

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.46

**РОЛЬ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА
В МЕХАНИЗМЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ**

В. С. Илюхин, А. Д. Марголин, В. Г. Мысов, С. С. Новиков

(Москва)

При горении взрывчатых веществ и порохов вещество, поступающее на горящую поверхность, представляет собой механическую смесь или «смесь» вещества на «молекулярном уровне», заметно отличающуюся по химическому составу от исходного. Это связано с протеканием в прогретом слое конденсированной фазы зоны горения суммарно-экзотермических реакций и накоплением на горящей поверхности труднолетучих компонент. Эта особенность механизма горения была впервые отмечена в работах П. Ф. Похила в отношении нитроглицериновых [1] и смесевых [2] порохов.

Накопление и периодический сброс труднолетучих компонент с горящей поверхности могут быть причиной пульсирующего горения конденсированных систем при стационарных внешних условиях. Различие в этом отношении гомогенных и гетерогенных (смесевых) систем связано с тем, что при горении первых частоты пульсаций определяются самим процессом горения, они не определены какой-либо геометрической характеристикой к-фазы. Для смесей частиц окислителя с горючим имеется характерный размер — диаметр зерна окислителя d , поэтому характерное время $\frac{d}{u}$ пульсационного горения смесевых систем может существенно отличаться от характерного времени пульсационного горения гомогенных систем $\frac{\kappa}{u^2}$.

Пульсирующее горение гомогенных ВВ и порохов отмечалось и исследовалось в работах [3—13]. В данной работе проведено исследование горения гетерогенного топлива на основе монодисперсного перхлората аммония (ПХА) в зависимости от размера частиц окислителя и давления в бомбе постоянного давления при стационарных внешних условиях. Опыты проводились в бомбе объемом $V=1,5$ л в интервале давлений $p=5\div 60$ атм при комнатной начальной температуре. В качестве горючего связующего использовался полиметилметакрилат (26,2%) с размером частиц $d=3$ мкм, в качестве окислителя частицы ПХА с размерами $d_1=75\div 100$ мкм, $d_2=200\div 250$, $d_3=400\div 600$ мкм. Образцы топлива изготавливались прессованием и имели размеры $8\times 7\times 15$ и $4\times 7\times 15$ мм. Плотность образцов составляла $\rho=1,6$ г/см³.

В процессе горения регистрировались колебания давления в бомбе и средняя скорость горения с помощью дифференциального датчика давления ДМИ-0,1-П [14]. Чувствительность датчика в комплекте с прибором ИД-2И и осциллографом Н-107 составляет $K=4,5\cdot 10^{-4}$ атм/мм.

Получены осциллограммы пульсаций давления при горении. Типичный вид осциллограммы приведен на рис. 1. Гармонический анализ осциллограмм колебаний давления проводился на ЭВМ. Помимо основной частоты наблюдались более высокие частоты меньшей амплитуды. Из таблицы видно, что безразмерное отношение основной частоты к «слоевой» $\frac{f_0 \cdot d}{u}$ отличается от единицы не бо-



Рис. 1. Осциллограмма пульсаций давления; $p=20$ атм, $d_2=200 \div 250$ мкм.

лее чем на 33%. С увеличением давления и размера частиц $\frac{f_0 \cdot d}{u}$ существенно уменьшается (см. таблицу), в то время как безразмерная величина $\frac{f_0 \cdot d}{u}$ остается постоянной в пределах ошибки эксперимента. Киносъемка процесса горения показала (рис. 2), что отток продуктов сгорания от горящей поверхности имеет пульсирующий характер с частотой, совпадающей со «слоевой». Таким образом, частота колебаний для всех топлив с размером частиц окислителя $d=75 \div 600$ мкм соответствует «слоевой частоте» $f_0 = \frac{u}{d}$.

Структура горящей поверхности топлива изучалась по методике, предложенной в [15]. Образцы топлива наклеивались высокотеплопроводным клеем на основе эпоксидной смолы, наполненной алюминиевой пудрой, на массивную медную пластину. Погасание топлива происходит при слое топлива на пластине, сравнимом по толщине с прогретым слоем в волне горения. Изучение несгоревших остатков топлива под микроскопом позволило установить, что при давлениях свыше 5 атм

$d, \text{ см} \cdot 10^{-4}$	$p, \text{ атм}$	$f_0, 1/\text{с}$	$u, \text{ см/с}$	$\frac{f_0 \cdot d}{u} \pm \delta$	$\frac{f_0 \cdot d}{u^2}$
60 ÷ 400	5	4,5	0,17	$1,33 \pm 0,2$	0,15
	10	5,5	0,26	$1,06 \pm 0,2$	0,08
	20	6,4	0,40	$0,80 \pm 0,2$	0,04
	30	6,6	0,47	$0,71 \pm 0,2$	0,03
	40	7,2	0,47	$0,76 \pm 0,2$	0,03
	50	7,0	0,47	$0,75 \pm 0,2$	0,03
	60	7,1	0,45	$0,79 \pm 0,2$	0,03
250 ÷ 200	5	11,0	0,21	$1,18 \pm 0,11$	0,25
	10	11,5	0,24	$1,07 \pm 0,11$	0,19
	20	11,2	0,32	$0,78 \pm 0,11$	0,11
	30	16,5	0,36	$1,03 \pm 0,11$	0,12
	40	18,5	0,42	$0,99 \pm 0,11$	0,09
	50	19,0	0,43	$0,99 \pm 0,11$	0,09
	60	21,6	0,47	$1,02 \pm 0,11$	0,09
100 ÷ 75	5	30,0	0,25	$1,05 \pm 0,14$	0,48
	10	38,0	0,29	$1,14 \pm 0,14$	0,45
	20	42,0	0,35	$1,05 \pm 0,14$	0,34
	30	46,0	0,38	$1,06 \pm 0,14$	0,32
	40	48,0	0,42	$1,0 \pm 0,14$	0,27
	50	49,0	0,41	$1,05 \pm 0,14$	0,29
	60	47,2	0,42	$0,98 \pm 0,14$	0,26



Рис. 2. Пульсации оттока продуктов сгорания от поверхности горения: $p = 30$ атм, $d = 200 \div 250$ мкм.

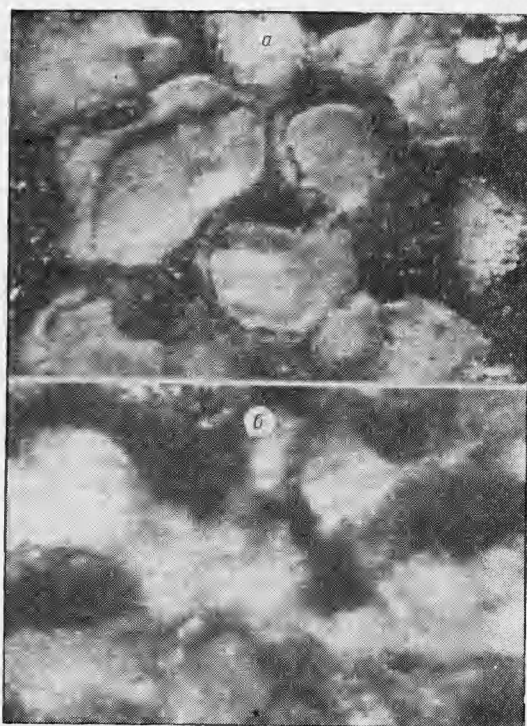


Рис. 3. Структура погашенной поверхности горения при $p = 1$ атм, $d_3 = 400 \div 600$ мкм (а) и при $p = 60$ атм, $d_3 = 400 \div 600$ мкм (б).

частицы окислителя на погашенной поверхности отсутствуют для всех составов топлив. Поверхность покрыта оплавленным ПММА. При давлении 1 атм частицы окислителя сохранились. Для топлива с размером частиц ПХА $400 \div 600$ мкм отчетливо наблюдается, что горение происходило по контакту частиц окислителя и горючего связующего (рис. 3, а). Для топлив с размером частиц ПХА $200 \div 250$ мкм толщина несгоревшего остатка меньше, чем для топлива с частицами размером $400 \div 600$ мкм. Горение также происходило по контакту зерен окислителя и горючего связующего. Для топлива на основе частиц окислителя размером $75 \div 100$ мкм несгоревший остаток представляет собой застывшую оплавленную массу ПММА, в толще которой видны частицы окислителя. Выступающих над поверхностью ПММА частиц окислителя не сохранилось. Изучение несгоревших остатков топлива, полученных при давлениях $30 \div 60$ атм, показало, что для всех топлив частицы ПХА в слое остатка отсутствуют. Это связано с тем, что скорость горения ПХА больше скорости пиролиза горючего связующего. Более быстрое выгорание частиц окислителя приводит к обогащению поверхности горения горючим.

В результате экспериментов установлено, что основная частота пульсационного режима горения топлива на основе монодисперсного ПХА при стационарных внешних условиях соответствует «слоевой частоте» $f_0 = B \frac{p^u}{d}$, где $u = B \cdot p^v$ — закон горения, в отличие от пульсационного горения гомогенных систем, описываемого зависимостью вида $f = A \cdot p^{2v}$. Частота пульсаций оттока продуктов сгорания от поверхности также соответствует «слоевой частоте».

Поступила в редакцию
21/VI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил. Докт. дисс., Москва, 1954 г.
2. П. Ф. Похил, Л. Д. Ромоданова. ЖФХ, 1965, 39, 2.
3. J. D. Huffington. Trans. Far. Soc., 1954, 50, 942.
4. D. M. Clemmton, J. D. Huffington. Trans. Far. Soc., 1956, 52, 385.
5. Э. И. Максимов. ЖФХ, 1963, 37, 5.
6. И. Б. Светличный, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил. ФГВ, 1971, 7, 2.
7. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. А. Селезнев. ЖФХ, 1965, 39, 3.
8. К. К. Андреев. ЖФХ, 1946, 4—5.
9. А. И. Гольбиндер, В. В. Горячев. ЖФХ, 1961, 35, 8.
10. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. ФГВ, 1971, 7, 3.
11. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский и др. Докл. АН СССР, 1966, 139, 3.
12. Г. Г. Шелухин, В. Ф. Булдаков, В. П. Белов. ФГВ, 1969, 5, 1.
13. К. И. Синаев. Первый всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. М., «Наука», 1968.
14. А. Н. Петунин. Методы измерения параметров газового потока. М., «Машиностроение», 1972.
15. С. С. Новиков, П. Ф. Похил, Ю. С. Рязанцев. Второй всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Ереван, 1969.

УДК 534.46

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Н. Н. Бахман, И. Н. Лобанов

(Москва)

В работах [1—5] показано, что скорость горения конденсированных систем (КС) можно увеличить в несколько раз, вводя в заряд теплопроводящие элементы (ТЭ), например медные проволочки. Для цилиндрических зарядов, горящих с торца, описаны [1, 2, 5] ТЭ двух типов: 1) проволочки с длиной l , равной длине заряда L , расположенные параллельно оси заряда; 2) короткие ТЭ («иголки») с длиной $l \ll L$, хаотично ориентированные относительно оси заряда.

Стационарная скорость распространения пламени в этих случаях может быть рассчитана из уравнения теплопроводности при наличии дополнительных условий. Такое решение проводилось рядом авторов, в том числе одним из авторов данной работы. Решение (как правило, численное) громоздко и лишено наглядности. В то же время реальная точность такого решения ограничивается отсутствием прямых данных о коэффициенте теплоотдачи Φ от газа к проволочке и температуре воспламенения T_v конденсированной системы в условиях рассматриваемой задачи. Не вполне ясен также вклад реакций окисления, которые могут идти на поверхности металлических ТЭ. Поэтому наряду с «точным» решением имеет смысл попытаться построить приближенные модели, которые, сохраняя качественную трактовку явления, позволяли бы получить в явном виде не слишком громоздкое аналитическое выражение для ω . Одна из таких моделей и рассматривается в данной работе.

Модель распространения пламени вдоль бесконечной проволочки. Введем обозначения: u — нормальная скорость горения КС, d — диаметр проволочки, ρ — плотность, c — теплоемкость, λ — коэффициент теплопроводности, T_0 , T_n , $T_{пл}$ — температуры начальная, поверхности горячей КС, плавления проволочки. Индексы КС, м, г относятся соответственно к КС, металлической проволочке и газообразным продуктам сгорания КС.