

тонации в свободном заряде. Экспериментальные результаты по распространению многофронтной детонации в газовом слое указывают на необходимость корректировки расчетных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. P. Sommers, R. B. Morrison. Phys. fluids, 1962, 5, 241.
2. E. K. Dabora, J. A. Nicholls, R. B. Morrison. 10-th Symp. (Intern.) on Combustion, Pittsburgh, 1964.
3. S. Tsuge e. a. Astr. Acta, 1970, 15, 377.
4. T. G. Adams. AIAA. J., 1978, 16, 1035.
5. S. Tsuge, T. Fujiwara. ZAMM, 1974, 54, 157.
6. S. B. Murroy, J. H. Lee. 9-th ICOGERS, France, 1983.
7. А. А. Васильев. ФГВ, 1982, 18, 3.
8. А. А. Васильев, В. А. Субботин.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 62. Новосибирск, 1983.
9. Г. И. Абрамович. Турбулентное смешение газовых струй. М. Наука, 1974.
10. С. М. Горлин, И. П. Слезингер. Аэродинамические измерения. М.: Наука, 1964.
11. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчий. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Наука, 1965.
12. В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1980, 16, 1.
13. Ю. Б. Харитон.— В кн.: Вопросы теории взрывчатых веществ. Вып. 1. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
14. А. И. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
15. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев, В. Ю. Ульяницкий. ФГВ, 1979, 15, 6.
16. А. А. Васильев, В. В. Григорьев. ФГВ, 1980, 16, 5.
17. A. A. Vasiliev, Y. Nicolaev. Astr. Acta, 1978, 5.
18. R. A. Strehlow, R. E. Maurer. S. Rayan. AIAA J., 1969, 7, 3.
19. В. И. Манжалей, В. В. Митрофанов, В. А. Субботин. ФГВ, 1974, 10, 1.
20. D. C. Bull, J. E. Elsworth, P. J. Shuff. Comb. Flame, 1982, 45, 7.
21. R. Knystantas, C. Guirao, J. H. Lee, e. a. 9-th ICOGERS, 1983.
22. М. Ф. Иванов, В. Е. Фортов, А. А. Борисов. ФГВ, 1981, 17, 3.
23. М. Ф. Иванов, Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко. ФГВ, 1984, 19, 2.
24. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970.

Поступила в редакцию 1/XI 1985

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОПЛОТНЫХ ВВ

*В. С. Соловьев, А. В. Аттетков, М. М. Бойко, Л. Н. Власова,
В. Н. Крамаренко, А. И. Чернов*
(Москва)

Исследованию возбуждения детонации в неоднородных взрывчатых веществах (ВВ) с начальной плотностью ρ_0 , большей или равной насыпной, уделяется довольно большое внимание. Менее изучены процессы в ВВ с начальной плотностью, меньшей насыпной [1—6]. Результаты, полученные в [1—4, 6], относятся в основном к низкоплотным ВВ с $\rho_0 = (0,2 \div 0,8) \cdot 10^3$ кг/м³. Анализ механизмов распространения детонации, проведенный в [4], позволил сделать следующие выводы: возбуждение реакции в случае низкоплотных ВВ возможно как за счет соударения частиц при движении за фронтом ударной волны (УВ), так и за счет поджигания их продуктами детонации и воздухом, разогретым проходящей по нему УВ. При $\rho_0 \leq (0,6 \div 0,8) \cdot 10^3$ кг/м³ основную роль в возбуждении реакции в детонационной волне (ДВ) играют продукты детонации, реакция протекает в основном в виде горения частиц с поверхности. В силу особенности возбуждения реакции в ДВ вещество переходит из исходного в состояние, соответствующее окончанию реакции, не через скачок, а в результате постепенного нарастания параметров (связанного с последовательным выделением энергии).

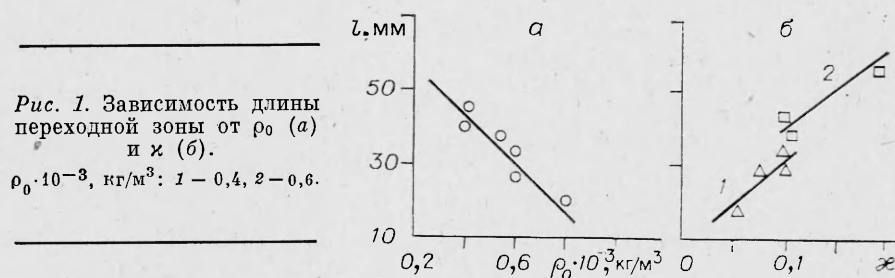
Цель данной работы — экспериментальное исследование влияния на возбуждение детонации в ВВ плотности нагружаемого ВВ и размера частиц, а также условий нагружения (схемы нагружения). В качестве исследуемого пористого ВВ использовалась механическая смесь мелкокристаллического порошка гексогена (размер частиц $\delta = 50 \div 120$ мкм) с мипорой (мочевинформальдегидная смола) [2]. Плотность ВВ зависела от доли мипоры в смеси или от подпрессовки заряда. Исследования проводились по двум схемам: 1) инициирующий заряд находился в непосредственном контакте с низкоплотным ВВ и его продукты детонации могли беспрепятственно проникать в поры низкоплотного ВВ (контактная схема); 2) между инициирующим зарядом и ВВ помещалась медная прокладка толщиной 0,1 мм, затрудняющая проникание продуктов детонации в ВВ. В качестве инициирующего заряда использовалось листовое ВВ толщиной 0,4 мм. Размеры зарядов для каждой из рассматриваемых плотностей больше предельных.

Влияние условия нагружения

Исследования проводили оптическим и электромагнитным методами. Оптическая регистрация процесса осуществлялась по боковой поверхности зарядов, помещенных в корпус из оргстекла (толщиной 5 мм) прямоугольного сечения. В исследуемом диапазоне $\rho_0 = (0,2 \div 0,8) \cdot 10^3$ кг/м³ отмечен преддетонационный участок [3, 5], величина которого зависит как от плотности нагружаемого заряда, так и от его состава. Зависимость переходной зоны l от ρ_0 ($\kappa = 0,1$) и относительной доли наполнителя κ приведена на рис. 1. С увеличением ρ_0 и снижением κ уменьшается протяженность переходной зоны и участка этой зоны до минимума скорости процесса.

Полученные результаты для ВВ с $\rho_0 = 0,4 \cdot 10^3$ кг/м³ показывают, что при нагружении по контактной схеме в непосредственной близости от листового ВВ скорость продуктов детонации больше, чем для стационарной детонации низкоплотного ВВ. Скорость распространения процесса вначале уменьшается, а затем возрастает и достигает значений, соответствующих стационарной детонации. В опытах с медной прокладкой отсутствует участок с уменьшением скорости. При этом выход на стационарный режим происходит на значительно меньших расстояниях.

С целью подтверждения результатов, полученных оптическими измерениями, исследовались закономерности процесса возбуждения детонации в ВВ с $\rho_0 = 0,4 \cdot 10^3$ кг/м³ ($\kappa = 0,1$) при помощи электромагнитной методики, возможность применения которой для определения массовой скорости u_m низкоплотных гранулированных ВВ и малоплотных неоднородных веществ обоснована в [6, 7]. Развитие процесса изучалось по данным одновременных измерений волновой D и массовой скорости. Применялись ступенчатые датчики с длиной рабочих участков 8 и 4 мм. При постановке датчиков на расстояниях $x = (2-10)$ мм от инициирующего заряда база измерения D принималась равной 4 мм, на больших расстояниях — 12 мм. Хорошее совпадение значений D , полученных обоими методами, указывает на возможность использования оптической ре-



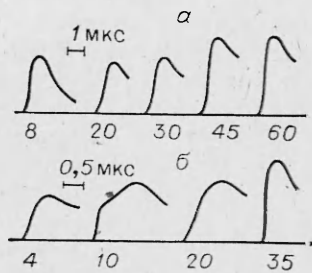


Рис. 2. Эволюция профиля массовой скорости при нагружении по контактной схеме (а) и схеме с прокладкой (б). Цифры указывают расстояние от нагружаемого заряда до датчика в миллиметрах.

гистрации для определения волновых скоростей. Это — наиболее простой метод, не вносящий искажений в исследуемый процесс.

Эволюция профиля u_m в исследуемом ВВ в зависимости от схемы нагружения представлена на рис. 2. Кривые изменения регистрируемых величин в зависимости от величины x приведены на рис. 3. Ход кривых D и u_m , а также кривой времени нарастания массовой скорости до максимальной величины (t_*) указывает на то, что в переходной зоне (зоне формирования ДВ) происходит монотонный рост параметров при нагружении по схеме с прокладкой. Для случая контактного нагружения характерно наличие минимума u_m и D с последующим ускорением до параметров стационарной детонации. Характер изменения показателя адиабаты k , рассчитанного на основе экспериментальных значений D и u_m , свидетельствует о том, что при нагружении низкоплотного ВВ по схеме с прокладкой полное сгорание частиц во фронте инициирующей УВ имеет место уже на расстояниях ~ 10 мм.

Оценочные расчеты условий нагружения показывают, что на границе раздела ВВ — прокладка $u_m \approx 400$ м/с. В случае контактной схемы нагружения скорость разлета продуктов детонации в низкоплотное ВВ близка к 2500 м/с, что соответствует давлениям нагружения ~ 4 ГПа.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы о влиянии условий нагружения на механизм возбуждения детонации в низкоплотном ВВ. При контактном нагружении (см. рис. 3) в процессе формирования детонационной волны можно выделить три характерные зоны. При малых значениях x (зона А) продукты детонации листового ВВ воспламеняют частицы ВВ, находящиеся в непосредственном контакте с ним; объем прореагировавшего вещества достаточно мал, кроме того, происходит интенсивная разгрузка как в направлении ВВ, так и в противоположную сторону, вследствие чего параметры в данной области понижаются. В зоне В реализуется задержка воспламенения низкоплотного ВВ в условиях пониженных за счет разгрузки параметров. Последу-

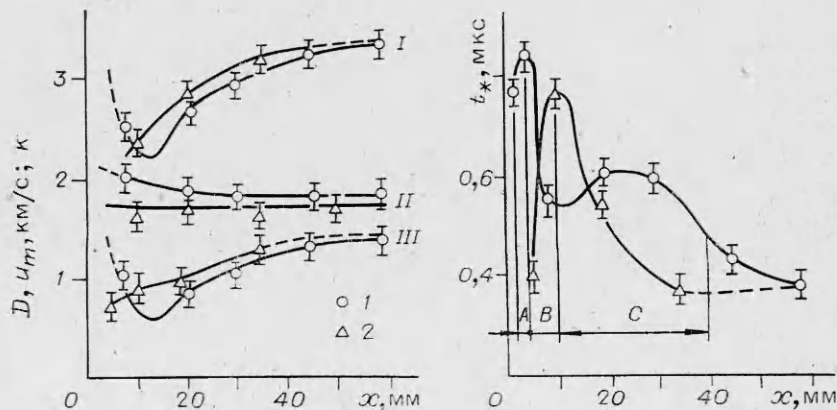


Рис. 3. Изменение волновой (I) и массовой (II) скоростей процесса, показателя адиабаты (III) и времени нарастания массовой скорости до максимума по длине переходной зоны в ВВ с $\rho_0 = 0,4 \cdot 10^3$ кг/м³ ($\chi = 0,1$; $\delta = (50-120)$ мкм) при нагружении по контактной схеме (1) и схеме с прокладкой (2).

ющая стадия (область C) — это интенсивное воспламенение ВВ за фронтом УВ и фильтрующихся продуктов реакции, что в конечном итоге приводит к росту параметров в зоне реакции и формированию детонационного комплекса. Некоторое превышение параметров над стационарными значениями можно объяснить большим объемом вещества, охваченным интенсивной химической реакцией. На стационарный режим ДВ выходит на расстояниях ~ 40 — 45 мм.

В случае нагружения по схеме с прокладкой влияния параметров детонации листового ВВ на исследуемое низкоплотное ВВ в зоне малых x не прослеживается. Поведение вещества в области B связано с задержкой воспламенения по аналогии с контактной схемой нагружения и сопровождается уплотнением вещества. К моменту возникновения интенсивной реакции (граница зон B, C) плотность ВВ увеличивается на 15%. Формирование детонационной волны начинается на тех же расстояниях, что и при контактном нагружении ($x \sim 10$ мм), но процесс на стационарный режим выходит на значительно меньшей базе (~ 35 мм).

Влияние плотности ВВ

Исследовались закономерности процесса возбуждения детонации в ВВ с $\rho_0 = (0,2 \div 0,8) \cdot 10^3$ кг/м³ при нагружении по контактной схеме. Датчики с длиной рабочего плеча 8 мм помещались на расстоянии $x = 30$ мм от инициирующего заряда.

Рост ρ_0 приводит к повышению максимального значения u_m и резко к уменьшению t_* . При $\rho_0 \leq (0,6 \div 0,8) \cdot 10^3$ кг/м³ ведущую роль в возбуждении реакции в ДВ играют продукты детонации. В зарядах низкоплотных ВВ с $\rho_0 \leq 0,4 \cdot 10^3$ кг/м³ имеет место ярко выраженный предвестник. Изменение профиля u_m в диапазоне плотностей $(0,6 \div 0,8) \times 10^3$ кг/м³, а также результаты микроструктурных исследований и оптической регистрации свидетельствуют о смене механизма, а вернее, о все возрастающей роли ударно-волновых процессов в возбуждении реакции. В диапазоне $\rho_0 = (0,8 \div 1,1) \cdot 10^3$ кг/м³ возбуждение реакции возможно как в результате ударно-волнового воздействия, так и за счет фильтрации продуктов реакции в поры. Дальнейшее увеличение плотности приводит к ухудшению условий фильтрации продуктов реакции, что и определяет ударно-волновой характер возбуждения детонации.

Влияние размера частиц гекогена

Исследования проводили при нагружении низкоплотного ВВ с $\rho_0 = 0,4 \cdot 10^3$ кг/м³ ($\kappa = 0,1$) по схеме с прокладкой. Для изготовления зарядов из частиц гекогена выделены следующие ситовые фракции δ , мкм: < 50 ; 50 — 120 ; 120 — 200 ; 300 — 400 . Датчик помещался на расстоянии 35 мм от инициирующего заряда.

Кривые изменения u_m и t_* в зависимости от δ (рис. 4) свидетельствуют о том, что процесс возбуждения детонации в низкоплотном ВВ зависит от удельной поверхности частиц ВВ. При этом для фиксированной плотности существует оптимальное соотношение между размерами частиц, а следовательно, и оптимальная удельная поверхность, приводящая к наиболее интенсивному тепловыделению и максимальной скорости нарастания параметров в зоне развития реакции.

У низкоплотных ВВ в диапазоне $\rho_0 = (0,2 \div 0,6) \cdot 10^3$ кг/м³ основным видом реакции в ДВ является горение частиц с поверхности. Для подтверждения этого факта исследовалось влияние размера частиц. К основной фракции отсеянных частиц гекогена $\delta = (120$ — $200)$ мкм добавляли 10% частиц крупных фракций. Полученные результаты (см. рис. 4) указывают на существенное влияние размера частиц крупной фракции на параметры процесса. Добавление частиц размером $\delta > 700$ мкм приводит к значительному уменьшению D и u_m . Последнее подтверждает сделан-

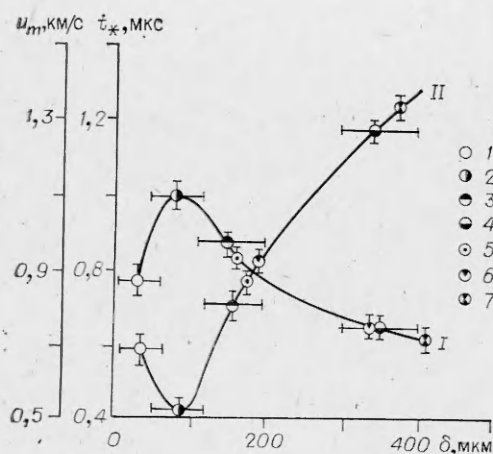


Рис. 4. Изменение массовой скорости процесса (I) и времени нарастания массовой скорости до максимума (II) в зависимости от размера частиц исследуемого низкоплотного ВВ.

Размеры фракций δ , мкм: 1 — <50, 2 — 50—120, 3 — 120—200, 4 — 300—400, 5 — 120—200 и 10% 200—300, 6 — 120—200 и 10% 400—700, 7 — 120—200 и 10% 700—1500.

ное в [4] предположение относительно механизма превращения ВВ в детонационной волне.

На основании проведенных исследований распространение детонации в низкоплотных ВВ с существенно различными размерами частиц может быть представлено следующим образом. Процесс возбуждается продуктами реакции и протекает в основном в форме горения частиц с поверхности. Вследствие того, что мелкая фракция сгорает значительно быстрее крупной, максимальное значение D и u_m определяется в большей степени ее содержанием в смеси. Параметры в волне разрежения при этом повышаются за счет догорания частиц более крупной фракции, что и определяет более пологий спад в профиле массовой скорости во многофракционных составах.

Проведенные исследования позволили получить количественные результаты, свидетельствующие о влиянии различных факторов на процесс возбуждения и развития детонации в низкоплотных ВВ, а также выявить некоторые особенности, подтверждающие разработанную модель распространения детонации в них.

Проведенные исследования позволили получить количественные результаты, свидетельствующие о влиянии различных факторов на процесс возбуждения и развития детонации в низкоплотных ВВ, а также выявить некоторые особенности, подтверждающие разработанную модель распространения детонации в них.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Savitt, N. Leone, C. Kyselka. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965.
2. В. С. Соловьев, С. Г. Андреев, А. В. Левантовский и др.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
3. С. Г. Андреев, О. А. Кузнецов, А. В. Левантовский и др. Там же.
4. М. М. Бойко, В. Н. Крамаренко, В. С. Соловьев.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
5. В. С. Соловьев, Л. Н. Власова, С. Г. Андреев и др. ФГВ, 1981, 17, 5.
6. К. К. Шведов, С. А. Колдунов, Т. П. Груздева.— В кн.: Детонация. Черноголовка, 1981.
7. Ю. Б. Хвостов. Взрывное дело, № 83/40. М.: Недра, 1982.

Поступила в редакцию 18/III 1983,
после доработки — 22/V 1984

ОБ ОДНОМЕРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В РАСПЫЛАХ

Д. В. Воронин, С. А. Ждан
(Новосибирск)

Теоретическому исследованию устойчивости детонационных волн (ДВ) в гомогенных и гетерогенных взрывчатых веществах, описание которых возможно по модели механики односкоростной сплошной среды, посвящено значительное число работ [1—8]. Для многоскоростных гетерогенных реагирующих сред, например газозвеси, строгое математическое изучение устойчивости ДВ до настоящего времени не проведено. Это прежде всего связано с существенными математическими труд-