление (в нагружаемой воде в 3—5 раз) и профиль имеет характерную ступеньку с постоянными параметрами. Таким образом, для исследуемых зарядов при  $a \leq 10$  мм время выравнивания параметров по диаметру заряда достаточно мало; зона, в которой происходит это выравнивание, значительно меньше зоны квазистационарного течения с постоянными параметрами, характерной для недосжатого режима, и весь заряд детонирует в недосжатом режиме. Учитывая, что в рассматриваемых зарядах зона выравнивания параметров по диаметру невелика, детонация распространяется с постоянной скоростью  $D_c$ , соответствующей скорости нормальной детонации листового ВВ, при этом доля дополнительной энергии от шнуров мала (3—5% от общей энергии заряда). Оценим параметры детонации в указанных зарядах. Используя модель процесса детонации [3] для момента полного выделения энергии, получим:

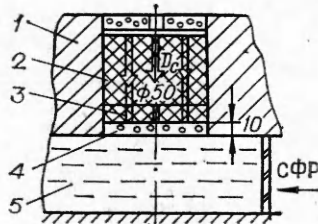


Рис. 1. Постановка опытов. 1 — бомба; 2 — высокоплотное ВВ; 3 — листовое ВВ; 4 — пенопласт; 5 — вода.

$$p/p_n = \frac{1}{R^2} (1 - \sqrt{1 - R^2}), \quad (1)$$

$$u/u_n = \frac{1}{R} (1 - \sqrt{1 - R^2}), \quad (2)$$

$$c/c_n = \frac{1}{R} \frac{k+1}{k} \sqrt{\frac{k}{(k+1)^2} (1 - \sqrt{1 - R^2}) (k + \sqrt{1 - R^2})}, \quad (3)$$

$$x_c/l = \frac{k + \sqrt{1 - R^2}}{k+1} - \sqrt{\frac{k}{(k+1)^2} (1 - \sqrt{1 - R^2}) (k + \sqrt{1 - R^2})}, \quad (4)$$

где  $R = D_n/D_c$  — характеристика недосжата процесса (степень недосжата);  $p$ ,  $p_n$  — давление детонации в недосжатом и нормальном режиме;  $u$ ,  $u_n$  — массовая скорость при детонации в недосжатом и нормальном режиме;  $c$ ,  $c_n$  — скорость звука в ПД при недосжатом и нормальном режиме;  $x_c/l$  — доля длины заряда, которую составляет область с постоянными параметрами;  $k$  — показатель изэнтропии в уравнении состояния ПД  $p = A\rho^k$ , который для различных значений начальной плотности  $\rho_0$  вычислялся по зависимости [1]  $k = 1,33 + 1,13\rho$ .

Результаты расчетов по (1), (2), (4) для  $k = 2$  представлены на рис. 3, там же нанесены экспериментальные данные, которые удовлетворительно согласуются. Анализ полученных результатов показывает, что наиболее интенсивное снижение параметров детонации наблюдается при небольшой степени недосжата ( $0,7 \leq R \leq 1,0$ ).

Используя выражение для ширины квазистационарной зоны (4), учитывая, что скорость звука в продуктах детонации слабо зависит от режима детонации, а также принимая, что выравнивание параметров по диаметру заряда происходит после трех волнообменов между шнурами, получим условие для оценки расстояния между шнурами, обеспечивающего недосжатый режим детонации:

$$a/l \leq \frac{k+1}{k} R \left[ \frac{k + \sqrt{1 - R^2}}{k+1} - \sqrt{\frac{k}{(k+1)^2} (1 - \sqrt{1 - R^2}) (k + \sqrt{1 - R^2})} \right]. \quad (5)$$

Результаты расчетов по (5) для условия равенства обеих частей представлены на рис. 4, там же нанесены результаты экспериментов. Анализ полученных данных показывает, что в исследуемых зарядах наилучшие условия для реализации недосжатых режимов детонации имеют место при  $0,35 \leq R \leq 0,85$ .

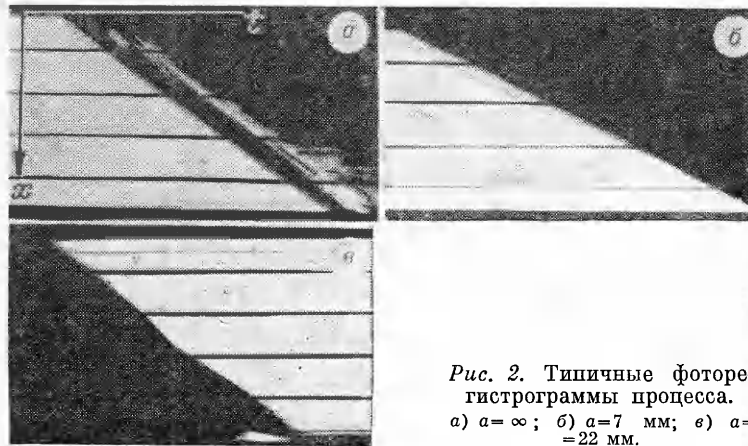


Рис. 2. Типичные фоторегистрограммы процесса.  
а)  $a = \infty$ ; б)  $a = 7$  мм; в)  $a = 22$  мм.

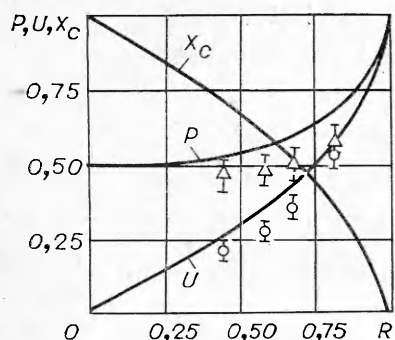


Рис. 3. Параметры детонации в недосжатых режимах ( $P=p/p_n$ ,  $U=u/u_n$ ,  $X_c=x_c/l$ ),  $R=1$  — нормальный режим,  $R=0$  — мгновенная детонация.

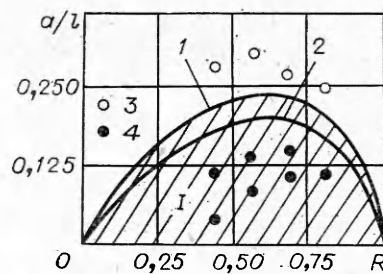


Рис. 4. Условия, обеспечивающие реализацию недосжатых режимов.

Кривые — теория: 1 —  $\rho_0=0,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, 2 —  $\rho_0=0,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; эксперимент: 3 — режим не реализован, 4 — реализован; I — область требуемых соотношений.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В низкоплотных ВВ возможна практическая реализация недосжатых режимов детонации с помощью шнуров более плотного ВВ, уложенных с определенной частотой вдоль оси заряда. (Для  $\rho_0 \leq 0,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и шнуров из применяемого листового ВВ расстояние между шнурами не должно превышать  $10 \cdot 10^{-3}$  м.)

2. Для зарядов низкоплотного ВВ, в которых недосжатие организуется указанным способом, наилучшие условия для реализации недосжатых режимов имеют место при показателе недосжатия  $0,35 \leq R \leq 0,85$ .

3. В недосжатых режимах детонации, распространяющихся с постоянной скоростью, наиболее резкое снижение параметров наблюдается при сравнительно небольшом недосжатии процесса ( $0,7 \leq R \leq 1,0$ ).

Поступила в редакцию  
15/XII 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Соловьев, С. Г. Андреев и др. — В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
2. М. М. Бойко, В. Н. Крамаренко, В. С. Соловьев. — В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
3. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: ГИТЛ, 1955.
4. J. Taylor. Detonation in Condensed Explosives. Clarendon Press, Oxford, 1952.
5. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных ВВ. М.: Наука, 1970.
6. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.
7. И. Т. Бакиров, Г. А. Воротеляк и др. — В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.