

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

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва
607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

С помощью радиоинтерферометрического, электронно-оптического (НАНОГЕЙТ-22) методов и метода с применением ПВДФ-датчика давления исследована детонация смесей высокодисперсного тэна с гидрокарбонатом натрия с массовой долей последнего до 90 %. Полученные экспериментальные результаты указывают на возможность существования различных режимов детонации в смесях. При массовой доле $\text{NaHCO}_3 \leq 85 \%$ распространение детонационной волны в основном обусловлено ударным сжатием. При большем содержании NaHCO_3 (90 %) агентом распространения преимущественно являются струи продуктов взрыва.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, детонационная волна, взрывное горение, продукты взрыва, фоторегистрация, пьезоэлектрический датчик давления, радиоинтерферометрический метод.

DOI 10.15372/FGV20200611

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны малоплотные смесевые взрывчатые вещества (ВВ), в которых используются высокодисперсный тэн (ВДТ) и гидрокарбонат натрия (NaHCO_3) с массовой долей последнего $\alpha \leq 90 \%$. Эти ВВ обладают уникальным свойством: при наличии большого количества инертной добавки они способны детонировать с малой скоростью $D \approx 1 \div 2.5 \text{ км/с}$ в слоях толщиной $\approx 2 \div 10 \text{ мм}$.

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. Апинным взрывным горением или струйно-пробойным [1].

Выяснение механизма детонации малоплотных смесевых ВВ ВДТ/ NaHCO_3 представляет собой актуальную научную и научно-практическую задачу, поскольку такие ВВ ис-

пользуют в настоящее время для прецизионной сварки взрывом тонких ($\leq 2 \text{ мм}$) слоев металлов ($\alpha = 65 \%$) [2, 3], а также для исследования динамической пластичности материалов ($45 \leq \alpha \leq 90 \%$).

В работах [4, 5], посвященных исследованию детонации сильноразбавленных ВВ, обнаружены режимы распространения детонации посредством ударно-волнового сжатия, в проффилях которых в большинстве случаев авторы регистрировали химпик.

В работе [6] 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 [7–9] и электронно-оптического [10] методов, а также метода ПВДФ-датчика давления [11, 12] исследовано распространение детонации взрывчатых сме-

© Спирин И. А., Пронин Д. А., Митин Е. С., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Цветков А. В., Шестаков Е. Е., Сустаева Ю. М., Шевлягин О. В., Вахмистров С. А., 2020.

сей тэна с гидрокарбонатом натрия (пищевой содой) с массовой долей последнего $\alpha = 0 \div 90 \%$ и толщиной слоя смеси $10 \div 20$ мм.

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовались малоплотные взрывчатые смеси высокодисперсного тэна с гидрокарбонатом натрия (NaHCO_3), массовая доля которого варьировалась. Удельную поверхность компонентов смеси $S_{\text{уд}}$ определяли с помощью прибора Товарова, она составляла для ВДТ $\approx 4500 \text{ см}^2/\text{г}$, для $\text{NaHCO}_3 \approx 660 \text{ см}^2/\text{г}$. ВДТ получали путем высадки ацетонового раствора тэна в дистиллированную воду с последующей стабилизацией тэна. Основные характеристики исследуемых ВВ представлены в табл. 1.

2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ

Исследовали смеси NaHCO_3 с $\alpha = 65, 85, 90 \%$ и ВДТ плотностью, близкой к насыпной; прессованную смесь NaHCO_3 с $\alpha = 65 \%$, $\rho \approx 1.86 \text{ г}/\text{см}^3$ и ВДТ плотностью $\rho \approx 1.7 \text{ г}/\text{см}^3$.

Опыты проводили по схеме, представленной на рис. 1.

ВВ насыпной плотности размещали в контейнере из пенопласта ($\rho = 0.4 \text{ г}/\text{см}^3$) с полостью шириной 30 мм, высотой L (мм), длиной 110 мм, толщина стенок контейнера 4 мм. Инициирование исследуемых ВВ осуществляли детонацией пластического ВВ на основе тэна.

Использовался электронно-оптический комплекс NANOGATE 2000, основой которого является высокоскоростная восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22 с частотой съемки

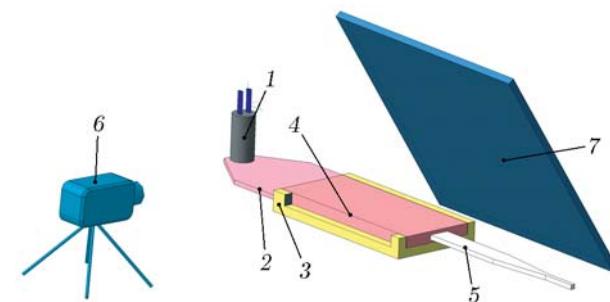


Рис. 1. Схема постановки опытов:

1 — электродетонатор, 2 — пластичное ВВ, 3 — контейнер из пенопласта, 4 — исследуемое ВВ, 5 — плоский облучатель радиоинтерферометра, 6 — НАНОГЕЙТ-22, 7 — зеркало

до 10^9 кадр/с [9], позволяющая получать фотоснимки с временем экспозиции от 5 нс и с пространственным разрешением 30 пар лин/мм.

Проводилась фоторегистрация либо верхней поверхности заряда (с помощью зеркала), либо боковой поверхности (напрямую). В последнем случае одну стенку контейнера заменили оптически прозрачной пленкой, чтобы наблюдать фронт детонационной волны (ДВ).

В одном из опытов вместе с фоторегистрацией применялся радиоинтерферометрический метод для регистрации движения ДВ по заряду ВВ с погрешностью не более 0.3 мм. Использовался радиоинтерферометр ПРИ-03 с длиной волны 3.2 мм производства ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова (г. Нижний Новгород) и цифровой осциллограф Agilent DSO 9254A. Радиоизлучение вводилось в сборку через планарный облучатель.

Некоторые из фотоснимков, полученных при регистрации детонации на верхней поверхности заряда, представлены на рис. 2. Горизонтальной линией на рис. 2, б указано положение детонационного фронта согласно радиоинтерферометрической записи.

Как видно из рис. 2, б, зафиксировано опережение детонационного фронта ВДТ продуктами взрыва. По всей видимости, из-за подобного опережения не удалось идентифицировать фронт ДВ в опытах с $\alpha = 85$ и 65% .

Опережение ПВ может осуществляться следующим образом. Впереди фронта ДВ движутся струи ПВ, образованные микрокумуляцией в пористой структуре ВВ. За счет высокой пористости ВВ струи ПВ проникают далее в глубь ВВ, при этом часть струй тормозит-

Таблица 1
Основные характеристики исследуемых ВВ

$\alpha, \%$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	$\rho_{\text{max}}, \text{г}/\text{см}^3$	$K, \%$	$H_{\text{кр}}, \text{мм}$	$D, \text{м}/\text{с}$
0 (ВДТ)	0.37	1.77	80	<0.7	3 300
65	0.7	2	65	1.5	2 060
75	0.82	2.04	60	2	1 720
85	0.92	2.09	56	3	1 410
90	0.99	2.11	53	9	1 130

При мечания. ρ_{max} — максимальная теоретическая плотность, K — пористость, $H_{\text{кр}}$ — критическая толщина детонирующего слоя, D — скорость детонации.

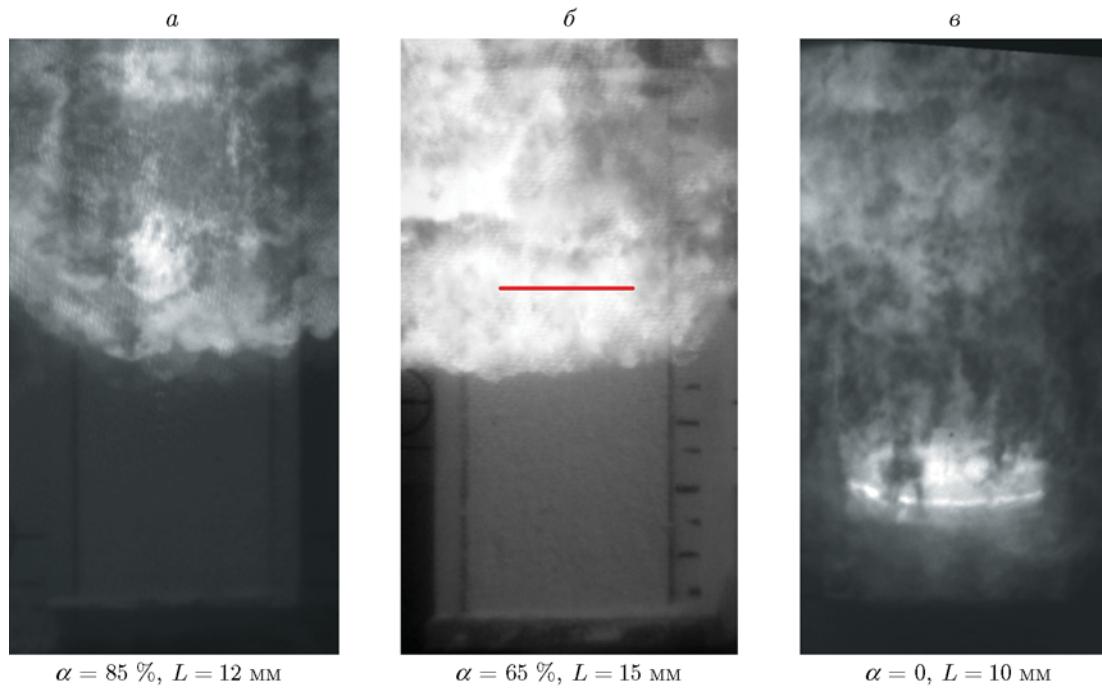


Рис. 2. Фотоснимки детонационного фронта

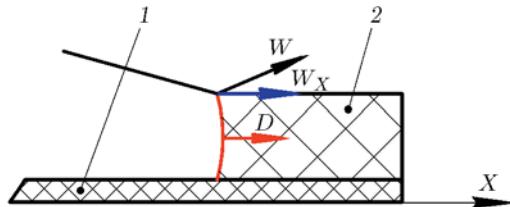


Рис. 3. Возможный путь опережения детонационного фронта продуктами взрыва:

1 — контейнер, 2 — ВВ, D — направление распространения ДВ, W — направление распространения ПВ

ся на частицах вещества. В связи с тем, что фронт ДВ, находящийся в контакте с воздухом, неизбежно искривлен, струи ПВ вылетают с поверхности заряда в атмосферу под некоторым углом. При этом из-за малого сопротивления среды скорость струй ПВ больше, чем скорость детонации. Описанный способ схематично изображен на рис. 3.

Для проверки эффекта опережения детонационного фронта продуктами взрыва проведен опыт по схеме, представленной на рис. 1, при этом вместе с электронно-оптическим был применен радиоинтерферометрический метод, позволяющий регистрировать $x-t$ -диаграммы движения фронта ДВ. Исследовали смесь с $\alpha = 65\%$ при $\rho = 0.72 \text{ г}/\text{см}^3$, $L = 15 \text{ мм}$. Опыт по-

казал, что отражение сигнала радиоинтерферометра от детонационного фронта происходит за опережающими его ПВ. При этом детонационный фронт отстает от них на $10 \div 12 \text{ мм}$ (см. рис. 2, б), а пересжатый режим детонации, реализующийся из-за использования в качестве инициатора более мощного пластического ВВ, затухает на расстоянии $\approx 10 \text{ мм}$ от места инициирования.

Вторая серия опытов проводилась при регистрации ДВ на боковой поверхности заряда. Исследовали смеси с $\alpha = 65, 85, 90\%$ и ВДТ насыпной плотности. Некоторые из полученных фотоснимков представлены на рис. 4. Видно, что ПВ действительно опережают детонационный фронт над поверхностью заряда для всех исследованных ВВ.

Следует отметить, что зарегистрированное опережение детонационного фронта продуктами взрыва может быть связано с расширяющимися ПВ при детонации пластических ВВ. С целью проверки этого предположения были проведены опыты с преградой, располагающейся в контакте со свободной поверхностью ВВ (рис. 5). Находящаяся на пути опережающих ПВ преграда (пенопласт или сталь) отсекает продукты взрыва пластического ВВ. Опыты показали, что присутствие преграды не влияет на наличие опережающих ПВ.

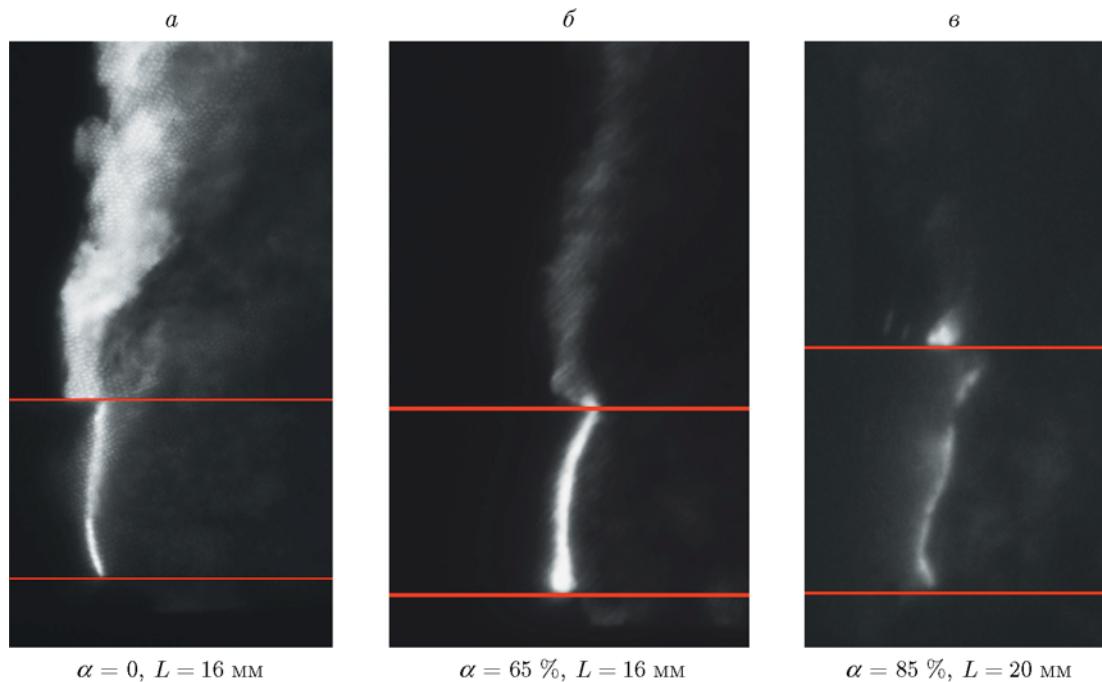


Рис. 4. Фотоснимки детонационного фронта на боковой поверхности заряда:
распространение детонации справа налево, горизонтальные линии — границы заряда ВВ

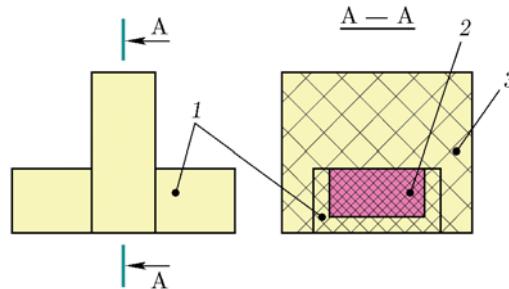


Рис. 5. Схема постановки опытов с преградой:
1 — планка из пенопласта, 2 — исследуемое ВВ,
3 — преграда

Эффект опережения детонационного фронта продуктами взрыва сохраняется также при подпрессовке исследуемого ВВ до плотности $\approx 1.6\rho_0$ или при использовании вместо планок из пенопласта бумажных.

Исследование прессованных составов размером $12 \times 20 \times 150$ мм показало отсутствие опережения детонационного фронта продуктами взрыва. Полученные фотоснимки в масштабе 1 : 1 представлены на рис. 6 и 7. Как и ожидали авторы, уменьшение газопроницаемости при прессовании зарядов из ВВ препятствует фильтрации ПВ из зоны повышенных давлений

в глубь ВВ. При детонации прессованных ВВ наблюдаются классические изображения разлета ПВ.

При детонации смеси с $\alpha = 85 \%$ зарегистрирован сильно искривленный фронт (см. рис. 4, б). При фотографировании смеси с $\alpha = 90 \%$ не зарегистрировано детонационного фронта, на снимках видны слабосветящиеся ПВ (здесь не представлены ввиду их малой информативности). 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 глубь ВВ продуктами взрыва.

3. РЕГИСТРАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ ДВ

Качественно по виду профиля давления или массовой скорости ДВ можно судить о реализующихся режимах детонации ВВ. Необходимым условием реализации модели Зельдовича — Неймана — Дёринга является выраженный спад параметров за фронтом УВ и классический «треугольный» профиль. Признаками реализации «неклассического» режима являются плавное нарастание параметров во фрон-

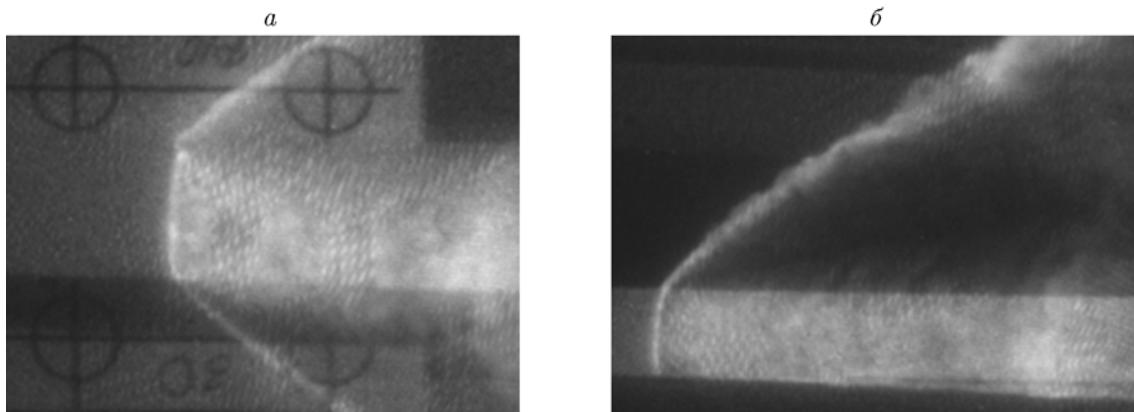


Рис. 6. Фотоснимки детонации смеси ВДТ/NaHCO₃ ($\alpha = 65\%$, $\rho \approx 1.86 \text{ г/см}^3$): направление детонации справа налево, *а* — регистрация ДВ с верхней поверхности заряда, *б* — с боковой поверхности заряда

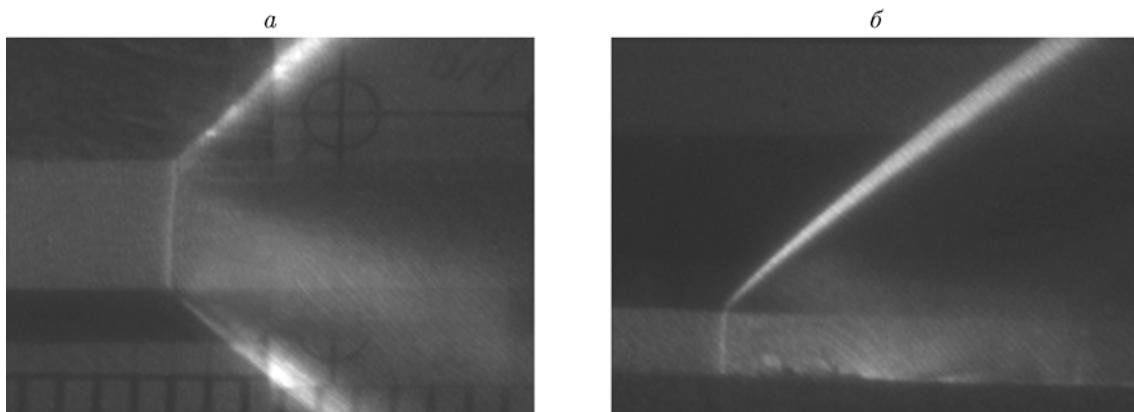


Рис. 7. Фотоснимки детонации ВДТ ($\rho \approx 1.7 \text{ г/см}^3$): направление детонации справа налево, *а* — регистрация ДВ с верхней поверхности заряда, *б* — с боковой поверхности заряда

те волны, наличие предвестника и отсутствие химпика [13].

Для регистрации профилей давления ДВ применен метод пьезоэлектрического ПВДФ-датчика давления [11, 12] с площадью чувствительного элемента 4 мм^2 . Временное разрешение датчика в зависимости от воздействующего на него давления составляет 1 \div 15 нс [12, 14]. Датчик позволяет регистрировать амплитуду динамического давления от $7.2 \cdot 10^{-6}$ до 36 ГПа, при этом относительная погрешность ее определения оценивается 10 % [12].

Исследовались смеси с $\alpha = 65, 85, 90\%$, плотностью, близкой к насыпной.

Схема экспериментальной сборки приведена на рис. 8.

ВВ размещали в контейнере из пенопласта с полостью шириной 33 мм, длиной 80 мм и вы-

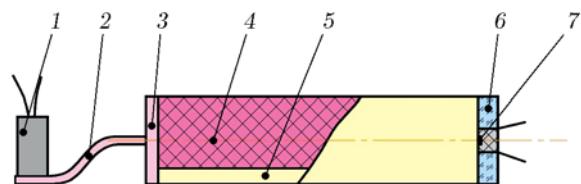


Рис. 8. Схема экспериментальной сборки по определению профилей давления детонационной волны:

1 — электродетонатор, 2, 3 — пластина из пластического ВВ, 4 — исследуемое ВВ, 5 — контейнер из пенопласта, 6 — оргстекло, 7 — ПВДФ-датчик

сотой 33 мм. Толщина стенок контейнера 4 мм. Инициирование исследуемых ВВ осуществляли детонацией пластины из пластического ВВ размером 30 \times 2 \times 50 мм. Для регистрации профиля давления на границе ПВ — фторопласт

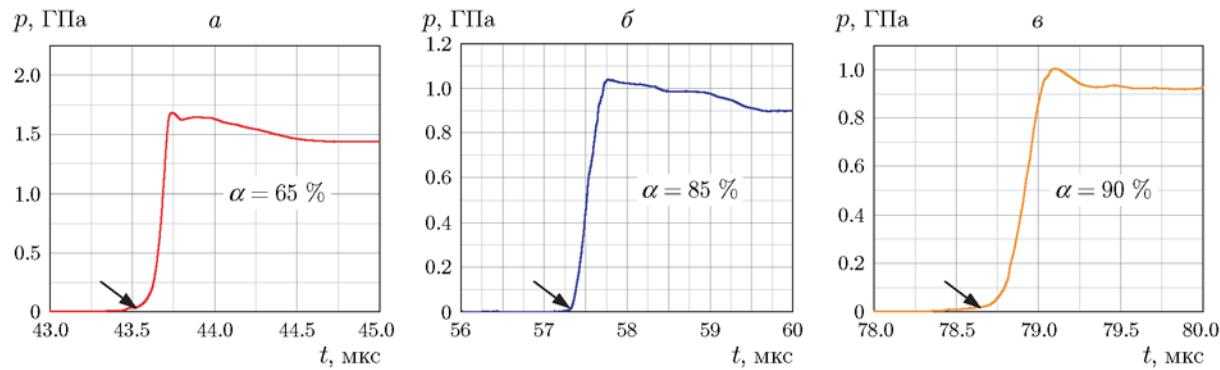


Рис. 9. Профили давления на границе ПВ — ПВДФ-датчик

Таблица 2
Время нарастания фронта УВ

$\alpha, \%$	$p_{\max}, \text{ГПа}$	$\Delta\tau, \text{нс}$
65	1.68	100
85	1.05	270
90	1.02	280

использовался торцевой ПВДФ-датчик.

Некоторые из полученных профилей давления на границе ПВ — фторопласт показаны на рис. 9. Профили имеют более-менее выраженный треугольный вид с медленным темпом спада давления за фронтом волны, также виден заметный предвестник (показан на рис. 9 стрелкой). Наличие предвестника, по всей видимости, связано с тем, что датчик регистрирует давление от струй ПВ, распространяющихся впереди фронта ударного сжатия. Полученные результаты указывают в данном случае на реализацию двухфазного «неклассического» режима детонации, описанного в работе [15].

В табл. 2 представлено время нарастания фронта $\Delta\tau$ профилей давления, приведенных на рис. 9. Время нарастания фронта определялось как разность между значениями времени при давлениях, составляющих 90 и 10 % от максимального значения давления p_{\max} . Из табл. 2 видно, что с увеличением массовой доли NaHCO_3 в смеси время нарастания фронта ударного сжатия увеличивается и доходит до 280 нс. Данный экспериментальный факт указывает на ослабление роли ударного сжатия в передаче детонации при увеличении массовой доли NaHCO_3 .

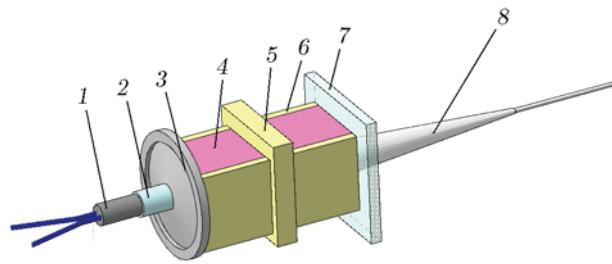


Рис. 10. Схема экспериментальной сборки передачи детонации ВВ через преграду:

1 — электродетонатор, 2 — промежуточный инициатор ВВ, 3 — генератор плоской УВ, 4 — исследуемое ВВ, 5 — преграда, 6 — контейнер из пенопласта, 7 — пластина из оргстекла, 8 — диэлектрический волновод

4. ПЕРЕДАЧА ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ПРЕГРАДЫ

Для определения роли проникающих в глубь ВВ продуктов взрыва проведены опыты по передаче детонации через преграды. Исследовались смеси с $\alpha = 65, 75, 85, 90 \%$. Схема экспериментальной сборки представлена на рис. 10.

Исследуемое ВВ размещали в контейнере из пенопласта с полостью шириной 33 мм, длиной 40 мм и высотой 33 мм. Толщина стенок контейнера 4 мм. Активный и пассивный (исследуемый) заряды формировались из одного и того же ВВ.

Инициирование активного заряда осуществлялось генератором плоской УВ. Пенопластовые преграды плотностью $\rho = 0.4 \text{ г/см}^3$, представляющие собой параллелепипеды шириной и высотой 50 мм, толщиной R (мм), использовались в двух вариантах: сплошные и с просверленными сквозными отверстиями по всей поверхности контакта преграды с ВВ.

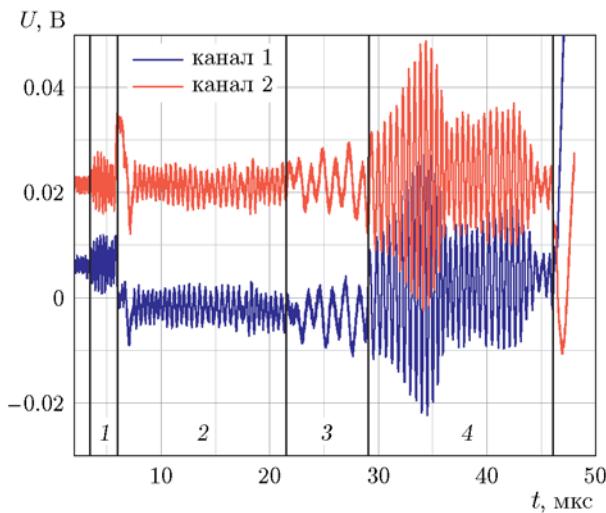


Рис. 11. Интерферограмма передачи детонации смеси ВДТ/NaHCO₃ ($\alpha = 65\%$) через сплошную преграду: 1 — детонация генератора плоской УВ, 2, 4 — детонация смеси, 3 — движение УВ в преграде и в ВВ

Сплошные преграды служили для формирования инициирующей УВ. Преграды с перфорациями позволяли проникать ПВ активного заряда в пассивный и тем самым инициировать его.

Все стадии распространения волновых процессов регистрировали с помощью радиоинтерферометра. Радиоизлучение вводилось в сборку через конический облучатель.

Типичная интерферограмма, зарегистрированная радиоинтерферометром в одном из опытов, представлена на рис. 11. Интерферограмма — это сигнал с частотой, равной разности частот принятых и излученных радиоинтерферометром радиоволн. Радиоинтерферометр определяет только проекции векторов перемещения и скорости объекта на вектор визирования. Причем знак проекции не может быть определен по единственному сигналу интерферограммы. Для того чтобы определить, приближается объект к интерферометру или удаляется, необходимо сравнить фазу принимаемого сигнала с двумя опорными сигналами, фазы которых отличаются на $\pi/2$. Поэтому экспериментальная интерферограмма состоит из двух каналов, отличающихся по фазе на $\pi/2$. Как видно из рис. 11, экспериментальная интерферограмма содержит информацию по распространению ДВ в активном и пассивном зарядах, а также по движению УВ в преграде.

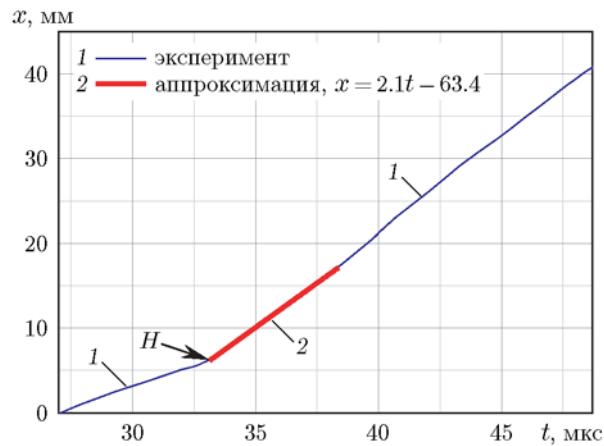


Рис. 12. x - t -Диаграмма возбуждения детонации смеси ВДТ/NaHCO₃ ($\alpha = 65\%$) через сплошную преграду

Наблюдаются скачки амплитуды отраженного сигнала, которые могут быть связаны со следующими эффектами: изменением условий распространения радиоизлучения при его отражении на границах заряда ВВ — пенопласт и ВВ — воздух; неодномерностью фронта ДВ; неоднородностью распространения радиоизлучения в пористой структуре смесей.

Путем обработки экспериментальных интерферограмм получены x - t -диаграммы перехода УВ в детонацию. По их характерному излому определяли глубину возбуждения детонации ВВ (H , мм). Пример выбора глубины возбуждения детонации в смеси с $\alpha = 65\%$ приведен на рис. 12.

Результаты опытов представлены в табл. 3. Видно, что глубина возбуждения детонации в смесях с $\alpha = 65, 75, 85\%$ несколько больше (на 2–4 мм) при использовании перфорированных преград, что может быть связано либо с ослабляющим влиянием отверстий на инициирующую УВ, либо с инициированием ПВ. В данном случае детонация передается в основном посредством ударного сжатия.

Из-за слабого сигнала, зарегистрированного в опытах для смеси с $\alpha = 90\%$, не удалось определить глубину возбуждения. Однако сигнал достаточен для того, чтобы судить о стационарности детонации. При обработке интерферограммы детонации в пассивном заряде на отдельных участках (где амплитуда отраженного сигнала была достаточной) регистрируется детонационный процесс со скоростью детонации, примерно равной предельной скорости для состава с $\alpha = 90\%$. Таким образом, в смеси

Таблица 3

Результаты опытов по передаче детонации через преграды

Номер опыта	$\alpha, \%$	Преграда	$H, \text{мм}$
1	65	Сплошная, $R = 8 \text{ мм}$	4.4 ± 0.5
2			4 ± 0.4
3		С перфорациями, $R = 8 \text{ мм}, 25$ отверстий $\varnothing 1.8 \text{ мм}$	7.1 ± 0.6
4			6.6 ± 0.6
5	75	Сплошная, $R = 7 \text{ мм}$	5.2 ± 0.6
6			4.6 ± 0.6
7		С перфорациями, $R = 7 \text{ мм}, 25$ отверстий $\varnothing 1.8 \text{ мм}$	6.2 ± 0.7
8			5.9 ± 0.6
9	85	Сплошная, $R = 6 \text{ мм}$	5.3 ± 0.4
10			5.1 ± 0.5
11		С перфорациями, $R = 6 \text{ мм}, 25$ отверстий $\varnothing 1.8 \text{ мм}$	8.9 ± 0.8
12			8.2 ± 0.8
13	90	Сплошная, $R = 4 \text{ мм}$	Нет возбуждения детонации
14		С перфорациями, $R = 4 \text{ мм}, 16$ отверстий $\varnothing 2 \text{ мм}$	
15			Возбуждение стационарной детонации
16			

с $\alpha = 90 \%$ детонация не передается при использовании сплошных преград, при замене их перфорированными преградами детонация передается инициирующими ВВ продуктами взрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью электронно-оптического комплекса НАНОГЕЙТ-22 обнаружен эффект опережения детонационного фронта продуктами взрыва, истекающими под углом к поверхности малоплотных зарядов высокодисперсного тэнна и его смесей с NaHCO_3 в массовых долях последней $65 \div 85 \%$.

С применением ПВДФ-датчика получены профили давления на границе ПВ — фоторастровой пласт, характеризующие процесс детонации в смесях ВДТ/ NaHCO_3 как двухфазный.

С помощью радиоинтерферометрического метода проведены исследования по передаче детонации в исследованных смесях через сплошные и перфорированные преграды, позволившие определить ведущую роль процесса (ударного сжатия или струй продуктов взрыва) в передаче детонации.

Таким образом, результаты измерения тремя различными методами показали, 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 $\text{NaHCO}_3 \alpha = 85 \%$ близка к критической для распространения детонации посредством ударного сжатия.

Авторы выражают благодарность В. М. Бельскому (РФЯЦ-ВНИИЭФ) за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апин А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. — 1945. — Т. 50, № 9. — С. 285–287.
2. Andreevskikh L. A., Dendenkov Yu. P., Drennov O. B., Mikhailov A. L., Titova N. N., Deribas A. A. Explosive mixture for explosive welding of thin foils // Propell., Explos., Pyrotech. — 2011. — V. 36, N 1. — P. 48–50.

3. Андреевских Л. А., Дроздов А. А., Михайлов А. Л., Самароков Ю. М., Скачков О. А., Дерибас А. А. Исследование возможности создания сваркой взрывом биметаллических композиционных материалов высокожаростойкая порошковая сталь — медь // Сталь. — 2015. — № 1. — С. 84–87.
4. Шведов К. К., Анискин А. И., Ильин А. Н., Дремин А. Н. Исследование детонации сильноразбавленных пористых ВВ. I. Влияние инертной добавки на параметры детонации // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 92–101.
5. 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 // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 1. — С. 79–90.
6. Ершов А. П., Иванов П. И., Андреев В. В. Детонация сильноразбавленного ВВ // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 3. — С. 124–130.
7. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / под ред. А. Л. Михайлова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. — С. 218–254.
8. Баталов С. В., Филин В. П., Шапошников В. В. Радиоволновой метод исследования физических явлений и химических превращений в гетерогенных ВВ под действием УВ // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 6. — С. 107–109.
9. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 29–41.
10. Электронно-оптическая восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22. Руководство по эксплуатации. — М., 2012.
11. Борисенок В. А., Симаков В. Г., Брагунец В. А., Куропаткин В. Г., Кручинин В. А., Ромаев В. Н. ПВДФ-датчик динамического давления: физическая модель и результаты экспериментов // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 5. — С. 109–115.
12. 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.
13. Ершов А. П., Рубцов И. А. О детонации низкоплотных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 128–135.
14. Bauer F. PVDF shock compression sensors in shock wave physics // AIP Conf. Proc. — 2004. — V. 706, N 1. — P. 1121–1124.
15. Андреев В. В., Ершов А. П., Лукьянчиков Л. А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 3. — С. 89–93.

Поступила в редакцию 20.09.2019.

После доработки 23.12.2019.

Принята к публикации 24.12.2019.