

В настоящее время возможны две трактовки опытов:

1. Либо мы имеем дело с картиной, в принципе аналогичной той, которая наблюдалась ранее для газовой детонации [4], где в смеси  $C_2H_2 + 2,5 O_2$  минимальный масштаб был (вдоль фронта)  $10^{-2}$  см. Считая этот масштаб обратно пропорциональным плотности, получим  $10^{-5}$  см для конденсированных ВВ, т. е. даже меньше, чем в наших опытах.

Подобные неоднородности на детонационном фронте в конденсированных ВВ не могли быть выявлены фотохронографическим методом [7] из-за его малой разрешающей способности.

2. Либо неоднородности возникают в зоне химической реакции и вызывают неоднородность фронта ударной волны (в силу дозвуковой скорости в области между волной и зоной реакции). Но эта неоднородность фронта не оказывает заметного обратного влияния на реакцию.

Поступила в редакцию  
18/X 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Шелкин. ЖЭТФ, 1959, 36, 600.
2. В. В. Пухначев. Докл. АН СССР, 1963, 149, 798.
3. Р. М. Зайдель, Я. Б. Зельдович, ПМТФ, 1963, 6, 59.
4. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125, 1.
5. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1940, 10, 542.
6. А. Н. Дремин, Г. А. Ададулов, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1960, 133, 1372.
7. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Докл. АН СССР, 1961, 139, 137.
8. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1961, 138, 1333.
9. Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер и др. Докл. АН СССР, 1966, 171, 65.

УДК 662.215.1

### О ПЕРЕХОДЕ ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ВВ В ДЕТОНАЦИЮ

*А. И. Коротков, А. А. Сулимов, А. В. Обменин,  
В. Ф. Дубовицкий, А. И. Куркин*  
(Москва)

Переход горения конденсированных систем в детонацию сравнительно мало изучен. В случае газовых систем прогресс в этой области был достигнут благодаря работам прежде всего советских ученых [1—4], которые внесли существенный вклад в понимание данного явления. Проведение экспериментов по изучению перехода горения в детонацию конденсированных систем вследствие разрушающего действия возникающих при этом высоких давлений связано со значительно большими трудностями, чем аналогичные исследования в газах.

Первые опыты, поставленные с целью выяснения механизма возникновения детонации в конденсированных системах, были выполнены в работах [5, 6]. Значительно позже были опубликованы работы, в ко-

торых изучался переход горения в детонацию литых [7, 8, 11] и пористых ВВ низкой плотности [9, 10]. В этих работах выдвигается точка зрения, согласно которой детонация в твердых ВВ при поджигании, так же как и в газах, осуществляется ударной волной, образующейся вследствие сложения волн сжатия в веществе, инициируемых ускоряющимся фронтом горения. Подтверждением указанной точки зрения является возникновение детонации впереди фронта горения [9, 10], а также установленное соответствие между теоретическим и экспериментально измеренным значением преддетонационного участка [7]. Большой и интересный материал, касающийся развития взрыва в тонких слоях ВВ, содержится в работах [12, 13].

В ряде работ [8, 10—13] было отмечено, что возникновению детонации может предшествовать режим, распространяющийся с постоянной скоростью порядка 1—2,5 км/сек.

Для возбуждения детонации при поджигании необходимо обеспечить прежде всего достаточно быстрое нарастание давления во времени. В случае пористых ВВ это может быть достигнуто вследствие проникновения газообразных продуктов горения в поры (объем) ВВ, что приводит к нарушению послыного горения. При этом передача тепла теплопроводностью заменяется конвективной. Проникновение продуктов горения в поры является начальной и основной причиной ускорения горения пористых систем. Работы [14—17] позволили выявить влияние основных физических факторов на нарушение послыного горения. В сплошных ВВ быстрое нарастание давления принципиально может быть достигнуто при сохранении послыного режима горения, если поджигание осуществляется в прочной оболочке и зависимость скорости горения от давления является линейной. Однако в настоящее время нет твердой уверенности, что горение сплошных ВВ из числа исследованных являлось послыным и конвективная теплопередача отсутствовала.

В данной работе излагаются некоторые результаты изучения перехода горения в детонацию порошкообразных ВВ, полученные в широком интервале изменения пористости. Необходимо отметить, что эта работа является непосредственным продолжением исследований по переходу горения во взрыв [14], проводившихся под руководством А. Ф. Беляева.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исследованных систем были выбраны: однородное ВВ — тэн<sup>1</sup> и смесевые ВВ — стехиометрические смеси перхлората аммония с инертным (полистирол) и активным (тротил) горючим. Диаметр исследуемой системы превышал критический диаметр детонации и составлял 5 мм для тэна и 10 мм для смесевых ВВ.

Опыты проводились главным образом в стальных и латунных оболочках. Заряды различной пористости получали методом порционного прессования ВВ в оболочку. Высота каждой запрессовки не превышала половины диаметра. Данный метод позволял получать заряды с открытой (газопроницаемой) и постоянной по длине пористостью.

Параметром, характеризующим склонность ВВ к возникновению детонации при поджигании, является длина преддетонационного участка ( $L$ ). Для ее определения применялся, как правило, простой в испол-

<sup>1</sup> На примере тэна наиболее подробно исследовано влияние основных физических факторов на начальную стадию перехода — стадию нарушения послыного горения [14].

нении метод, основанный на анализе деформированного после опыта канала толстостенной металлической оболочки<sup>1</sup>. С этой целью после проведения опыта оболочка разрезалась вдоль оси канала и длина преддетонационного участка определялась как расстояние от начала пористого ВВ, которое практически совпадало с местом возникновения конвективного горения, до точки возникновения детонации. Такой метод определения длины преддетонационного участка является достаточно надежным, так как было установлено, что место возбуждения детонации характеризуется в большинстве случаев достаточно четким отпечатком на внутренней поверхности канала.

Изучение перехода горения в детонацию при поджигании у открытого конца осуществлялось следующим образом. Воспламенение пористого ВВ производилось так, что стадия послыного горения ВВ отсутствовала и сразу же возникал режим конвективного горения. Опыты проводились по схеме «замурованного заряда» [14]. Исследуемое пористое ВВ поджигалось через слой сплошного (газонепроницаемого) вещества при давлении  $p$ , превышающем критическое давление срыва  $p_c$  послыного горения ( $p \approx 1,2 p_c$ ). Сжигание заряда осуществлялось в бомбе с большим свободным объемом, давление в которой создавалось предварительным сгоранием вспомогательного заряда.

Поджигание пористого ВВ у закрытого конца производилось никромовой спиралькой, накаливаемой током, или стандартным воспламенителем МБ-2, что исключало возмущающее действие воспламенителя; при этом сохранялась герметичность оболочки. Во всех опытах длина заряда существенно превышала значение преддетонационного участка.

Другим направлением работы являлось изучение характера распространения процесса в преддетонационной области вплоть до возникновения детонации.

В работе использован метод фотографической регистрации, преимуществом которого является возможность непрерывного наблюдения за ходом процесса. Оболочка (рис. 1) состояла из металлического вкладыша 1 и цилиндра 2. Регистрация процесса осуществлялась через прозрачный клин 3; цилиндр 2 выполнял роль элемента, удерживающего клин. Навеска ВВ 4 помещалась между вкладышем и клином. Конструкция оболочки позволила получить воспро-

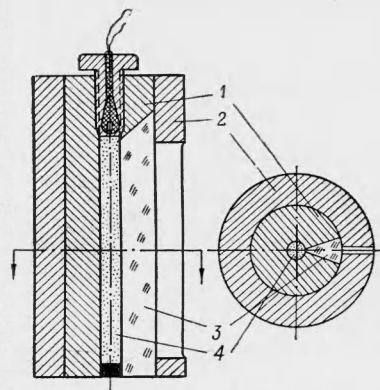


Рис. 1. Схема оболочки, которая использовалась при фотографической регистрации процесса перехода горения в детонацию.

изводимый переход горения в детонацию малопористых зарядов ВВ.

Переход горения в детонацию зарядов тэна высокой пористости изучался также в прозрачных плексигласовых оболочках с толщиной стенки 45 мм.

<sup>1</sup> В подавляющем большинстве опытов величина наружного диаметра металлической оболочки была такова, что целостность оболочки не нарушалась.

Во всех опытах с фотографической регистрацией процесса поджигание ВВ производилось у закрытого конца. Регистрация перехода горения в детонацию осуществлялась ждущим фоторегистром ЖФР-2.

Необходимо отметить, что в случае твердых (непрозрачных) ВВ оптический метод позволяет надежно фиксировать процессы, распространяющиеся по боковой поверхности заряда.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 представлены схематическое изображение (а) и фотографии (б, в) деформированного после опыта канала толстостенной оболочки, где А — начало возникновения конвективного горения, АД — преддетонационный участок, ДЕ — участок детонации.

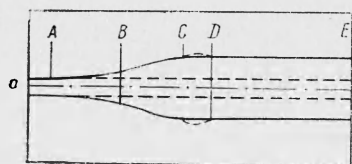
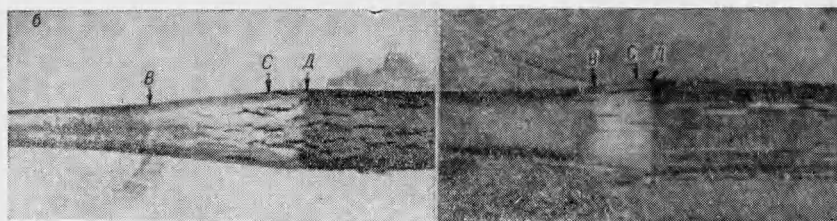


Рис. 2. Схематическое изображение (а) и фотографии (б, в) деформированного после опыта канала металлической оболочки.



В преддетонационной области диаметр канала плавно увеличивается и после некоторого расстояния АС принимает постоянное значение, которое далее практически не меняется. Было установлено, что одновременно с изменением формы канала происходит изменение цвета его внутренней поверхности. За участком выхода раздутия канала на постоянное значение (С) наблюдается четкая граница (D), разделяющая различные по цвету области: светлую зону ВД, расположенную в преддетонационной области, и темную ДЕ, соответствующую участку детонации. Сопоставление получаемых отпечатков с оптической записью позволило установить, что граница D является местом возникновения детонации. Изменение цвета связано, по-видимому, с различным характером деформирования оболочки в преддетонационной области и на участке детонации, а также с различием в составе продуктов взрыва.

Необходимо отметить, что в ряде случаев диаметр деформированного канала на участке CD светлой зоны несколько превышает диаметр канала на участке детонации ДЕ (на рис. 2, а показано пунктиром). Кроме того, место выхода раздутия канала на постоянное значение не соответствует, как правило, месту возникновения детонации ( $AC < AD$ ) (см. рис. 2, б). Поэтому определение длины преддетонационного участка L по выходу раздутия на постоянное значение приводит к занижению истинного значения L.

Отмеченные выше характерные детали, касающиеся изменения формы и цвета деформированного канала, особенно отчетливо фикси-

руются в случае тэна. Для смесевых ВВ изменение цвета выражено слабее.

**Влияние параметров заряда.** На рис. 3 представлены зависимости длины преддетонационного участка от пористости для тэна. Величина пористости<sup>1</sup> изменялась в широком интервале — от 0,7 до 0,4. Приведенные данные соответствуют поджиганию у открытого конца и получены в латунной оболочке с толщиной стенки 20 мм. Следует отметить наличие разброса в величинах преддетонационного участка, особенно

в случае мелкокристаллического тэна. Это потребовало проведения большого числа опытов, на основе усреднения результатов которых построены кривые рис. 3. Из приведенных данных следует, что функция  $L(m)$  имеет минимум<sup>2</sup>, местоположение которого с увеличением размера частиц смещается в область более низких значений пористости. При высоких значениях пористости ( $m=0,5$ ) мелкокристаллический тэн переходит в детонацию легче, чем крупнокристаллический. При низких значениях пористости наблюдается обратная картина. Интересно отметить, что тэн с размером частиц 500 мкм способен переходить в детонацию при весьма низкой пористости ( $\sim 0,05$ ), при этом преддетонационный участок не превышает 50 мм. Дальнейшее весьма незначительное уменьшение пористости вызывает резкое увеличение длины преддетонационного участка. Величина  $m$ , начиная с которой наблюдается существенное возрастание  $L$ , уменьшается от 0,1 до 0,05 с ростом частиц от 20 до 500 мкм и соответствует приблизительно одинаковой начальной газопроницаемости ВВ, равной  $10^{-4}$  дарси [14].

Были проведены также опыты с тэном при  $r \approx 120$  мкм. Показано, что кривые  $L(m)$  для частиц с начальным размером 120 и 500 мкм практически совпадают, за исключением небольшого различия при низких и высоких значениях пористости. Данное обстоятельство указывает на то, что получаемые пористые структуры близки между собой, что обусловлено разрушением частиц в процессе прессования.

В таблице представлены усредненные по нескольким опытам результаты измерения длины преддетонационного участка (в мм) для смесевых ВВ (размер частиц компонентов  $r \approx 15$  мкм) при поджигании у закрытого конца. Опыты проводились в стальных трубах с толщиной стенки 15—20 мм. Для сравнения здесь же приведены данные для тэна

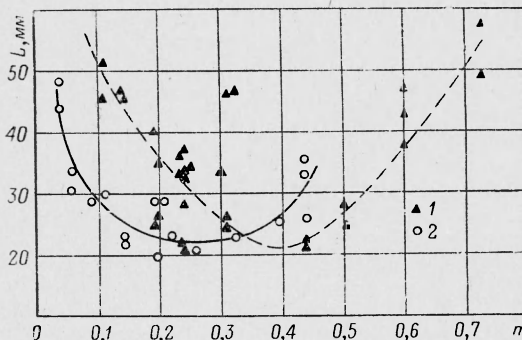


Рис. 3. Зависимость длины преддетонационного участка ( $L$ ) от пористости ( $m$ ):  
1 —  $r \approx 20$  мкм (мелкокристаллический тэн); 2 —  $r \approx 500$  мкм.

<sup>1</sup> Под пористостью  $m$  понимается отношение объема пор  $V_{п}$  к полному объему заряда  $V_3$ :  $m = V_{п}/V_3 = 1 - \rho/\rho_{\max}$ , где  $\rho_{\max}$  — максимально возможная плотность ВВ (плотность монокристалла);  $\rho$  — плотность заряда.

<sup>2</sup> Существование минимума в значениях  $L$  при изменении пористости было установлено для октогена в работе [9]. Полученные данные [9] построены в координатах  $L=f(1/t)$ , где величина  $(1/t)$  характеризует газопроницаемость ВВ и целиком зависит от условий ее определения. Отсутствие связи величины  $(1/t)$  с пористостью и размером частиц ВВ не позволяет сравнить полученные нами результаты с данными работы [9].

близкой дисперсности ( $r \approx 20 \text{ мк}$ ). Из таблицы следует, что характер зависимости длины преддетонационного участка от пористости различается у исследованных смесевых и однородного ВВ. Для смесевых ВВ наблюдается увеличение длины преддетонационного участка с уменьшением пористости в рассмотренном интервале изменения последней.

Взрывчатое вещество	Пористость		
	0,6	0,45	0,25
Стехиометрическая смесь перхлората аммония с полистиролом	85	140	> 240
Стехиометрическая смесь перхлората аммония с тротилом	60	120	> 240
Тэн*	40	20	30

\*В случае тэна значения  $L$  при поджигании у открытого и закрытого конца практически совпадают.

Минимум на кривой  $L(m)$ , который, по-видимому, характерен для однородных ВВ, отсутствует. Если при высоких значениях пористости ( $m=0,6$ ) различие в величинах преддетонационного участка для смесевых ВВ и мощного ВВ (тэна) является незначительным, то при средних значениях пористости оно становится весьма существенным, особенно для смеси с инертным горючим. При этом значение  $L$  для смесевых ВВ крайне велико. Большое значение преддетонационных участков и критических диаметров детонации [19] для таких систем при низких  $m$  подтверждает правильность сделанного в свое время предположения о малой вероятности возникновения детонации при их горении.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Характерные фотографии процесса перехода горения тэна в детонацию представлены на рис. 4. В начальной стадии перехода возникшее конвективное горение характеризуется наличием неровного «рваного» фронта, и распространяется со скоростями до нескольких сотен метров в секунду. Как отмечалось ранее [14], такая форма записи обусловлена тем, что фронт конвективного горения не является плоским и горение развивается по отдельным (крупным) порам. Однако по мере развития конвективного горения наблюдается уменьшение пульсаций на фронте (см. рис. 4, б, г). Было установлено, что возникновению детонации предшествует, как правило, ускоренное развитие процесса в преддетонационном периоде. Величина ускорения возрастает по мере увеличения плотности ВВ и прочности оболочки (опыты проводились в плексигласовом блоке (см. рис. 4, а) и в металлических оболочках с прозрачным клином (см. рис. 4, б, в, г)).

Принципиально важным с точки зрения механизма перехода горения в детонацию является установление места возникновения детонации. Оптические исследования перехода горения тэна в детонацию, проведенные в широком интервале изменения пористости, показали, что в отдельных опытах (при высоких значениях  $m$ ) удается наблюдать возникновение детонации впереди фронта горения — во взрывчатом веществе (см. рис. 4, а). В большинстве опытов детонационная волна

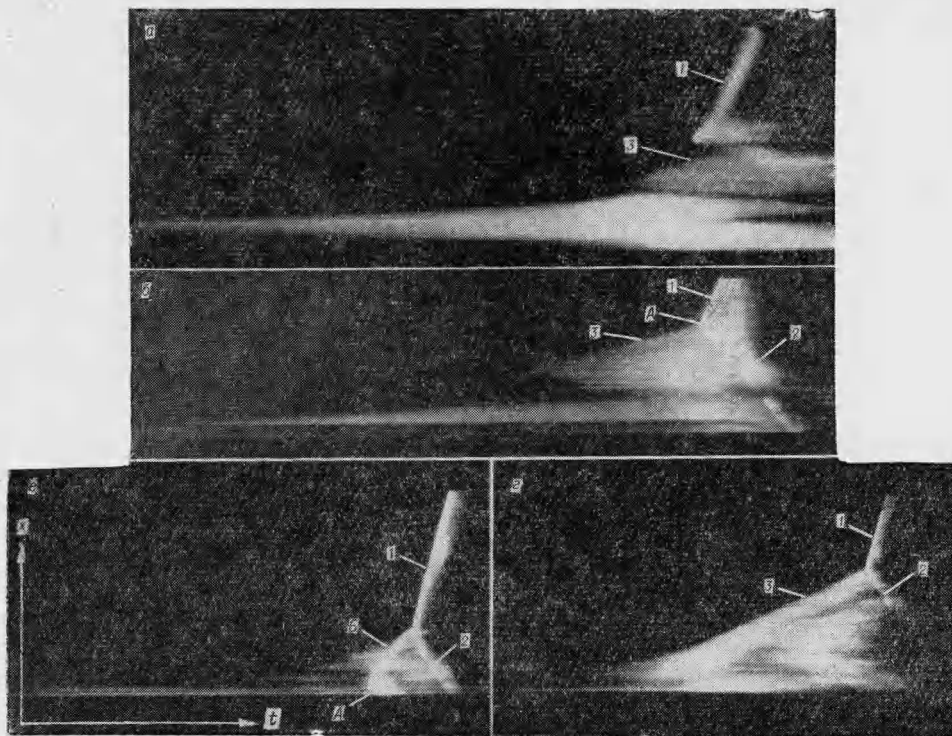


Рис. 4. Фотографии перехода горения тэна в детонацию.

1—детонационная волна ( $D$ ); 2—детонационная волна в продуктах детонации ( $R$ ); 3—процесс, предшествующий детонации ( $u$ ): а —  $D=4700$  м/сек,  $u=750$  м/сек ( $m=0,44$ ;  $r \sim 800$  мкм); б —  $D=4300$  м/сек;  $R=2800$  м/сек;  $u=800$  м/сек ( $m=0,6$ ;  $r=20$  мкм); в —  $D=7800$  м/сек;  $R=3200$  м/сек; з —  $D=7800$  м/сек;  $R=3500$  м/сек,  $u=1100$  м/сек ( $m=0,13$ ;  $r \approx 20$  мкм).

формируется непосредственно вблизи ускоряющегося фронта горения. При этом в месте возникновения детонации в ряде случаев наблюдается увеличение свечения в форме «вспышки» (см. рис. 4, б), связанное, по-видимому, с развитием локального взрыва. Анализ оптической записи и формы канала металлической оболочки показывает, что местоположению «вспышки» соответствует интенсивное деформирование канала (область  $CD$  на рис. 2, а). Локальный взрыв приводит к образованию детонационной волны и движущейся в обратном направлении ретонационной волны. Следует отметить, что взрыв тэна, приводящий к формированию детонационной волны, наблюдался также в иных условиях проведения эксперимента [13].

Данное обстоятельство указывает на то, что возникновение локальных взрывов имеет общий характер и является существенным элементом процесса перехода горения в детонацию мощных ВВ. Установлено, что при переходе горения в детонацию в тэне низкой пористости локальные взрывы происходят не только непосредственно вблизи фронта горения, но и на значительном расстоянии (около  $5d_0$ ) за фронтом — в горячей среде (см. рис. 4, в). Взрыв (А), возникший в зоне конвективного горения с характерным «рваным» фронтом, образует ударную (возможно детонационную) волну (Б), которая, распространяясь со скоростью 2800 м/сек, догоняет фронт горения и после незначительной ( $\sim 2$  мсек) задержки вызывает детонацию ВВ ( $D=7800$  м/сек). Воз-

никновение локальных взрывов является одной из причин разброса в значениях длины преддетонационного участка, которая, в частности, существенно сокращается, когда взрыв происходит в горячей среде. Необходимо отметить, что возникновение детонации в горячей среде наблюдал ранее Патри [20] при изучении перехода горения в детонацию инициирующего ВВ — гремучей ртути.

Как отмечалось выше, возбуждению детонации предшествует обычно ускоренное развитие процесса в преддетонационном периоде. Вместе с тем в ряде опытов ускоряющееся горение переходило в режим с достаточно ровным гладким фронтом, который распространялся с высокой и почти постоянной по длине скоростью и в определенных условиях переходил в детонацию (см. рис. 4, *г*). Средняя величина скорости указанного режима для тэна в зависимости от параметров заряда и свойств оболочки изменяется от 700—1200 м/сек (в плексигласовой оболочке) до 3200 м/сек (в стальной оболочке).

Длина участка, на котором наблюдается почти постоянное значение скорости, может быть весьма значительной — до 30 диаметров заряда, если использовать малопрочные (плексигласовые) оболочки или заряды с весьма низкой пористостью ( $\approx 0,02—0,03$ ), но в прочных металлических оболочках. Опыты, проведенные с достаточно длинными (до 150 мм) зарядами тэна в плексигласовых оболочках, показывают, что скорость процесса не является постоянной и слабо увеличивается по длине, при этом переход горения в детонацию отсутствует. Однако если увеличить длину заряда до 300 мм, то в тех же условиях возникает переход режима со слабо возрастающей по длине скоростью в детонацию. Не останавливаясь подробно на закономерностях распространения режима, предшествующего детонации, отметим, что он представляет собой нестационарный переходный режим, скорость которого в силу ряда факторов может изменяться весьма незначительно по длине. Имеющиеся данные дают основание полагать, что изменение скорости по длине заряда определяется характером деформации оболочки и изменением величины давления в зоне реакции во времени.

От места возникновения детонации, как правило, в обратном направлении распространяется ретонационная волна (см. рис. 4, *б*, *в*, *г*).

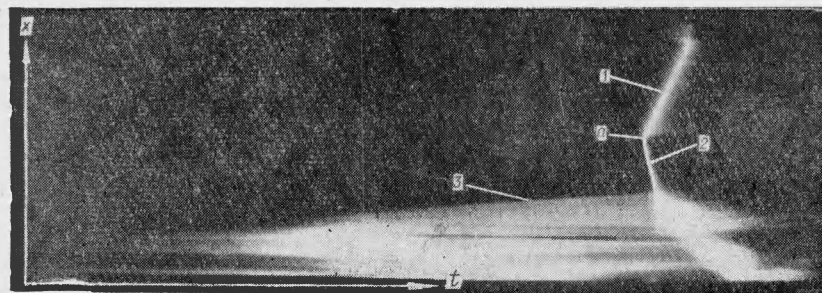


Рис. 5. Искусственное возбуждение детонации взрывом азида свинца (*a*) ( $m=0,44$ ,  $r \approx 500$  мкм).  
1 — детонационная волна,  $D=4700$  м/сек; 2 — ретонационная волна в веществе,  $R'=7800$  м/сек;  
3 — процесс, предшествующий детонации,  $u=250$  м/сек.

В том случае, если детонация возникает впереди фронта горения, ретонационная волна движется первоначально по сжатому непрореагировавшему взрывчатому веществу и затем переходит в продукты детонации, изменяя свою скорость. Скорость движения ретонационной волны, позволяет судить об изменении состояния вещества, которое происходит под действием волн сжатия, распространяющихся в твердом ВВ



впереди фронта горения. Поскольку детонация возникает в основном вблизи фронта горения и ретонационная волна во взрывчатом веществе на значительном участке наблюдается крайне редко, образование ретонационной волны вызывалось искусственно. С этой целью в исследуемый заряд ВВ в место возникновения детонации помещалось небольшое количество (0,1 г) слегка подпрессованного азида свинца<sup>1</sup>.

Волны сжатия, движущиеся впереди фронта горения, вызывали взрыв азид свинца, который приводил к детонации ВВ. Оптическая запись одного из таких опытов представлена на рис. 5 (условия данного опыта полностью соответствуют условиям опыта, оптическая запись которого показана на рис. 4, а). Эти опыты позволили установить, что скорость ретонационной волны в ВВ существенно превышает скорость детонационной волны. Для конкретного опыта (рис. 5) скорость детонационной волны (4700 м/сек) соответствует начальной плотности ВВ  $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ , практически постоянная скорость ретонационной волны (7800 м/сек) — плотности  $\rho \approx 1,55 \text{ г/см}^3$ . Данное обстоятельство прямо указывает на значительную подпрессовку ВВ впереди фронта горения под действием волн сжатия<sup>2</sup>. Эффект подпрессовки ВВ при переходе горения в детонацию был обнаружен в [26] на основе анализа оставшихся после опыта остатков ВВ.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Переход горения в детонацию пористых ВВ включает следующие стадии: 1) нарушение (срыв) послойного горения и возникновение конвективного горения; 2) преддетонационное развитие горения, приводящее к образованию ударной волны критической интенсивности; 3) ударное инициирование и формирование детонационной волны.

Нарушение послойного горения пористых ВВ в настоящее время исследовано весьма обстоятельно, что привело к созданию физически ясной и обоснованной картины первой стадии перехода. Проникновение горения в поры (объем) ВВ, обусловленное конвективной теплопередачей, является основной причиной ускорения горения пористых взрывчатых систем. Возникшее конвективное горение способно распространяться со скоростями порядка сотен метров в секунду<sup>3</sup>. Возможность проникновения горения в пору с такими высокими скоростями была установлена прямыми опытами, проведенными с единичной порой [19]. При этом в поре реализуются давления до нескольких килобар.

Не вызывает сомнения, что поджигание ВВ конвективным потоком газа является основной формой возбуждения химической реакции в начальной стадии преддетонационного развития процесса. Однако не ясно, остается ли эта форма основной (ведущей) вплоть до возникновения детонации, так как по мере возрастания скорости конвективного горения увеличивается амплитуда и крутизна распространяющихся

<sup>1</sup> Азид свинца использовался в качестве индикатора, позволяющего фиксировать распространение волн сжатия, так как по данным [21] в слегка подпрессованном состоянии он детонирует под действием ударной волны крайне низкой интенсивности — порядка нескольких десятков бар.

<sup>2</sup> Подпрессовка ВВ в данных условиях связана, по-видимому, с дроблением основной части кристаллов и ее перемещением в волне сжатия, а также с улучшением контакта между кристаллами. Значительной подпрессовкой ВВ объясняется, на наш взгляд, отсутствие ретонационной волны в ВВ при естественном возникновении детонации (см. рис. 4, а).

<sup>3</sup> Следует отметить, что, согласно [22, 23], поджигание ВВ продуктами взрыва является основной формой возбуждения химической реакции при распространении детонации в порошкообразных ВВ.

впереди волн сжатия. Поэтому не исключено, что на определенной стадии ускорения процесса волны сжатия ВВ могут играть существенную роль. В этой связи заслуживает внимание то обстоятельство, что по мере распространения процесса фронт горения становится гладким (см. рис. 4, б, з).

Как отмечалось, величина ускорения может быть незначительной. Можно предположить, что переход режима со слабо возрастающей по длине скоростью в детонацию происходит, когда заканчивается трансформация образующейся в результате сложения основной волны сжатия с первоначально пологим фронтом в ударную волну критической интенсивности. На это указывает тот факт, что детонация продолжает фронт горения (см. рис. 4, з).

Возникновение детонации впереди ускоряющегося фронта горения (см. рис. 4, а), а также подпрессовка ВВ в переходной области (см. рис. 5) подтверждают высказанную в работах [7—11] точку зрения, что основной причиной возникновения детонации является ударная волна, которая образуется в результате сложения волн сжатия, инициируемых фронтом горения, т. е. по классическому «поршневому» механизму. Данный механизм неоднократно обсуждался в литературе [7, 9, 10]. С точки зрения этого механизма удается объяснить характер изменения длины преддетонационного участка  $L$  от пористости  $m$ . Основным фактором, определяющим образование ударной волны, при поджигании ВВ на одном из концов трубы является быстрого изменения во времени давления  $dp/dt$  в зоне горения (форма кривой  $p-t$ ). В случае пористых систем характер изменения  $dp/dt$  определяется удельной поверхностью горения (газопроницаемостью, распределением пор по размеру, сжимаемостью ВВ) и зависимостью скорости горения ВВ от давления. Предполагается, что после поджигания горение отдельных элементов ВВ происходит с поверхности и является послойным.

Критическое давление инициирования детонации монотонно увеличивается с уменьшением пористости, газопроницаемость ВВ также монотонно уменьшается [14]. Кроме того, скорость послойного горения однородных ВВ линейно растет с давлением [24]. Поэтому наблюдаемое для однородных ВВ нарушение монотонной зависимости  $L(m)$  свидетельствует о том, что значению пористости, при которой имеет место минимум  $L(m)$ , соответствует максимальная удельная поверхность пор, охваченная горением, обеспечивающая наиболее быстрое возрастание давления во времени. Отсутствие минимума  $L(m)$  в случае исследованных смесевых ВВ связано, возможно, с тем, что их скорость послойного горения при давлении порядка нескольких килобар не зависит от давления [24]. Данное обстоятельство является одним из факторов, позволяющих объяснить также высокие значения длины преддетонационного участка смесевых ВВ. Необходимо учитывать еще и то, что с уменьшением пористости критический диаметр детонации уменьшается для однородных ВВ [25] и возрастает для смесевых ВВ [19].

Поэтому при медленном нарастании давления в зоне горения смесевых ВВ подпрессовка взрывчатого вещества на значительном участке по длине заряда может привести к недетонационности системы. В этой связи следует подчеркнуть, что величина критического диаметра детонации смесевых ВВ резко возрастает с уменьшением пористости [19].

Вместе с тем полученные оптические записи перехода горения в детонацию указывают на то, что «поршневой» механизм не является единственным. Причиной возникновения ударной волны, способной возбудить детонацию в мощных ВВ (тэн), может явиться взрыв огра-

ниченного объема ВВ. Поскольку взрывы чаще происходят вблизи ускоряющегося фронта горения (см. рис. 4, б), то есть основания полагать, что в этой области реализуются наиболее благоприятные условия для их возникновения. По-видимому, наблюдаемые взрывы есть результат мгновенного воспламенения нагретого вследствие сжатия объема ВВ. Причиной разогрева может явиться трение между частицами при перемещении ВВ и сжатие газовых включений в волне сжатия. Кроме того, в момент схлопывания пор в них возможно попадание горячих продуктов горения.

Как следует из опыта, условия, необходимые для возникновения взрыва, могут реализоваться в области, охваченной горением (см. рис. 4, в). При этом возможность образования отдельных, способных к взрыву объемов несгоревшего или частично прореагировавшего ВВ, представляется совершенно естественной, так как фронт конвективного горения не является плоским и сильно искривлен.

Необходимо отметить, что в случае газов детонационная волна также может образовываться в результате локального взрыва отдельных объемов сжатого непрореагировавшего газа в турбулентной зоне пламени [3, 18]. В заключение следует подчеркнуть, что имеющиеся в литературе и полученные в данной работе результаты не охватывают всего многообразия параметров, которые определяют процесс перехода горения в детонацию, и дальнейшие исследования в этом направлении необходимы.

Поступила в редакцию  
5/II 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелкин. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М., Воениздат, 1949.
2. С. М. Когарко, А. С. Новиков. ЖЭТФ, 1954, 26, 4.
3. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М., Физматгиз, 1963.
4. В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко. ПМТФ, 1960, 3.
5. К. К. Андреев. Сборник статей по теории ВВ. М., Оборонгиз, 1940.
6. А. Ф. Беляев. Докл. АН СССР, 1939, 24; Докт. дисс. «Механизм горения ВВ». Москва, 1946.
7. A. Masek. J. Chem. Phys., 1959, 31, 1.
8. R. Cipson and A. Masek. Eleventh Symposium (International) on Combustion, 1966.
9. N. Griffiths and J. M. Groosock. J. Chem. Soc., 1960, November.
10. А. В. Соколов, Ю. Н. Аксенов. Сб. «Взрывное дело», № 52/9, 1963.
11. D. Price and J. F. Wehner. Combustion and Flame, 1965, IX, 1.
12. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.
13. В. К. Боболев, А. В. Дубовик, ПМТФ, 1965, 2.
14. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ПМТФ, 1963, 5; ФГВ, 1966, 3.
15. В. К. Боболев, С. В. Чуйко, Л. Ф. Чекирда. ПМТФ, 1963, 4.
16. К. К. Андреев, В. В. Горбунов, ЖФХ, 1963, 37, 9.
17. T. W. Taylor. Combustion and Flame, 1962, 6, 2.
18. A. K. Orpenheim, N. Manson, H. Wagner. AIAA J, 1963, 1, 10.
19. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
20. М. Патри. Горение и детонация ВВ. М.—Л., Оборонгиз, 1938.
21. А. Ф. Беляев, М. А. Садовский, И. И. Тамм. ПМТФ, 1960, 1.
22. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1939, 24.
23. Ю. Б. Харитон. Сб. «Вопросы теории ВВ». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
24. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ЖФХ, 1963, 37.
25. В. К. Боболев. Докл. АН СССР, 1947, 57.
26. А. В. Соколов, И. В. Мильчаков, Л. В. Дубнов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, 1967.