

УДК 534.222.2

## ПЕРЕДАЧА ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫЕ ДИСПЕРСНЫЕ СРЕДЫ

Л. А. Мержиевский<sup>1,2</sup>, И. А. Балаганский<sup>1</sup>, А. Д. Матросов<sup>2</sup>,  
И. А. Стадниченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630092 Новосибирск

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, merzh@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментального исследования передачи детонации через порошки высококомодульных материалов. Обсуждаются особенности процесса, связанные со свойствами таких дисперсных сред, и перспективы их применения в защитных устройствах.

Ключевые слова: детонация, инициирование, пористая преграда.

### ВВЕДЕНИЕ

Явление возбуждения детонации в заряде взрывчатого вещества (ВВ), расположенном на некотором расстоянии от детонирующего, было открыто в середине позапрошлого столетия и получило название передачи детонации через влияние [1]. При этом активный (возбуждающий детонацию) заряд может быть отделен от пассивного (в котором возбуждается детонация) как воздушным промежутком, так и преградой из более плотного инертного материала. Механизм возбуждения детонации качественно подобен для различных передающих сред и типов ВВ пассивных зарядов. Детонация инициируется распространяющимися по преграде ударными волнами.

Исследование передачи детонации через воздушные промежутки или плотные среды имеет научные и практические аспекты [2]. В научном плане это явление используется для изучения инициирования взрывчатых веществ ударными волнами. При этом основной целью является получение характеристик чувствительности ВВ к ударно-волновому воздействию (критериев инициирования), применяемых в дальнейшем для проведения оценок и включаемых в модели детонации. Получаемые результаты дают также возможность судить о кинетике детонационного превращения. Для практических целей важную роль играет определение расстояний, безопасных относительно передачи детонации, а также оценка параметров преград, защищающих ВВ от несанкционированных взрывов при хранении и перевозке, в

частности создание взрывобезопасных контейнеров [3–6].

Существует большое количество методов исследования процесса инициирования детонации [2, 7]. Например, с помощью фоторегистрации свечения определяется расстояние, которое проходит ударная волна в пассивном заряде до момента возникновения детонации [2]. В других случаях с помощью датчиков регистрируются профили давления или массовой скорости. Применяются также методы импульсной рентгенографии. В наиболее простых, но наименее информативных методах параметры входящей в ВВ волны не измеряются, а чувствительность характеризуется толщиной ослабляющего воздействие экрана, через который еще способна возбуждаться стационарная детонация. Целью таких экспериментов является определение критического давления ударно-волнового инициирования, а возбуждение детонации фиксируется по отпечатку на пластине-свидетеле. В таких опытах определяется наименьшая толщина преграды, при которой не происходит передачи детонации от активного заряда к пассивному. Получаемая при этом информация в значительной степени соответствует практическим запросам, хотя полезна и при тестировании моделей детонации. В данной работе изучается передача детонации через порошки высококомодульных материалов.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Постановка экспериментов соответствует наиболее простому, но достаточно распространенному методу исследования критических условий инициирования детонации, за-

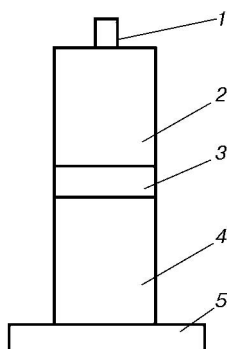


Рис. 1. Схема постановки экспериментов:

1 — инициатор, 2 — заряд активного ВВ, 3 — преграда из инертного материала, 4 — заряд исследуемого ВВ, 5 — пластина-свидетель

ключающемуся в нагружении исследуемого пассивного заряда ВВ контактным взрывом активного заряда, отделяемого от пассивного инертной преградой или воздушным промежуток. В зарубежной литературе метод получил название *gap test*, в отечественной его часто называют методом преград. Схема экспериментальной сборки показана на рис. 1.

В первой серии опытов исследовалась передача детонации через гетерогенные дисперсные среды на основе порошка карбида кремния (SiC) и речного песка (кремнезем, SiO<sub>2</sub>) в сухом и водонаполненном состоянии. Фотография порошков, показывающая различие их фракционного состава, приведена на рис. 2 (песок в верхней части). На фотографии ясно видно, что частицы кремнезема значительно крупнее. Размеры частиц песка лежат в диапазоне 0.1 ÷ 1.0 мм. Гранулометрический состав частиц карбида кремния более однородный. Средний размер частиц находится в диапазоне 0.05 ÷ 0.1 мм. Экспериментальная сборка состояла из двух картонных стаканов цилиндрической формы, плотно вставленных один в другой. Между доньями стаканов размещались исследуемые порошки. Внешний диаметр сборки

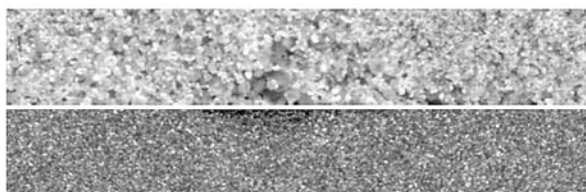


Рис. 2. Гранулометрический состав порошков

80 мм, толщина доньев 0.75 мм. После засыпки порошка его уплотняли с помощью гири массой 2 кг. Установлено, что полное уплотнение в таких условиях происходит примерно за 0.5 ч, при увеличении времени сдавливания до суток толщина слоя не изменялась. Плотности засыпки сухого песка и порошка карбида кремния после подпрессовки составляли 1.85 и 1.87 г/см<sup>3</sup> соответственно. Для получения водонаполненных буферов после уплотнения в сборки заливалась вода до полного насыщения. Плотность влажного порошка не определялась. Данные [8] показывают, что водонасыщенный песок содержит ≈20 ÷ 30 % воды. Был также выполнен один эксперимент по передаче детонации через пластину из карбида кремния толщиной 12 мм, помещенную, как и порошки, между двумя картонными прокладками.

Исследовалась передача детонации через описанные среды для пар (активный/пассивный) литых зарядов ТНТ/ТНТ и ТГ-40/ТГ-40. Высота и диаметр зарядов 40 мм, масса шашки ТГ-40 83 г, плотность 1.65 г/см<sup>3</sup>; масса шашки ТНТ 79 г, плотность 1.57 г/см<sup>3</sup>.

Во второй серии экспериментов использовались порошки SiC разного фракционного состава. Фракция 1 — шлифовальное зерно из карбида кремния черного марки 53с № 100 F20, размеры зерен 1000 ÷ 1250 мкм; фракция 2 — шлифовальный порошок из карбида кремния зеленого марки 63с № 16(М), 160 ÷ 200 мкм; фракция 3 — шлифовальный порошок из карбида кремния черного марки 54с № F1200 (М5), 3 ÷ 5 мкм; фракция 4 — смесь этих порошков в равных объемных долях, 3 ÷ 1250 мкм. Постановка полностью повторяла эксперименты первой серии. Исследовалась передача детонации для пар зарядов ТГ-40/ТГ-40. О возбуждении или отсутствии детонации в пассивном заряде судили по наличию отпечатка от воздействия продуктов детонации на пластине-свидетеле.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов первой серии представлены в табл. 1. Здесь и далее  $h_1$  — толщина инертного слоя, при которой устойчиво возбуждается детонация в пассивном заряде,  $h_2$  — толщина, при которой еще может возникнуть детонация,  $h_3$  — толщина, при которой детонация отсутствует,  $p_k$  — рассчитанное значение давления в демпфирующем слое

Таблица 1

Дистанции передачи и срыва детонации в экспериментах первой серии

ВВ	Материал преграды	Состояние преграды	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм	$p_k$ , ГПа
ТНТ	SiC	Сухой	10	—	12.5	15.3
		Влажный	11	—	16	19.2
		Монолит	—	—	12	25.7
	SiO <sub>2</sub>	Сухой	10	11	12.5	16.3
		Влажный	16	18	21	20.4
ТГ-40	SiC	Сухой	25	—	30	21.5
	SiO <sub>2</sub>	Сухой	22.5	—	23.7	22
		Влажный	35.7	—	36.1	28.2

Таблица 2

Дистанции передачи и срыва детонации в экспериментах второй серии

Номер фракции	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм	$p_k$ , ГПа
1	1.24	27	—	28	16.1
2	1.52	23.7	—	25	17.7
3	0.97	25	27	28	13.86
4	1.92	22	—	22.5	22

на границе с активным зарядом ВВ. Вычисление проводилось по классической схеме распада разрыва между продуктами детонации и инертной преградой, и затруднений оно не вызывает при известных уравнениях состояния продуктов и ударной адиабате инертной среды. Для продуктов детонации использовалось политропическое приближение. Ударные адиабаты сухого и водонасыщенного песка приведены в [8, 9]. Достаточно сложным оказалось оценить  $p_k$  для преград из порошка карбида кремния. Даже в наиболее полных собраниях экспериментальных данных по ударно-волновым характеристикам конденсированных сред [10, 11] практически отсутствуют ударные адиабаты пористого SiC. С использованием методов [12, 13] были построены приближенные ударные адиабаты порошков SiC использованной в экспериментах пористости. Для контроля корректности проведенного расчета этим же методом были построены ударные адиабаты SiO<sub>2</sub> для нескольких значений пористости и SiC плотностью 2.3 г/см<sup>3</sup>. Сравнение их с экспериментальными ударными адиабатами из работ [10, 11, 14] показало приемлемый уровень согласия.

Результаты экспериментов второй серии приведены в табл. 2. Оказалось, что наибольшей плотностью обладает смесь порошков всех фракций, а наименьшей — порошок с самым малым размером частиц. Качественное объяснение этого, по-видимому, связано с известными особенностями поведения порошков разного размера при компактировании. Достаточно затруднительно сравнивать полученные результаты с данными других авторов. Корректное сравнение требует неизменности массы, размеров и типа ВВ активного и пассивного зарядов, в то время как не только в разных странах, но и в разных лабораториях для тестов выбираются свои значения этих параметров. Поэтому возможно только качественное сравнение основных определяемых в опытах характеристик. Для практических целей полезно сравнение массовых показателей преград, толщина которых имеет критическое для передачи детонации значение. Соответствующие результаты наших экспериментов, а также данные, приведенные в монографии [2], представлены в табл. 3.

Если говорить об оценке демпфирующих свойств изученных сред, следует указать, что

Таблица 3

Критические дистанции передачи детонации при различных условиях экспериментов (ТГ-40)

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Фракционный состав, мкм	Критическая толщина, мм	Массовый показатель, г/(см <sup>3</sup> · мм)
SiO <sub>2</sub>	1.85	1 000 ÷ 100	23.1±0.6	42.7
SiC	1.87	100 ÷ 50	27.5±2.5	51.4
	1.24	1 250 ÷ 1 000	27.5±0.5	34.1
	1.52	200 ÷ 160	24.0±0.5	36.5
	0.94 ÷ 0.99	5 ÷ 3	26.7±1.0	26.4
	1.92	1 250 ÷ 3	22.3±0.5	42.8
Сталь*	7.84	—	≈26.8	≈210.1
Алюминий*	2.7	—	≈40	≈108
ПММА*	1.2	—	≈40	≈48
Вода*	1	—	≈40	≈40

\* Данные [2].

пористые среды являются эффективными поглотителями энергии при воздействии динамических нагрузок. При этом, как было показано ранее [4], высокомодульные дисперсные среды способны трансформировать ударную волну в изоэнтропическую волну сжатия и десенсебилизировать ВВ [15–17].

Несмотря на сложный характер процесса инициирования и соответствующих критериев, можно утверждать, что существует минимальное значение давления, ниже которого ВВ не инициируется. В проведенных экспериментах начальное давление на фронте входящей в инертную преграду детонационной волны в дальнейшем убывает в первом приближении по экспоненциальному закону [18]. К сожалению, имеющихся данных недостаточно для определения показателя экспоненты, который существенно зависит как от пористости среды, так и от размеров частиц порошка.

Отметим, что исследование демпфирующих свойств при ударно-волновых нагрузках керамических порошков на основе диоксида циркония, оксидов алюминия и магния проводилось в [4].

Таким образом, как следует из табл. 3, высокомодульные дисперсные среды имеют преимущество по массе защитной стенки по сравнению с металлическими (сталь, алюминий). При одинаковых фракционных составах обычный песок обеспечивает одинаковую с карби-

дом кремния защиту. Порошки карбида кремния с частицами мелкого размера обладают худшими по сравнению с песком защитными свойствами. Наилучшим по массовому показателю является мелкодисперсный карбид кремния, но ввиду значительной стоимости и сложности в обращении он не может считаться перспективным для практического использования в конструкциях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бюрло Е.** Детонация через влияние. — Изд-во Арт. академии им. Ф. Э. Дзержинского, 1934.
2. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — В 2 т. — М.: Физматлит, 2002.
3. **Пат.** № 2094751 РФ. Контейнер для перевозки и хранения взрывчатых материалов / И. А. Балаганский, С. В. Зорин, В. М. Каплухов (РФ). — № 95100394; Заявл. 11.01.95. Оpubл. 27.10.97, Бюл. № 30.
4. **Огородников В. А., Хохлов Н. П., Ерунов С. В., Михайлов А. Л., Минеев В. Н. и др.** Квазистатическое и ударно-волновое поведение перспективных демпферов механических и тепловых нагрузок // Тр. междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения». — Саров, 2003. — С. 50–54.
5. **Мешков Е. Е.** О механизмах снижения взрывной нагрузки в замкнутом объеме при помощи слоев сыпучей среды // Тр. междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения». — Саров, 2005. — С. 793–796.
6. **Дреннов А. О., Бурцева О. А., Герасименко В. Ф.** Усовершенствованный контейнер

- для предотвращения аварийных ситуаций // Тр. междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». — Саров, 2007. — С. 757–763.
7. **Методы** исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М. В. Жерноклетова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
  8. **Дианов М. Д., Златин Н. А., Мочалов С. М., Пугачев Г. С., Росомахо Л. Х.** Ударная сжимаемость сухого и водонасыщенного песка // Письма в ЖТФ. — 1976. — Т. 2, вып. 12. — С. 529–532.
  9. **Лагунов В. А., Степанов В. А.** Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях // ПМТФ. — 1963. — № 1. — С. 88–96.
  10. **Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
  11. **LASL Shock Hugoniot Data** / S. P. Marsh (Ed.). — 1980.
  12. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Обобщенная ударная адиабата конденсированных веществ // ПМТФ. — 1969. — № 4. — С. 137–141.
  13. **Алексеев Ю. Л., Ратников В. П., Рыбаков А. П.** Ударные адиабаты пористых металлов // ПМТФ. — 1971. — № 2. — С. 101–105.
  14. **Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др.** Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // Высокоскоростные ударные явления. — М.: Мир, 1973. — С. 299–427.
  15. **Balagansky I. A., Gryaznov E. F.** Desensitization of RDX-charges after preshocking by compression wave in SiC-ceramic rod // Proc. Intern. Conf. on Combustion, Moscow, 1994. — V. 2. — P. 476–478.
  16. **Балаганский И. А., Балаганский А. И., Разоренов С. В., Уткин А. В.** Эволюция ударных волн в стержнях из карбида кремния // Тр. междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения». — Саров, 2006. — С. 361–366.
  17. **Balagansky I. A., Balagansky A. I., Razorenov S. V., Utkin A. V.** Evolution of shock waves in silicon carbide rods // Proc. 14th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, Baltimore, USA, 2006. — P. 835–838.
  18. **Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю.** Затухание ударных волн в гетерогенных средах // Детонация и ударные волны: материалы VIII Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву, Ташкент, 13–17 октября 1986 г. — Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1986. — С. 9–13.

*Поступила в редакцию 30/XII 2011 г.*