

УДК 535.529+662.215.1

© 1992 г.

В. Ф. Мартынюк, А. А. Сулимов, С. В. Чеканов,
М. К. Сукоян

СТРУКТУРА ВОЛНЫ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ПИРОКСИЛИНОВЫХ ПОРОХАХ

Проведены измерения скоростей процесса оптическим методом и профилей давления пьезодатчиками при распространении низкоскоростной детонации (НСД) в зарядах пироксилиновых порохов насыпной плотности при разных размерах зерна в условиях взрывного инициирования и при возникновении НСД из режима конвективного горения. Показано, что для рассмотренных систем время нарастания давления до максимального значения составляет десятки мкс. Уменьшение размера частиц при сопоставимых значениях скорости распространения НСД и максимального давления во всех случаях приводит к увеличению времени достижения максимального давления. Аналогично в случае перехода горения в НСД время достижения максимального давления больше, чем в случае взрывного инициирования НСД. Во всех случаях фронт давления отстает от фронта свечения, что согласуется с представлениями об опережающей фильтрации газовых продуктов при распространении НСД в высокопористых зарядах зерновых порохов.

Низкоскоростная детонация (НСД) взрывчатых веществ (ВВ) является одной из стадий процесса перехода горения в детонацию [1]. Режим НСД наблюдается при инициировании ВВ ударными волнами, искровом инициировании и при «взрывном инициировании», когда возбуждение НСД в нитроклетчатке осуществляется детонацией тонкого слоя контактирующего с исследуемым зарядом эластичного ВВ (ЭВВ). В работе [2] показано, что при взрывном инициировании НСД в пироксилиновых порохах может распространяться на большие расстояния без перехода в нормальную детонацию, при этом оболочки не разрушаются, что позволяет в этих условиях изучать структуру волны с помощью пьезоэлектрических датчиков давления. Аналогичным образом возможно применение пьезодатчиков в неразрушающихся оболочках ограниченной длины для изучения НСД как стадии перехода горения в детонацию в нитроклетчатке [3]. Эти возможности были использованы в настоящей работе для изучения структуры волны НСД в пироксилиновых порохах с различным размером частиц при различных способах инициирования.

Исследовались одноканальные пироксилиновые пороха ВУ_{фл.} 4/1 и 15/4 с цилиндрической формой гранул, с эффективным размером зерна 0,6; 1,66 и 3,35 мм и диаметром канала 0,1; 0,25 и 0,2 мм соответственно. Гранулы пороха ВУ_{фл.} имели флегматизированный поверхностный слой, что обеспечивало распространение детонации в данных условиях с постоянной скоростью (в нефлегматизированном пироксилиновом порохе ВУ в такой же прочной оболочке НСД ускоряется [2]).

Исследования структуры волны при взрывном инициировании проводились в стальных неразрушающихся оболочках с внутренним и внешним диаметрами соответственно 20 и 65 мм и длиной 125 мм. Оболочка была снабжена пьезоэлектрическим датчиком давления Т6000 с собственной частотой 200 кГц, который устанавливался на различных расстояниях от места инициирования. В одном сечении с датчиком давления размещалось

Характеристики профилей давления при взрывном инициировании НСД

Порох	L_d , мм	D , м/с	P_{max} , ГПа	$\tau_{P_{max}}$	$\tau_{ФД-P}$
				мкс	
ВУ _{фл}	80	1220	0,8	90	20
	80	1100	0,8	80	
	75	1240	0,85	60	
	30*	1400	1,2(?)	8(?)	
4/1	85	1000**	0,72	28	
	85	1000**	0,68	30	

* На этом расстоянии еще значителен вклад инициатора в измеряемые параметры волны

** Значение D определялось в параллельных экспериментах.

световолокно, частично заглубленное в радиальное отверстие оболочки. Для формирования электрического сигнала, подаваемого на осциллограф, использовался фотодиод ФД-9 ЭША со временем релаксации 0,25 мкс. Такая постановка опытов позволяла фиксировать взаимное расположение фронта свечения и фронта давления и измерять сам профиль давления. Во всех случаях взрывное инициирование осуществлялось слоем ЭВВ толщиной 1 мм у верхнего торца оболочки, закрытого свободно вставленной дюралюминиевой заглушкой, контактирующей непосредственно с порошком. Регистрация профилей давления и фототока осуществлялась с помощью цифрового осциллографа.

Данные по измерениям давления для порохов ВУ_{фл} и 4/1 представлены в табл. 1. В ней указаны скорости D распространения НСД¹⁾, расстояния от места инициирования, на которых установлен датчик давления L_d , значения максимального давления P_{max} , времена нарастания давления до максимального значения $\tau_{P_{max}}$ и времена, на которые подъем записи фотодиода опережает начало роста давления на записи пьезодатчика $\tau_{ФД-P}$.

Профиль давления для пороха ВУ_{фл} при скорости распространения НСД 1200 м/с представлен на рис. 1. Отметим большое время нарастания давления до максимального значения 60–90 мкс и само значение максимального давления $P_{max}=0,8$ ГПа. Несмотря на то, что данные значения давления несколько выходят за рабочий диапазон гарантированных измерений (0,6 ГПа), их можно рассматривать как оценочные, тем более что проведенная после опытов градуировка показала, что датчики остаются целыми и их чувствительность не изменяется. Наблюдаемые перед началом подъема давления небольшие пульсации характерны и для дальнейших профилей давления и будут обсуждаться ниже. Попытка измерить профиль давления в ближнем к инициатору сечении (на расстоянии 30 мм) привела к выходу из строя датчика давления, а обработанная с использованием исходной чувствительности осциллограмма дала $P_{max}=1,2$ ГПа с временем нарастания давления до максимального значения $\tau_{P_{max}}=8$ мкс. В последнем случае запись фотодиода показывает, что фронт свечения приблизительно на 20 мкс опережает фронт давления ($\tau_{ФД-P}=20$ мкс). Различие профилей давления в разных сечениях при распространении НСД с практически постоянной скоростью для пороха ВУ_{фл} в

¹⁾ Как показано в работе [2], скорости распространения НСД на таких длинах заряда для этих порохов практически постоянны при рассматриваемых условиях инициирования.

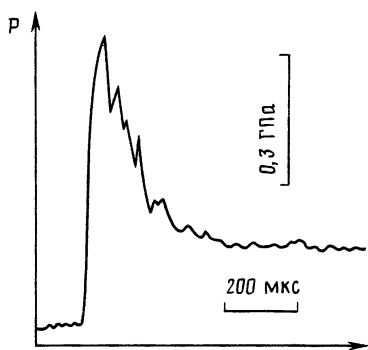


Рис. 1

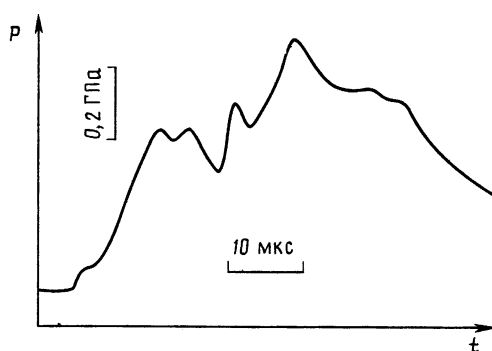


Рис. 2

Рис. 1. Профиль давления при распространении НСД в порохе ВУ_{фл} на расстоянии 80 мм от места инициирования. Взрывное инициирование; $D=1200$ м/с

Рис. 2. Профиль давления при распространении НСД в порохе 4/1 на расстоянии 85 мм от места инициирования. Взрывное инициирование; $D=1000$ м/с

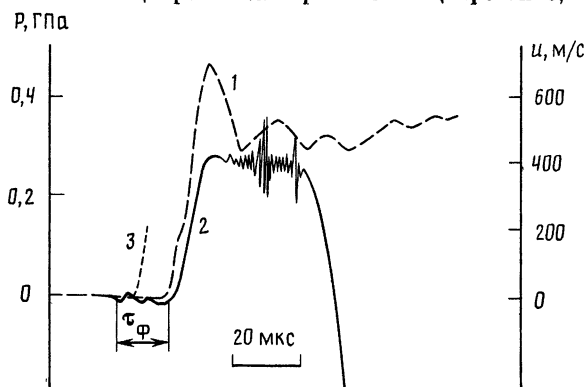


Рис. 3. Профили давления (1), массовой скорости (2) и запись фотодатчика (3) в волне НСД в порохе 15/1 на расстоянии 465 мм от места поджигания. НСД как стадия перехода конвективного горения во взрыв; $D=1220$ м/с

бумажной оболочке при ударноволновом инициировании отмечалось и в работе [2]. Хотя между этими ситуациями имеются отличия, полученные результаты еще раз свидетельствуют о том, что даже будучи нестационарной, НСД может распространяться на значительные расстояния (не менее 10 калибров) с малоизменяющейся или практически постоянной скоростью.

Типичный профиль давления волны НСД в тех же условиях для пороха 4/1 показан на рис. 2. Характерным для данного профиля является наличие двух максимумов. Представленные в табл. 1 данные P_{max} и $\tau_{P_{max}}$ относятся ко второму по времени максимуму. При сопоставимых уровнях скоростей распространения и максимальных давлений время достижения максимального давления сокращается по сравнению с порохом ВУ_{фл} до $\tau_{P_{max}}=30$ мкс. С точки зрения представлений о том, что распространение фронта реакций контролируется газофазным течением [3, 4], это несколько неожиданный результат, так как исходная газопроницаемость пороха 4/1 гораздо выше, чем пороха ВУ, и, на первый взгляд, давление должно нарастать быстрее в более мелкодисперсной среде.

Помимо возбуждения НСД одним из перечисленных выше способов НСД может возникать в качестве одной из стадий перехода горения в де-

Параметры волны НСД в режиме перехода горения во взрыв

Порох	L_d , мм	D , м/с	P_{max} , ГПа	$\tau_{P_{max}}$, мкс	u_{max} , м/с	P_h , ГПа	$\tau_{u_{max}}$	τ_{Φ}	τ_{P-u}	$\tau_{\Phi D-P}$
							мкс			
4/1	240	1270	0,79	50						5
	220	1280	0,8	60						20
15/1	465		0,78	24	370(?)		7(?)	13	3	
	465	1000	0,48	15	410	0,36	12	13	4	11
	465	900	0,52	19	470	0,38	12	10	1	
	465	1220	0,50	12	410	0,44	12	15	0	12
	465	900			360	0,28	9	20		
	465	1010	0,45	21	500	0,43	13	11	1	
	465	970	0,42	23						11
	465	940	0,51	24	510	0,41	15	12	0	6
	465	970	0,47	27						3

тонацию. Поэтому представляет интерес сравнение профилей давления в волне НСД, инициируемой взрывом ЭВВ и получаемой при развитии процесса взрыва от горения. Для этого в оболочках с закрытым торцом, имеющих такие же диаметры, как и в случае взрывного инициирования, были изучены профили давления в волне НСД при поджигании заряда пороха 4/1 у закрытого торца с помощью воспламенителя МБ-2 и дополнительной навески измельченного дымного пороха массой 0,5 г. Такие же эксперименты проводились с использованием крупнозернового пироксилинового пороха 15/1, имеющего эффективный размер гранул 3,35 мм, что позволило изучить влияние размера гранул на профиль волны в этих условиях. Чтобы избежать перехода в нормальную детонацию, использовались заряды ограниченной длины: 280 мм для пороха 4/1 и 540 мм для 15/1. Предварительные опыты показали, что в случае пороха 4/1 конвективное горение переходит на режим НСД со скоростью 1200–1300 м/с на расстоянии 150–170 мм от места поджигания, а в случае пороха 15/1 на расстоянии 330–350 мм от воспламенителя скорость процесса достигает 800–900 м/с, причем процесс ускоряется, достигая к концу заряда скорости 1100 м/с. При этом от опыта к опыту в месте установки датчика скорость распространения несколько изменялась, поэтому измерение давления сопровождалось в каждом опыте измерением скорости распространения волны оптическими методами.

В опытах с порохом 4/1 датчик давления Т6000 располагался на расстоянии 40 мм от открытого (противоположного воспламенителю) торца заряда, а в опытах с порохом 15/1 — на расстоянии 75 мм, что обеспечивало его сохранность за счет быстрого прихода торцевой волны разрежения. В одном сечении с датчиком давления располагались световолокна для фиксации фронта свечения, а в опытах с порохом 15/1 — еще и электромагнитные датчики для измерения профиля $u(t)$ массовой скорости вещества. Учитывая полученные в работах [3–5] результаты об опережении газовыми продуктами начала движения конденсированной фазы в крупнозерновой нитроклечатке, датчик массовой скорости был изготовлен таким образом, чтобы не препятствовать газовому течению при неподвижной конденсированной фазе. Он представлял собой аналог стреленного датчика [6] с той разницей, что измерительный пятак диаметром 10–12 мм изготовлялся из плетеной латунной сетки с размером ячейки, равным эффективному размеру пор в насыпном заряде. Такой датчик позволяет измерять массовую скорость конденсированного ве-

щества, не изменяя газопроницаемости заряда и не нарушая его однородности. Для обеспечения возможности использования электромагнитного метода измерительная секция установки изготовлялась из нержавеющей стали, при этом напряженность магнитного поля измерялась перед опытом непосредственно в оболочке.

Полученные в опытах по переходу горения во взрыв данные представлены в табл. 2. Значения скорости процесса D относятся здесь к скорости НСД непосредственно в месте установки датчиков. В этой таблице указано также время от момента возникновения небольших пульсаций до начала подъема давления на профиле массовой скорости — τ_{ϕ} , а также время опережения начала записи датчика массовой скорости по сравнению с началом записи пьезодатчика — τ_{p-u} . При этом за начало записи в обоих случаях принималось время резкого нарастания сигнала. Остальные обозначения табл. 2 соответствуют обозначениям табл. 1.

Сравнение данных для пороха 4/1 при взрывном инициировании и в случае перехода горения во взрыв (табл. 1 и 2) показывает, что при близких скоростях НСД и близких значениях максимального давления во втором случае время нарастания давления до максимальных значений увеличивается на 20–30 мкс. При этом, как и на рис. 2, наблюдался промежуточный максимум давления через 15 мкс после начала подъема давления. В обоих опытах фронт свечения опережал фронт начала подъема давления.

Характерные записи давления, массовой скорости и начала свечения для пороха 15/1 показаны на рис. 3. Хотя в этих опытах несколько меньше скорость процесса и соответственно значения максимальных давлений, чем для пороха 4/1, сравнение профилей для этих порохов вполне правомерно. Прежде всего видно, что существенно уменьшается время достижения максимального давления P_{max} по сравнению с порохом 4/1. При этом время достижения максимальной массовой скорости $\tau_{u_{max}}$ сопоставимо со временем $\tau_{P_{max}}$. Разность во временах начала подъема давления на регистрируемых датчиках давления и массовой скорости τ_{p-u} незначительна и можно сделать вывод, что начало подъема давления совпадает по времени с началом роста массовой скорости. Существенное различие в записях датчика давления и электромагнитного датчика после достижения максимальных давлений связано, по-видимому, с тем, что электромагнитный датчик, двигаясь вместе с конденсированным веществом, разрушается. Пьезокварцевый же датчик, оставаясь на месте, прописывает в случае пороха 15/1 повторный подъем давления до 0,40–0,48 ГПа через 100–120 мкс и затем медленный спад до нулевой отметки в течение ~400 мкс.

В табл. 2 представлены также максимальные значения массовой скорости u_{max} и рассчитанные по ним максимальные гидродинамические давления в волне $P_h = \rho_0 u_{max} D$, где ρ_0 — начальная плотность заряда. Видно, что P_h всегда меньше; иногда значительно, чем P_{max} , измеренное пьезодатчиком. При рассмотрении этого факта нельзя исключить возможность неровной установки датчика или его искривления в процессе измерений (все это приводит только к уменьшению регистрируемых значений массовой скорости). Знаком (?) отмечены значения, полученные в опыте, где использовался датчик из тонкой сетки и возможен его разрыв. Во всех случаях на профиле массовой скорости зарегистрированы небольшие пульсации в течение времени τ_{ϕ} перед началом резкого увеличения массовой скорости. При этом времена τ_{ϕ} довольно значительны (10–20 мкс). Именно на фоне этих пульсаций начинает писать фотодиод, регистрирующий приход фронта свечения. Общим для всех опытов, включая взрывное инициирование, следует считать факт опережения фронтом свечения начала подъема давления или массовой скорости. Этот результат качественно со-

гласуется с данными работы [3], где при аналогичной постановке опытов на том же продукте на фоторегистраграммах отчетливо видны неподвижные частицы, начало движения которых отстает от фронта свечения. Полученные данные согласуются с представлениями об опережающей фильтрации в волне НСД, распространяющейся в низкоплотных зарядах [3, 4]. Поэтому обозначение τ_f введено, исходя из этих представлений, как время опережающей фильтрации.

Наличие участка повторного подъема давления после достижения максимума в порохе 15/1 удалось зарегистрировать, возможно, из-за относительно удаленного расположения датчика от торца заряда по сравнению со схемой опытов для пороха 4/1 в режиме перехода горения в детонацию. Этот факт указывает на возможность догорания вещества за волной первого максимума давления.

Таким образом, изучена структура волны низкоскоростной детонации в насыпных зарядах пироксилиновых порохов в условиях взрывного инициирования и ее возникновения из режима конвективного горения. Показано, что для рассмотренных систем время нарастания давления до максимального значения составляет десятки мкс. Уменьшение размера частиц при сопоставимых значениях скорости распространения НСД и максимального давления во всех случаях приводит к увеличению времени достижения максимального давления. Аналогично в случае перехода горения в низкоскоростную детонацию время достижения максимального давления больше, чем в случае взрывного инициирования НСД. Одновременные измерения давления (с помощью пьезодатчика) и массовой скорости (электромагнитным методом) показали, что датчики пишут практически синхронно, хотя пьезодавление и превышает уровень гидродинамического давления. Перед началом резкого подъема давления (или массовой скорости) отмечались довольно длительные пульсации на записях давления, которые можно связать с фильтрацией газовых продуктов через каркас твердых частиц. Во всех случаях фронт давления отстает от фронта свечения, что согласуется с представлениями об опережающей фильтрации газовых продуктов при распространении НСД в высокопористых зарядах зерновых порохов [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. Мартынюк В. Ф., Сулимов А. А., Чеканов С. В. и др. // Хим. физика. 1992. Т. 11. № 2. С. 299.
3. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Окунев В. А., Хасаинов Б. А. // Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Фундаментальные проблемы физики ударных волн». Т. 1. Ч. 1. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1987. С. 40.
4. Бойко М. М., Крамаренко В. Н., Соловьев В. С. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977. С. 58.
5. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А. // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10. № 6. С. 912.
6. Воробьев А. А., Трофимов В. С., Михайлюк К. К. и др. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. С. 106.

Институт химической физики
им. Н. Н. Семенова
Российской Академии наук
Москва

Поступила в редакцию
27.02.1991