

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ В ЗАРЯДАХ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ

В. А. Фотеевков, А. И. Коротков, Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов  
(Москва)

Конвективное горение является основной стадией перехода горения пористых ВВ в детонацию, который осуществляется по схеме: нормальное горение → конвективное горение → конвективное горение с волной уплотнения → низкоскоростная детонация → нормальная высокоскоростная детонация.

В зависимости от характера изменения скорости конвективного горения  $w$  и давления во фронте пламени  $p_f$  по длине заряда можно выделить следующие режимы конвективного горения: 1) нестационарное ускоряющееся, когда возрастание  $w$  сопровождается увеличением  $p_f$ ; 2) нестационарное стабилизированное, когда  $w$  постоянна, а  $p_f$  увеличивается; 3) квазистационарное пульсирующее, когда  $w$  и  $p_f$  сохраняются в среднем постоянными по длине заряда.

Результаты изучения режимов 1 и 3 изложены в работах [1—4]. Настоящая работа посвящена анализу нестационарного стабилизированного конвективного горения (режим 2), который ранее систематически не исследовался.

На примере насыпных зарядов дымного пороха и тэна, помещенных в прочные цилиндрические оболочки, при различных условиях горения (полузамкнутый и замкнутый объем) и уровнях скорости пламени (10—20 и 250—270 м/с) экспериментально показано, что постоянной в среднем скорости пламени соответствует возрастающее давление во фронте пламени. Механизм, обеспечивающий постоянство скорости пламени, оказывается различным: для процесса, имеющего скорость 10—20 м/с (полузамкнутый объем), стабилизация определяется влиянием закрытого торца заряда [1]; для процесса, имеющего скорость 250—270 м/с (замкнутый объем), стабилизация, по-видимому, происходит за счет эффективного уплотнения вещества перед фронтом пламени. Полученные результаты находятся в согласии с основными выводами теории [4].

Исследуемое вещество (дымный порох ДРП-3, фракция 400—630 мкм или в некоторых опытах тэн, размер частиц 500 мкм) засыпалось в прочную металлическую оболочку. Длина оболочки варьировалась от 200 до 500 мм, а внутренний диаметр составлял 3—5 мм. В стенках оболочки имелись отверстия для пьезодатчиков давления и фотодиодов, размещенных по длине оболочки, а также продольная щель с окном для оптических наблюдений.

Рассмотрим основные результаты опытов для случая полузамкнутого объема при поджигании спиралью от открытого конца. Ниже приведены распределения скорости конвективного горения и давления во фронте пламени по длине заряда  $L$  на участке стабилизированного распространения (дымный порох, диаметр заряда 3,4 мм, полная длина заряда  $L_0 = 450$  мм):

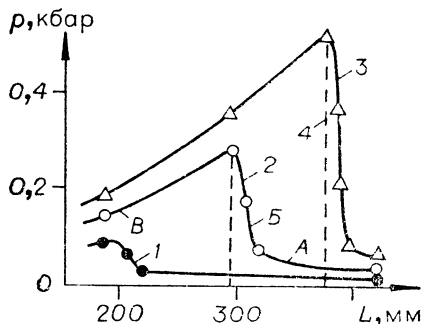
$L$ , мм	190	250	300	350	400	420
$w$ , м/с	15,5	16,0	15,0	15,0	15,5	16,0
$p_f$ , атм	130	220	320	410	510	580

Видно, что на участке от 190 до 420 мм скорость распространения пламени постоянна, а давление во фронте пламени интенсивно возрастает.

Измерения давления, выполненные в различных точках по длине заряда, позволили построить пространственные профили давления в различные моменты времени. Одновременно с помощью фотодиодов, установленных в одном сечении с датчиками давления, записи давления были синхронизованы с оптической картиной процесса.

Рис. 1. Пространственные профили давления в различные моменты времени от начала выхода процесса на постоянную скорость. Дымный порох, полузамкнутый объем, заряд диаметром 3,4 и длиной 450 мм,  $w = 15$  м/с.

А — участок медленного изменения давления; Б — крутой фронт; В — участок спада давления;  $t$  (мс): 1—1,3, 2—8,0, 3—14,0; 4 — фронт пламени.



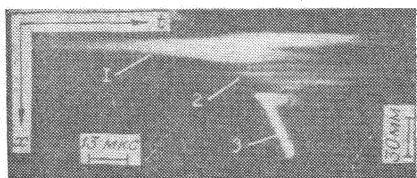


Рис. 2. Фоторегистрация перехода горения в детонацию в тэне.

1 — конвективное горение,  $w = 250$  м/с; 2 — детонация с малой скоростью; 3 — нормальная детонация.

Это позволило связать профили давления с положением фронта свечения (пламени). Профили давления (рис. 1) имеют максимум, который приблизительно соответствует положению фронта пламени. Давление во фронте пламени возрастает пропорционально времени, несмотря на постоянство скорости пламени.

Специальными опытами доказано, что постоянство скорости конвективного горения обусловлено влиянием закрытого торца заряда. Для этого в закрытый торец заряда устанавливался датчик давления повышенной чувствительности. Оказалось, что момент возникновения стабилизированного режима горения совпадает с выходом волны фильтрации на закрытый торец заряда.

Рассмотрим результаты опытов для случая полностью замкнутого объема. Использовались оболочки внутренним диаметром 5 и длиной 200 мм. Порох (или ВВ) поджигали капсюлем-воспламенителем через заглушку. В опытах с тэном насыпной плотности показано [1], что в этих условиях горение распространяется с высокими скоростями и давлениями, переходя на базе около 30 мм в детонацию. Типичная фоторегистрограмма процесса представлена на рис. 2. Видно, что на участке, предшествующем детонации, пламя распространяется с примерно постоянной скоростью, равной 250 м/с. Опытами с небольшими навесками азидо свинца, которые вводились в заряд тэна и служили индикаторами давления, показано, что высокое давление, возникающее на стадии конвективного горения, вызывает уплотнение тэна перед фронтом пламени от 1 до 1,5 г/см<sup>3</sup>.

Использование дымного пороха, который обладает значительно более протяженным участком конвективного горения по сравнению со вторичными ВВ, позволило детально исследовать стадию конвективного горения, стабилизированного волной уплотнения. Оптические регистрограммы, полученные для дымного пороха, свидетельствуют о том, что в этих условиях горение быстро ускоряется и на расстоянии около 60 мм от места поджигания выходит на постоянную скорость, равную 270 м/с.

На рис. 3 представлены профили давления для различных моментов времени и положение фронта пламени, полученные из совместной обработки записей давления в нескольких точках по длине заряда и фоторегистрограмм процесса. Видно, что профили давления имеют вид ступенек с довольно крутым передним фронтом. Фронт свечения (фронт пламени) несколько отстает от переднего фронта волны газового давления (приблизительно на 10—20 мм). Позади фронта пламени давление в каждый момент времени равномерно распределено по длине, однако его уровень и давление во фронте пламени растут с течением времени, несмотря на постоянство скорости конвективного горения.

Специальными опытами, в которых одновременно регистрировались моменты прихода волн уплотнения и газового давления, показано, что фронт волны газового давления примерно на 15 мм отстает от волны уплотнения. Эти данные дополняют существующие представления о механизме перехода горения в детонацию в насыпных ВВ и свидетельствуют о том, что на стадии, предшествующей возникновению детонационной волны, конвективное горение, распространяющееся с постоянной скоростью, сопровождается волной уплотнения (пластической волной), причем ее амплитуда, как и давление во фронте пламени, возрастает с течением времени. Условием перехода в детонацию является достижение амплитудой пластической волны критического уровня, при котором уплотнение ВВ будет приводить к химическому разложению ВВ в «горячих» точках. Непрерывное возрастание  $p_f$  при постоянстве  $w$  позволяет понять ранее казавшийся не совсем ясным скачкообразный (на фоторезервке) переход конвективного горения в детонацию.

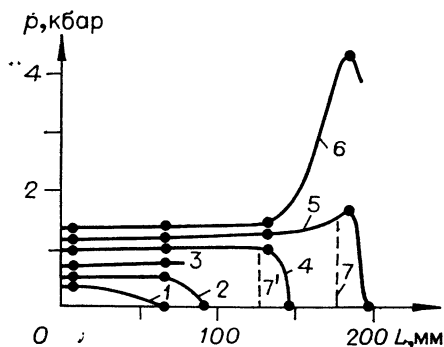


Рис. 3. Пространственные профили давления в различные моменты времени от момента срабатывания воспламенителя. Дымный порох, замкнутый объем, заряд диаметром 5 и длиной 200 мм;  
 $t$  (мс): 1 — 0,3, 2 — 0,68, 3 — 0,86;  
 4 — 1,02, 5 — 1,1, 6 — 1,15; 7 и 7' — фронт пламени.

Полученные в работе экспериментальные результаты находят объяснение в рамках теоретической модели нестационарного конвективного горения с квазистационарными зонами горения и прогрева [4, 5]. Согласно этой модели, динамическое поведение конвективного горения определяется взаимодействием двух факторов: релаксации зоны фильтрации, которая стремится сгладить градиенты и понизить скорость конвективного горения, и повышения давления во фронте пламени, которое способствует ускорению конвективного горения. Из-за существования обратной связи между  $w$  и  $p_f$ , которая приводит к увеличению  $p_f$  при ускорении пламени за счет расширения зоны горения, конвективное горение прогрессивно ускоряется (возрастают  $w$  и  $p_f$ ) во всех тех случаях, когда характерное время фильтрации  $t_\phi$  больше характерного времени изменения давления во фронте пламени  $t_*$ . Именно такая ситуация реализуется при горении зарядов насыщенной плотности в отсутствие влияния закрытого торца и эффективного уплотнения.

При выходе волны фильтрации на закрытый торец заряда действие фильтрационного фактора возрастает из-за торможения газов у торца, одновременно падает  $t_\phi$ , и в условиях горения в полузамкнутом объеме оказывается возможным равновесие, которое проявляется в постоянстве  $w$  при увеличении  $p_f$ . Численное моделирование этой ситуации [4] воспроизводит основные особенности, наблюдаемые на эксперименте.

При горении в замкнутом объеме  $t_*$  гораздо меньше, и поэтому влияние закрытого торца оказывается несущественным. Стабилизация скорости конвективного горения при быстро возрастающем давлении во фронте пламени оказывается возможной лишь вследствие эффективного уплотнения заряда ВВ перед фронтом пламени, когда давление в волне приближается к пределу текучести ВВ (порядка 1 кбар).

*Поступила в редакцию 20/VIII 1980*

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов и др.— В сб.: Горение конденсированных систем. Черноголовка: ОИХФ, 1977.
3. В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1979, 15, 2, 88.
4. Б. С. Ермолаев. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1978.
5. Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасанов и др. ФГВ, 1975, 11, 5, 720.