

УДК 662.215.1

ДЕТОНАЦИЯ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ В ПОРОШКООБРАЗНЫХ СРЕДАХ

Е. В. Зотов, В. И. Дудин, Г. Б. Красовский

*Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
607200 Арзамас-16*

Экспериментально исследовано распространение детонации по жидким взрывчатым составам (растворы нитробензола в тетранитрометане) в инертных и активных порошкообразных средах насыпной плотности. Показано, что на малых расстояниях общий волновой процесс связан только с распространением детонации в ЖВС по каналам малого сечения, образованным отдельными частицами порошкообразного материала независимо от его акустической жесткости. С увеличением расстояния в гетерогенных составах с октогеном сравнительно низкоскоростной волновой процесс плавно сменяется стационарной детонацией всего состава в целом.

Некоторые жидкие взрывчатые смеси (ЖВС или ЖВВ) типа окислитель + горючее имеют очень малый критический диаметр. Например, в экспериментах с клиновидными слоями ЖВС, размещенными между стеклянными пластинами, получено, что детонация с нормальной скоростью для состава тетранитрометан/нитробензол 74/26 может распространяться в слоях толщиной до $\sim 0,015$ мм [1].

При дальнейшем уменьшении толщины слоя детонация переходит в низкоскоростной режим. Условия экспериментов в [1] соответствуют регулярному взаимодействию волн разгрузки от внешних поверхностей пластинок и ударных волн (УВ) в результате химических реакций в слое ВВ. По этой причине определение критической толщины ЖВС — надежный самостоятельный и сравнительный метод оценки одной из важнейших характеристик ЖВВ, особенно для случаев, когда истинный критический диаметр заряда (без жесткой оболочки) определить не удается из-за его малости.

Однако на основании только таких экспериментов поведение ЖВС в некоторых случаях предсказать иногда не удается. К таким ситуациям относится, например, детонационный процесс в ЖВС в порошкообразных средах (как инертных, так и активных). Порошок создает жесткую или слабоподвижную скелетную структуру, все свободное пространство которой заполнено жидким ВВ. Ниже такие системы будем называть гетерогенными средами или составами (ГС). Настоящая экспериментальная работа направлена на изучение особенностей взрывного процесса в ГС.

Постановка эксперимента. Исследовались растворы нитробензола (НБ) в тетранитрометане (ТНМ) стехиометрического состава ТНМ/НБ $\approx 76/24$, а также с отклонением кислородного баланса от нуля (74/26 и 82/18). Все перечисленные растворы (гомогенные ЖВВ) могут надежно инициироваться искровым электрическим разрядом [2]. В качестве порошков применялись кварцевый песок с размерами частиц 0,1–0,2 мм, октоген с размером зерен 0,05–0,40 мм и алмазный порошок марок АСО 100/80 и АСМ 40/28 (пределы изменений размеров частиц алмаза в микрометрах указаны в наименованиях порошков). Микрофотографии порошков в проходящем свете приведены на рис. 1.

Прямые измерения показали, что коэффициент объемного заполнения порошка октогена насыпной плотности в ЖВВ $\beta = 0,68$, для кварцевого

песка в ЖВС $\beta = 0,625$, для сухого кварцевого песка $\beta = 0,58$. Лучшая упаковка октогена объясняется более широким спектром размеров частиц по отношению к кварцу.

В основной серии экспериментов применялись разрядники с размерами камеры 6×9 мм, в ряде экспериментов длина камеры была увеличена до 20 мм. По принятой технологии камера сначала заполнялась жидким ВВ, а затем в нее при легком постукивании засыпался порошок. Такая технология исключала образование крупных воздушных пузырьков в ГС. В основной серии опытов измерялось время t от момента пробоя разрядника до момента замыкания открытого коаксиального контактного датчика торцевого типа непосредственно фронтом детонационной волны [2]. Торце датчика устанавливался на контролируемом расстоянии B от центра межэлектродного промежутка разрядника ($B = 1 \div 5$ мм). В опытах с удлиненной камерой на ее торец наклеивалась двухслойная прозрачная «отсечка» из лавсана толщиной 70 мкм с воздушным зазором между слоями ~ 100 мкм. Выход детонации на «отсечку» и свечение воздушного зазора регистрировались фотохронографом ФЭР-1 с электронно-оптическим преобразователем в режиме щелевой развертки [3]. Все эксперименты проводены при температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

Результаты и их обсуждение.

В экспериментах выявился различный характер замыкания датчиков для различных ГС. Наименее ярко выражено замыкание датчика, расположенного в ГС с кварцевым песком (затянутый фронт и меньшая амплитуда). В ряде случаев замыкание датчиков не фиксировалось, что свидетельствовало о затухании начавшегося детонационного процесса (о его начале можно было судить по разрушению экспериментальной сборки на слух). Это произошло, например, в шести (из 12) опытах с составами ТНМ/НБ 82/18 с кварцевым песком и во всех трех опытах с ТНМ/НБ 74/26 с АСМ 40/28.

Результаты измерения времени от пробоя разрядника до замыкания датчика в зависимости от расстояния B приведены на рис. 2. Экспериментальные точки для всех исследованных составов лежат на линейных зависимостях $t(B)$ с коэффициентом линейной корреляции не ниже 0,99. Дисперсия отклонения точек от прямых минимальна для однородной ЖВС и максимальна для ЖВС с кварцевым песком.

Увеличение задержки инициирования жидких ВВ в ГС в результате пробоя обусловлено внедрением частиц порошка в межэлектродный промежуток, в результате чего пробой осуществляется по более протяженной траектории и, следовательно, с меньшей надежностью инициирования [4].

Для установления основных факторов, влияющих на процесс распро-

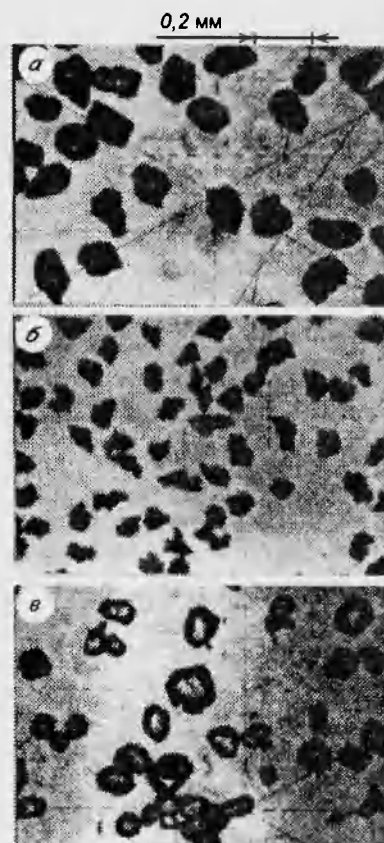


Рис. 1. Микрофотографии порошков в проходящем свете:

a — кварцевый песок; *b* — алмазный порошок АСО 100/80; *v* — октоген.

странения детонационной волны по ГС, выбраны порошки с широким диапазоном акустической жесткости ρc (табличные значения плотности ρ и скорости звука c [5, 6]: для кварца $\rho = 2,62 \text{ г/см}^3$, $c = 5490 \text{ м/с}$, для октогена $\rho = 1,96 \text{ г/см}^3$, $c \approx 3000 \text{ м/с}$, для алмаза $\rho = 3,51 \text{ г/см}^3$, $c = 12160 \text{ м/с}$). Относительные значения волновых скоростей детонации в исследованных ГС при $B = 1 \div 5 \text{ мм}$ приведены в таблице.

ЖВС	Наполнитель	Относительная скорость, %
ТНМ/НБ 74/26	—	100
	Кварцевый песок	95,3
	АСО 100/80	97
ТНМ/НБ 76/24	Октоген	95,2
	—	100
ТНМ/НБ 82/18	Октоген	90
	—	100
ТНМ/НБ 82/18	Кварцевый песок	80
	Октоген	84
	—	100

Из полученных результатов следует, что максимальная относительная скорость получена для ЖВВ, имеющего максимальную скорость детонации (ТНМ/НБ 74/26); с изменением соотношений компонентов ЖВС, приводящим к уменьшению абсолютной скорости детонации [2], уменьшаются

и относительные волновые скорости; при пропитке различных порошков ЖВС с максимальной скоростью детонации относительные волновые скорости (с точностью до экспериментального разброса) практически совпадают; волновая скорость не зависит ни от скорости звука порошков, ни от их акустической жесткости; на малых расстояниях детонационно-способный октоген ведет себя как инертный порошок.

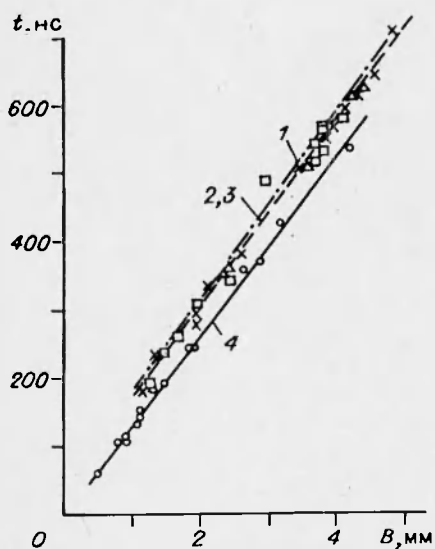


Рис. 2. Результаты измерения времени от пробоя разрядника до замыкания датчика в зависимости от расстояния B для ЖВС ТНМ/НБ 74/26:

1 — ЖВС с кварцевым песком; 2 — ЖВС с алмазным порошком АСО 100/80; 3 — ЖВС с октогеном; 4 — гомогенная ЖВС.

Таким образом, результаты опытов показывают, что при малых значениях B общий волновой процесс связан только с распространением детонации в ЖВВ по каналам малого сечения, образованным отдельными частицами порошкообразного материала. Пока сечения каналов сопоставимы с критическим диаметром ЖВС, детонационный процесс устойчив. Когда относительное сечение канала уменьшается (при изменении соотношения окислителя и горючего в ЖВС, приводящем к увеличению критического диаметра, при использовании более мелкого порошка или при его уплотнении), скорость процесса будет уменьшаться вплоть до затухания.

Нетрудно видеть, что зависимость $t(B)$ дает только некоторое интегральное представление о распространении детонации в ЖВС в порошкообразной среде из-за отсутствия идеальной структуры порошка (например, в виде плотной упаковки

шарами). Попытка выделить капилляр больше критического диаметра, определяющий преимущественность движения фронта по нему, себя не оправдывает, так как кратчайший путь движения детонационного фронта не соответствует осевой линии капилляра. Это подтверждается простыми экспериментами при сравнении времени прохождения детонации

по ЖВС в прямом и изогнутом капилляре при их одинаковой первоначальной длине.

Дополнительную качественную картину ударно-детонационного фронта в ГС (и в гомогенном ЖВВ ТНМ/НБ 74/26) на расстоянии 8 мм дают фотохронограммы на рис. 3. Свечение воздушного слоя слоистой отсечки в опытах с ГС имеет прерывистый характер. Шаг (масштаб) неоднородностей свечения сопоставим с размерами зерен порошкообразного наполнителя. При этом гетерогенный состав с октогеном не отличается от смеси с кварцевым песком. В гомогенной смеси ТНМ/НБ 74/26 поверхность детонационного фронта «идеальна» (неоднородности существенно меньше предела погрешности измерений [7]).

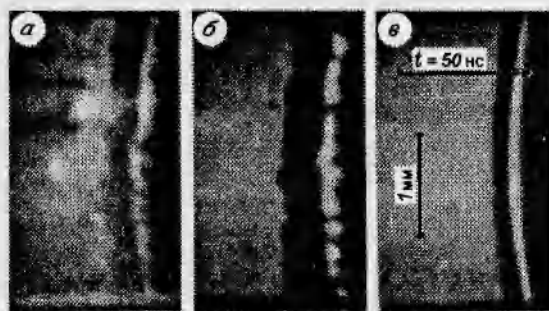


Рис. 3. Фотохронограммы ударно-детонационного фронта в гетерогенной среде и ЖВС на расстоянии 8 мм:

а — ЖВС с кварцевым песком; б — ЖВС с октогеном; в — гомогенная ЖВС.

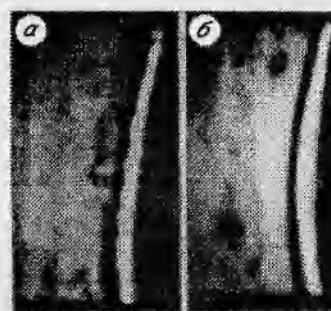


Рис. 4. Фотохронограммы ударно-детонационного фронта в гетерогенной среде ЖВВ + октоген на увеличенных расстояниях при $B = 14$ (а) и 20 мм (б).

При увеличении расстояний до 14–20 мм в ГС с октогеном детонационный фронт постепенно сглаживается (рис. 4) и увеличивается давление на фронте, т. е. сравнительно низкоскоростной волновой процесс, определяемый распространением детонации только по каналам ЖВС, плавно сменяется стационарной детонацией всего гетерогенного состава в целом. В результате ударного сжатия зерен октогена и взаимодействия вначале поверхностных слоев зерен с продуктами взрыва ЖВВ октоген разлагается с дополнительным энерговыделением. Благодаря дополнительному энерговыделению давление на ударно-детонационном фронте растет, ускоряя процесс в гетерогенном составе. Такое рассмотрение позволяет провести аналогию с ударным инициированием твердых ВВ, при этом функции горячих точек выполняют продукты взрыва ЖВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зотов Е. В., Красовский Г. Б., Рыжова В. Н. Предельные условия распространения детонации в жидких растворах нитробензола в тетранитрометане и фторнитроформе // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 1. С. 111–115.
2. Зотов Е. В., Красовский Г. Б., Кручинин В. А., Рыжова В. Н. Скорость детонации некоторых жидких взрывчатых растворов на основе тетранитрометана и фторнитроформа // Там же. С. 148–151.
3. Горбенко Б. З., Гранигг А. Б., Дрожбин Ю. А. и др. Фотохронограф с электронно-оптическим преобразователем // Приборы и техника эксперимента. 1966. № 4. С. 154–156.
4. Зотов Е. В., Козырев А. С., Бабадей С. М. и др. Иницирование детонации растворов нитробензола в тетранитрометане в канале электрического искрового разряда // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 4. С. 110–114.
5. Орлова Г. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л. Химия, 1973.

6. **Таблицы физических величин / Справочник под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.**
7. **Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Кришкевич Г. В., Юшко К. Б. Гладкость детонационного фронта в жидком взрывчатом веществе // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 3. С. 312-315.**

*Поступила в редакцию 5/V 1994 г.,
в окончательном варианте — 5/VII 1994 г.*
