

О МЕХАНИЗМЕ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ СМЕСЕЙ ТЭНА С ГИДРОКАРБОНАТОМ НАТРИЯ

И. А. Спирин, Д. А. Пронин, Е. С. Митин, В. Г. Симаков, В. А. Брагунец, А. В. Цветков, Е. Е. Шестаков, Ю. М. Сустаева, О. В. Шевлягин, С. А. Вахмистров

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

К настоящему времени в ИФВ «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработано смесевое взрывчатое вещество (ВВ), в котором используются высокодисперсный тэн (ВДТ), и гидрокарбонат натрия (NaHCO_3) в массовом соотношении 35 %/ 65 % соответственно [1, 2]. Это ВВ обладает уникальным свойством: при наличии большого количества инертной добавки, оно способно детонировать с малой скоростью $D \approx 2$ км/с ($\rho \approx 0,7$ г/см³) в слое толщиной ≈ 2 мм, что может не укладываться в рамки классической модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга, согласно которой передача детонации от слоя к слою ВВ обусловлена распространением ударной волны.

Для малоплотных ВВ широкое распространение получили представления о том, что разложение ВВ инициируется на поверхности частиц горячими продуктами реакции и нагретым при сжатии воздухом, заполняющими поры. Такой механизм был качественно описан и назван А. Я. Апиным «взрывным горением» или «струйно-пробойным» [3].

Выяснение механизма детонации малоплотных смесевых ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , представляет актуальную научную и научно-практическую задачу, поскольку назначения их в настоящее время – использование для прецизионной сварки взрывом тонких (≤ 2 мм) слоев металлов.

В литературе известно существование квазистационарных низкоскоростных режимов детонации (НСД) в индивидуальных бризантных ВВ насыпной плотности [4]. В таких системах на поддержку НСД тратится малая часть химической энергии ВВ (до 20 %), – остальное ВВ «инертно», и в зависимости от физико-химических свойств может существовать два механизма передачи детонации от слоя к слою: газовой фазой (концепция взрывного горения), твердой фазой (ударно-волновое сжатие).

По сути, исследуемые нами смеси ВДТ/ NaHCO_3 , являются низкоскоростными. С тем отличием, что окружение ВВ является действительно инертным, что делает возникающие режимы детонации более устойчивыми, чем в индивидуальных ВВ.

В работах [5], [6], посвященных исследованию детонации сильноразбавленных ВВ, обнаружены режимы детонации, распространяющиеся посредством ударно-волнового сжатия, в профилях которых,

в большинстве случаев авторы регистрировали химпик.

Отметим, что в работе [7] при исследовании взрывчатого состава тэн/ SiC , получены данные, указывающие на возможность существования различных режимов детонации смеси в зависимости от содержания добавки. При малом содержании ВВ (до 15 %), частицы добавки контактируют между собой и защищают ВВ от воздействия ударной волны (УВ); детонация передается конвективно, струями продуктов взрыва (ПВ). При большем содержании ВВ процесс ведется ударной волной.

В данной работе с помощью радиоинтерферометрического [8–10], электронно-оптического (NANOGATE-22) [11] методов и метода ПВДФ-датчика давления [12, 13] исследована детонация взрывчатых смесей тэна с гидрокарбонатом натрия (пищевой содой) с массовой долей последнего от 0 до 90 %.

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» В. М. Бельскому за обсуждение результатов работы и ценные указания.

Объект исследований

Объектом исследований являлись малоплотные взрывчатые смеси высокодисперсного тэна с гидрокарбонатом натрия (NaHCO_3) с различными массовыми долями (α , %) последнего.

Основные характеристики исследуемых ВВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых ВВ

α , %	Удельная поверхность ($S_{уд}$, см ² /г)		ρ , г/см ³	D , м/с
	тэн	NaHCO_3		
0	≈ 4500	–	0,37	3300
65		≈ 660	0,7	2060
75			0,82	1720
85			0,92	1410
90			0,99	1130

Распространение детонации в смесях ВДТ/NaHCO₃

Постановка опытов

Исследования проводились с использованием электронно-оптического комплекса NANOGATE 2000, основой которого является высокоскоростная восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22 с частотой съемки до 10^9 кадр/с [9], позволяющая получать фотоснимки с временем экспозиции от 5 нс и с пространственным разрешением 30 пар лин/мм.

Исследовали:

– смеси ВДТ/NaHCO₃, α , равная 0, 65, 85, 90 % насыпной плотности;

– прессованные ВВ ВДТ/NaHCO₃, $\alpha = 65$ %, $\rho \approx 1,82$ г/см³ и ВДТ $\rho \approx 1,7$ г/см³.

С помощью ЭОК NANOGATE 2000 осуществлялось фотографирование процесса распространения детонации по схеме, представленной на рис. 1.

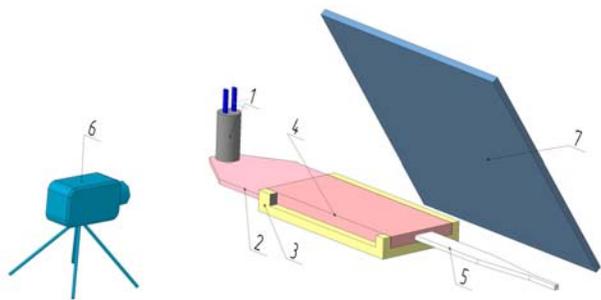


Рис. 1. Схема постановки опытов: 1 – ЭД; 2 – ПВВ; 3 – планка из пенопласта; 4 – исследуемое ВВ; 5 – плоский облучатель радиоинтерферометра; 6 – НАНОГЕЙТ-22; 7 – зеркало

Фотографирование осуществлялось либо верхней поверхности заряда с помощью зеркала, либо боковой поверхности (напрямую). В одном из опытов, вместе с фоторегистрацией применялся радиоинтерферометрический метод, с помощью которого велась регистрация движения детонационной волны по заряду из ВВ. Для этого использовали радиоинтерферометр ПРИ-03 с длиной волны 3,2 мм производства филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» г. Нижний Новгород.

ВВ насыпной плотности размещали в планки из пенопласта ($\rho = 0,4$ г/см³) с полостью шириной 30 мм, высотой L мм, длиной 110 мм, толщина стенок планки – 4 мм. Иницирование исследуемых ВВ осуществляли путем подвода детонации пластическим ВВ на основе тэна (ПВВ).

Результаты

Первые результаты были получены при регистрации детонации на верхней поверхности заряда. Некоторые из полученных фотоснимков представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2 на снимке, полученном для индивидуального ВВ (2в, $\alpha=0\%$), зафиксировано опережение продуктами взрыва детонационного фронта. По всей видимости, из-за подобного опережения не удалось идентифицировать фронт детонационной волны (ДВ) в опытах с $\alpha = 85$ и 65 %.

Опережение ПВ может осуществляться двумя способами:

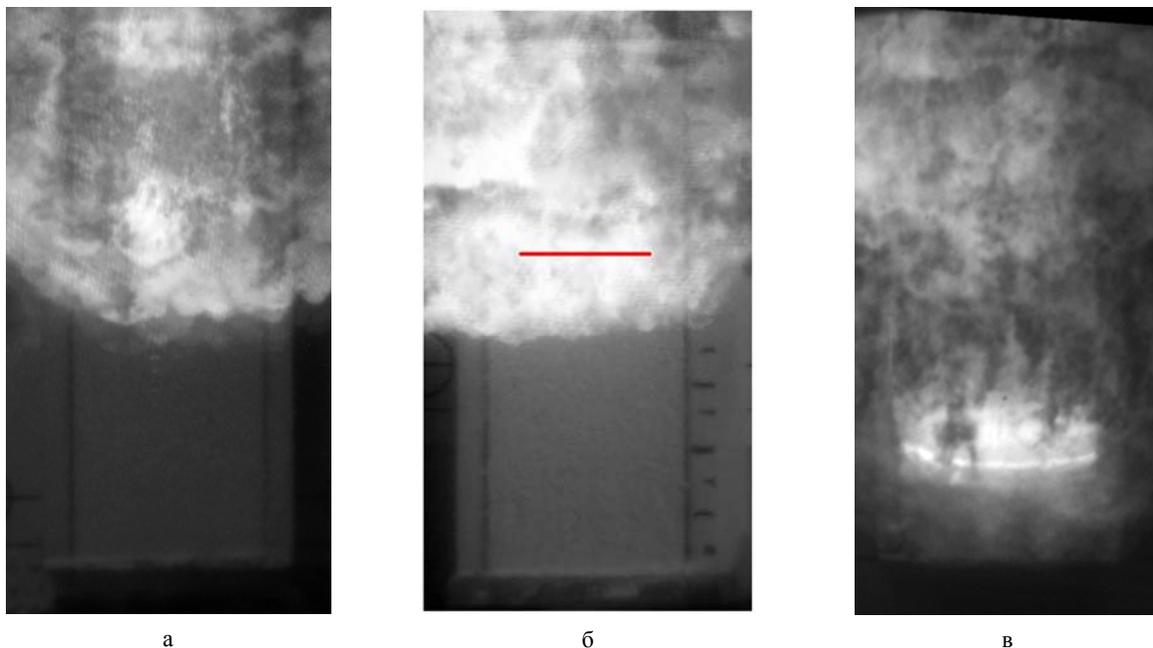


Рис. 2. Фотоснимки области детонационного фронта в экспериментальных сборках (горизонтальной линией указано положение детонационного фронта, согласно записи РИФ методом): а – $\alpha = 85$ %, $L = 12$ мм; б – $\alpha = 65$ %, $L = 15$ мм; в – $\alpha = 0$ %, $L = 10$ мм

- путем конвекции ПВ из зоны повышенных давлений в поры впереди лежащего вещества;
- путем истекания ПВ в окружающую атмосферу под углом к поверхности ВВ.

Второй способ схематично изображен на рис. 3.

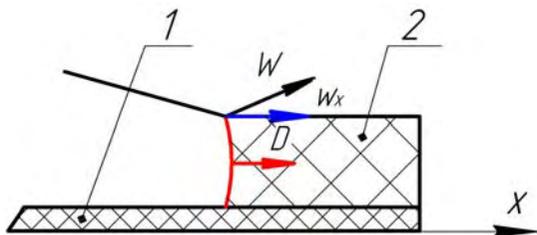


Рис. 3. Возможный путь опережения ПВ детонационного фронта: 1 – планка; 2 – ВВ; D – направление распространения ДВ; W – направление распространения ПВ

Одним из основных положений о «взрывном горении» является экспериментальный факт истекания со свободной поверхности ВВ ПВ, имеющих скорость большую, чем скорость детонации. Поэтому эффект опережения ПВ фронта вблизи боковой поверхности слоя ВВ вполне реализуем.

Для проверки этого предположения проведен опыт по схеме, приведенной на рис. 1, при этом вместе с электронно-оптическим методом был применен радиоинтерферометрический метод, позволяющий регистрировать $x-t$ диаграммы положения фронта ДВ. Исследовали ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 65\%$, $L = 15$ мм. Опыт показал, что отражение сигнала от детонационного фронта происходит за опережающим ПВ, и отстает от них на 10–12 мм (см. рис. 2б), а пересжатый режим детонации, реализующийся из-

за использования в качестве инициатора ПВВ, затухает на расстоянии ~ 10 мм от места инициирования.

Вторая серия опытов проводилась при регистрации боковой поверхности заряда. Исследовали ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , α , равной 0, 65, 85, 90 %, насыпной плотности. Некоторые из полученных фотоснимков представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, ПВ действительно опережают детонационный фронт над поверхностью заряда для всех исследованных ВВ. Данный эффект не исчезает, если поставить на пути ПВ преграду (пенопласт, сталь), при подпрессовки заряда до $\approx 1,25 \rho_{\text{насып}}$, или при использовании вместо планок из пенопласта бумажные. Исследование прессованных составов ($\rho > 1,8 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 65\%$, $\alpha = 0\%$) показало отсутствие опережения ПВ детонационного фронта. Как и ожидали авторы, уменьшение газопроницаемости при прессовании зарядов из ВВ препятствует фильтрации ПВ из зоны повышенных давлений вглубь ВВ. При детонации прессованных ВВ наблюдаются классические изображения разлета продуктов взрыва.

При детонации смеси с $\alpha = 85\%$ зарегистрирован сильно искривленный фронт (см. рис. 4в). При фотографировании смеси с $\alpha = 90\%$ не было зарегистрировано детонационного фронта, на снимках видны слабосветящиеся продукты взрыва. По всей видимости, по мере увеличения массовой доли NaHCO_3 режим распространения детонации посредством ударного сжатия становится менее устойчивым, а при $\alpha = 90\%$ на смену ему приходит режим, распространение которого, обусловлено проникающими в глубину ВВ продуктами взрыва.

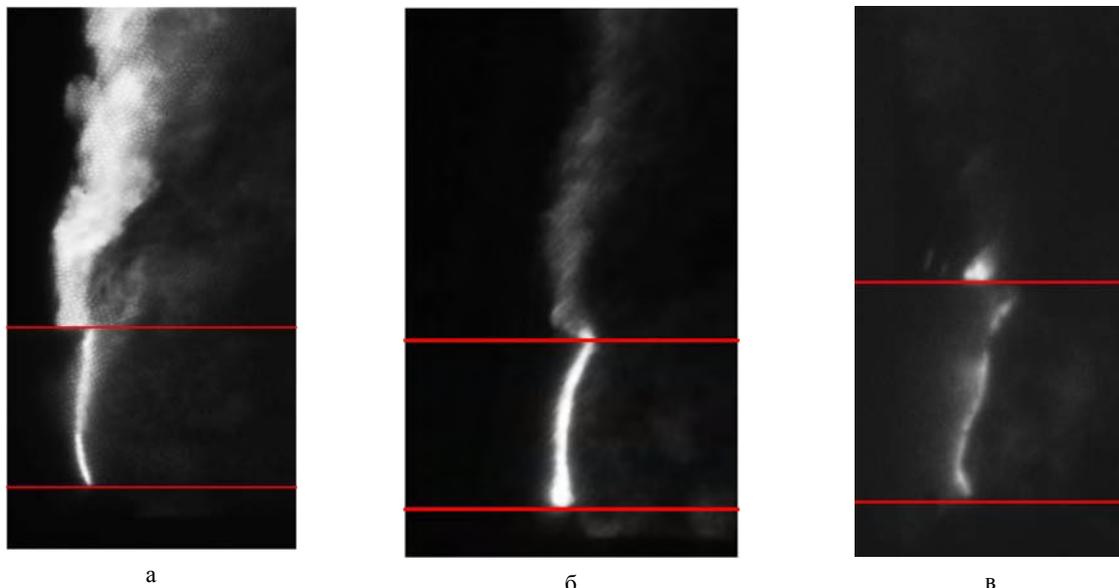


Рис. 4. Фотоснимки детонационного фронта на боковой поверхности заряда (распространение детонации справа налево; горизонтальными прямыми отмечены границы заряда ВВ): а – $\alpha = 0\%$, $L = 16$ мм; б – $\alpha = 65\%$, $L = 16$ мм; в – $\alpha = 85\%$, $L = 20$ мм

Измерение профилей давления детонационной волны ВВ ВДТ/ NaHCO_3

Качественно по виду профиля давления или массовой скорости ДВ можно судить о реализующихся режимах детонации ВВ. Необходимым атрибутом реализации модели ЗНД является выраженный спад параметров за фронтом ударной волны и классический «треугольный» профиль. Признаками «неклассического» детонационного режима являются плавное нарастание параметров во фронте волны, наличие «предвестника» и отсутствие химпика [14].

Постановка опытов

Для регистрации профилей давления детонационной волны применен метод пьезоэлектрического ПВДФ-датчик давления [12, 13]. Временное разрешение датчика в зависимости от величины воздействующего на него давления составляет от 1 до 15 нс [13, 15].

Датчик позволяет регистрировать амплитуду динамического давления от $7,2 \cdot 10^{-6}$ до 36 ГПа, при этом относительная погрешность ее определения оценивается как 10 % [13].

Исследовались ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 65\%$, 75% , 85% , 90% плотности близкой к насыпной.

Схема экспериментальной сборки приведена на рис. 5.

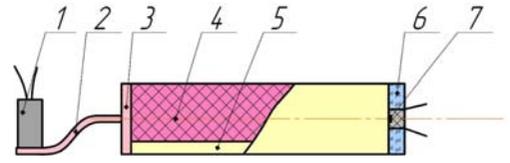


Рис. 5. Схема экспериментальной сборки по определению профилей давления детонационной волны: 1 – ЭД; 2, 3 – пластина из ПВВ; 4 – исследуемое ВВ; 5 – планка из пенопласта; 6 – оргстекло; 7 – ПВДФ-датчик

ВВ размещали в планки из пенопласта 5 с полостью шириной 33 мм, длиной 80 мм, и высотой 33 мм. Толщина стенок планки – 4 мм. Иницирование исследуемых ВВ 4 осуществляли путем подвода детонации пластиной из ПВВ $30 \times 2 \times 50$ мм 2. Для измерения профиля давления на границе ПВ-фторопласт использовался торцевой ПВДФ-датчик 7.

Непосредственно в опытах при приложении к ПВДФ-датчику механического давления, вызванного воздействием ударного сжатия и/или ПВ, регистрируется генерируемый ПВДФ-датчиком электрический сигнал (сила тока).

Путем интегрирования осциллограмм тока получают зависимости давления от времени.

Результаты

Некоторые из полученных профилей давления на границе ПВ-ПВДФ-датчик представлены на рис. 6.

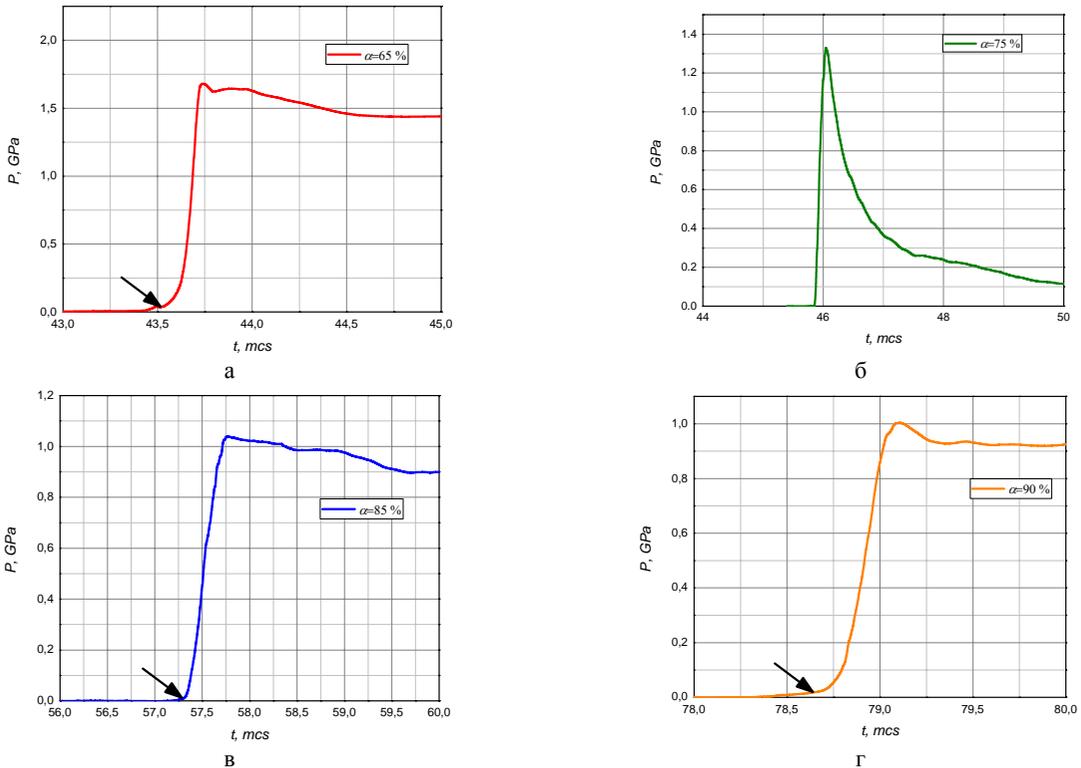


Рис. 6. Профили давления на границе ПВ-ПВДФ-датчик: а – ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 65\%$; б – $\alpha = 75\%$; в – $\alpha = 85\%$; г – $\alpha = 90\%$

Как видно из рис. 6, только один профиль имеет треугольный вид (см. рис. 6б). В остальных наблюдается немонотонное поведение давления за фронтом детонационной волны, а также ярко выраженный «предвестник» (показан на рис. 6а, 6б и 6в черной стрелкой). Наличие «предвестника», по всей видимости, связано с записью датчиком давления от струй ПВ, распространяющихся впереди фронта ударного сжатия.

Полученные результаты указывают в данном случае на реализацию двухфазного «неклассического» режима детонации [16].

Следует отметить, что результаты опытов оказались не всегда воспроизводимыми и, по всей видимости, регистрация в данной поставке классического треугольного профиля или признаков «неклассического» режима носит случайный характер и определяется флуктуациями засыпки ВВ. Именно этим объясняется полученный треугольный профиль для ВВ с $\alpha = 75\%$.

В табл. 2 представлены времена нарастания фронта (Δt , нс) профилей давления, приведенных на рис. 6. За время нарастания фронта принималась разность между значением времени при давлении в 90 и 10 % от максимального значения давления (P_{max} , ГПа).

Таблица 2

Времена нарастания фронта ударного сжатия

α , %	P_{max} , ГПа	Δt , нс
65	1,68	100
75	1,33	140
85	1,05	270
90	1,02	280

Из табл. 2, видно, что с увеличением массовой доли NaHCO_3 в смеси время нарастания фронта ударного сжатия увеличивается и доходит до значения 280 нс. Данный экспериментальный факт указывает на ослабление роли ударного сжатия в передаче детонации при увеличении массовой доли NaHCO_3 .

Представленные результаты по определению профилей ДВ отражают сильную неоднородность и сложность процессов, происходящих при детонации ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $65\% \leq \alpha \leq 90\%$ и не могут дать однозначного ответа о ведущей роли процесса в механизме распространения детонации.

Передача детонации ВВ ВДТ/ NaHCO_3 через преграды

Для определения роли в процессе передачи детонации, проникающих в глубь ВВ продуктов взрыва, проведены опыты по передаче детонации через преграды.

Постановка экспериментов

Объектом исследований являлись ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , α , равной 65, 75, 85, 90 %. Схема экспериментальной сборки представлена на рис. 7.

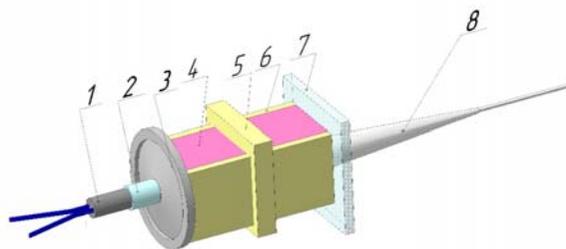


Рис. 7. Схема экспериментальной сборки передачи детонации ВВ через преграду: 1 – ЭД; 2 – промежуточный инициатор ВВ; 3 – генератор плоской УВ; 4 – активный заряд ВВ; 5 – преграда; 6 – пассивный (исследуемый) заряд ВВ; 7 – диэлектрический волновод

ВВ размещали в планки из пенопласта с полостью шириной 33 мм, длиной 40 мм, и высотой 33 мм. Толщина стенок планки – 4 мм.

Иницирование исследуемого ВВ 6, рис. 7, осуществлялось генератором плоской ударной волны 3. Пенопластовые преграды 5, $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$, представляющие собой параллелепипеды с размерами $50 \times 50 \times R$ мм использовались в двух вариантах: сплошные преграды и преграды с просверленными сквозными отверстиями по всей поверхности контакта преграды с ВВ. Сплошные преграды служили для формирования иницирующей УВ. Преграды с перфорациями позволяли проникать ПВ активного заряда 4 в пассивный 6 и тем самым иницировать его.

Все стадии распространения волновых процессов регистрировали с помощью радиоинтерферометра.

Типичная интерферограмма, зарегистрированная в одном из опытов, представлена на рис. 8.

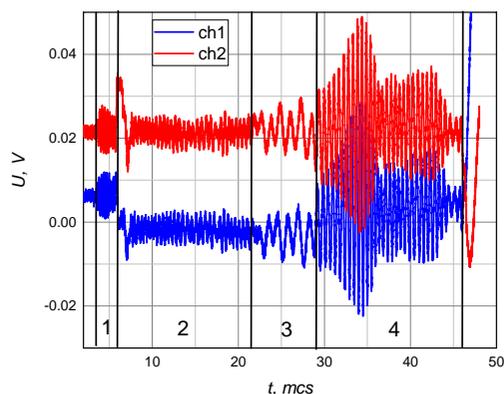


Рис. 8. Интерферограмма передачи детонации ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 65\%$ через сплошную преграду: 1 – детонация генератора плоской УВ; 2, 4 – детонация ВВ; 3 – движение УВ в преграде и в ВВ

Путем обработки экспериментальных интерферограмм, получены $x-t$ диаграммы возбуждения детонации. По их характерному излому определяли глубину возбуждения детонации ВВ (H , мм). Пример

выбора значения глубины возбуждения детонации в ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 65\%$ приведен на рис. 9.

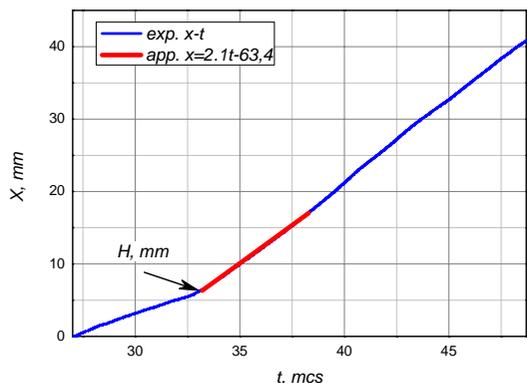


Рис. 9. $X-t$ диаграмма возбуждения детонации ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 65\%$ через сплошную преграду

Результаты

Результаты опытов представлены в таб. 3.

Таблица 3

Результаты опытов по передаче детонации через преграды

№ опыта	α , %	Преграда	Глубина возбуждения детонации, мм
1	65	Сплошная, $R = 8$ мм	$4,4 \pm 0,5$
2			$4 \pm 0,4$
3		С перфорациями, $R = 8$ мм, 25 отв. $\varnothing 1,8$ мм	$7,1 \pm 0,6$
4			$6,6 \pm 0,6$
5	75	Сплошная, $R = 7$ мм	$5,2 \pm 0,6$
6			$4,6 \pm 0,6$
7	75	С перфорациями $R = 7$ мм, 25 отв. $\varnothing 1,8$ мм	$6,2 \pm 0,7$
8			$5,9 \pm 0,6$
9	85	Сплошная, $R = 6$ мм	$5,3 \pm 0,4$
10			$5,1 \pm 0,5$
11		С перфорациями $R = 6$ мм, 25 отверстий $\varnothing 1,8$ мм	$8,9 \pm 0,8$
12			$8,2 \pm 0,8$
13	90	Сплошная, $R = 4$ мм	Нет возбуждения детонации
14			
15		С перфорациями, $R = 4$ мм, 16 отв. $\varnothing 2$ мм	Есть передача детонации
16			

Как видно из табл. 3, глубина возбуждения детонации для ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , α , равной 65, 75, 85 % несколько больше (2–4 мм) при использовании перфорированных преград, что может быть связано либо с ослабляющим влиянием отверстий на инициирующую УВ, либо инициированием ПВ. В данном случае, детонация передается, в основном, посредством ударного сжатия.

Из-за слабого сигнала, зарегистрированного в опытах для ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 90\%$ не удалось

определить глубину возбуждения. Однако, сигнал достаточный для того, чтобы судить о стационарности переданной детонации. Детонация не передается при использовании сплошных преград, при замене преграды на перфорированную детонация передается инициирующими ВВ продуктами взрыва.

Заключение

С помощью электронно-оптической комплекса НАНОГЕЙТ-22 обнаружен эффект опережения детонационного фронта продуктами взрыва, истекающими под углом к поверхности заряда индивидуальных насыпных ВВ (тэн, ВДТ) и смесевых ВДТ/ NaHCO_3 в интервале $65\% \leq \alpha \leq 90\%$. При фотографировании ВВ ВДТ/ NaHCO_3 , $\alpha = 85\%$ зарегистрирован сильно искривленный фронт ДВ, с уменьшением массовой доли NaHCO_3 детонационный фронт не наблюдается, видны слабосветящиеся ПВ.

С применением ПВДФ-датчика давления получены профили давления на границе ПВ-датчик. В большинстве опытов наблюдаются «неклассические» (отличные от треугольных) профили давления с немонотонным изменением давления за фронтом. Зарегистрированы «предвестники», связанные с действием на датчик струй продуктов взрыва. Показано, что с увеличением массовой доли NaHCO_3 возрастает время нарастания фронта ударного сжатия.

С помощью радиоинтерферометрического метода установлено, что в интервале $65\% \leq \alpha \leq 85\%$ детонация передается, в основном, посредством ударного сжатия, а при $\alpha = 90\%$ детонация передается преимущественно продуктами взрыва.

Таким образом, с помощью трех различных методов исследования показано, что по мере увеличения массовой доли NaHCO_3 режим распространения детонации посредством ударного сжатия становится менее устойчивым, а при $\alpha = 90\%$ на смену ему приходит режим, распространение которого обусловлено проникающими в глубь ВВ продуктами взрыва. По всей видимости, массовая доля ВВ NaHCO_3 , $\alpha = 85\%$ близка к критической для распространения детонации посредством ударного сжатия (при дальнейшем увеличении массовой доли NaHCO_3 детонация передается, в основном, струями продуктов взрыва).

Литература

1. Андреевских Л. А., Дерибас А. А. и др. Перспективное ВВ для сварки взрывом тонких металлических фольг // Международная конференция «ХIII Харитоновские научные тематические чтения». Сборник тезисов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 89–92.
2. Андреевских Л. А., Дроздов А. А., Михайлов А. Л., Самарков Ю. М., Скачков О. А., Дери-

бас А. А. Исследование возможности создания сваркой взрывом биметаллических композиционных материалов высокожаростойкая порошковая сталь-медь // Сталь. 2015. № 1. С. 84–87.

3. Апин А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ // ДАН СССР. 1945. Т. L, № 9. С. 285–287.

4. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2017.

5. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. I. Влияние инертной добавки на параметры детонации // ФГВ. 1979. № 3. С. 92–101.

6. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. II. Влияние инертной добавки на структуру фронта, параметры и время реакции // ФГВ. 1981. № 1. С. 79–90.

7. Ершов А. П., Иванов П. И., Андреев В. В. Детонация сильноразбавленного ВВ // ФГВ. 1993. № 3. С. 124–130.

8. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов. Монография под редакцией А. Л. Михайлова. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. С. 218–254.

9. Баталов С. В., Филин В. П., Шапошников В. В. Радиоволновой метод исследования физических яв-

лений и химических превращений в гетерогенных ВВ под действием УВ // ФГВ. 1991. Т 27, № 6. С. 107.

10. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударноволновых и детонационных процессов // ФГВ. 2011. № 6. С. 29–41.

11. Электронно-оптическая восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22. Руководство по эксплуатации. М., 2012.

12. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Куропаткин В. Г. и др. ПВДФ-датчик динамического давления: физическая модель и результаты экспериментов // ФГВ. 2003. № 5. С. 109–115.

13. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Куропаткин В. Г., Брагунец В. А. и др. ПВДФ-датчик динамического давления // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 4. С. 113–121.

14. Ершов А. П., Рубцов И. А. О детонации низкоплотных взрывчатых веществ // ФГВ. 2019. № 1. С. 128–135.

15. Bauer F. PVDF shock compression sensors in shock wave physics. Proc. Of Shock Compression in Condensed Matter. 2003. P. 1121–1124.

16. Андреев В. В., Ершов А. П., Лукьянчиков Л. А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // ФГВ. 1983. № 3. С. 89–93.