

остается весьма малым. Механизм горения частиц углерода микронных размеров должен включать в себя кинетику гетерогенных реакций взаимодействия кислорода с углеродом, а также кинетику газофазных реакций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Предводителев А. С., Хитрин Л. Н., Цуханова О. А. и др. Горение углерода.— М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1949.— 407 с.
2. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва.— М.: Изд-во МГУ, 1957.— 442 с.
3. Виленский Т. В., Хзмалин Д. М. Динамика горения пылевидного топлива: Исследования на электронных вычислительных машинах.— М.: Энергия, 1978.— 250 с.
4. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 208 с.
5. Гремячкин В. М., Рощина Л. М. Диффузионно-тепловая модель горения частицы углерода // ФГВ.— 1990.— 26, № 6.
6. Лавров Н. В., Розенфельд Э. И., Хаустович Г. П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды.— М.: Металлургия, 1981.— 240 с.
7. Саввинов М. Н. Об окислении углеродного шара в потоке углекислоты // Тр. Воронеж. ун-та.— 1941.— Т. XII, вып. 1.— С. 3—15.
8. Чуханов З. Ф. Процесс газификации кокса и проблема подземной газификации топлива.— М.: Изд-во АН СССР, 1957.— 336 с.
9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник под ред. В. П. Глушко.— М.: Наука, 1978.
10. Головина Е. С. Высокотемпературное горение и газификация углерода.— М.: Энергоатомиздат, 1983.— 174 с.

г. Москва

Поступила в редакцию 3/II 1991

УДК 662.612.3

Ю. С. Иващенко, А. Л. Садырин, А. Ф. Свиридов, С. И. Яковлев

#### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К САЖЕОБРАЗОВАНИЮ НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИЧНЫХ ТОПЛИВ

На серии топлив типа Н с добавками свинцового катализатора и фтороцласта-3 проведена проверка электрофизического подхода к сажеобразованию на поверхности горения. Показана возможность электрофизической интерпретации действия свинецсодержащего катализатора и галогенсодержащих добавок на сажеобразование на поверхности.

Известно, что горение твердых углеводородных топлив сопровождается возникновением электропроводности поверхности горения и химической ионизацией слоев газа, прилегающих к ней [1]. Поскольку цепные реакции горения и реакции химической ионизации совмещены в пространстве и во времени, химионизация может оказывать влияние на процесс горения через концентрацию активных частиц, являющихся центрами цепных реакций в зоне горения [2]. Учитывая, что химионизация проявляется при сравнительно низких температурах (предшествуя основному приращению температуры), она может влиять на процессы горения уже на ранней стадии.

В настоящее время принято считать первичной реакцией химической ионизации при горении углеводородных топлив реакцию



Известно также, что ионы  $\text{CHO}^+$  (как и другие положительные химионы) могут быть активными центрами (зародышами) конденсации углерода при горении [3—5]. Последний, как известно, оказывает каталитическое влияние на процессы у поверхности горения к-систем. Исчезновение ионов в результате рекомбинации приводит к прекращению образования ядер конденсации сажи [5]. Опыты также показывают, что скорости образования химионов близки к скоростям образования частиц

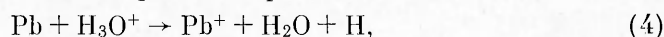
сажи, а концентрация ионов в пламени начинает резко уменьшаться с возрастанием концентрации сажи [5].

В свете изложенных представлений о сажеобразовании интересно рассмотреть роль в реакциях химионизации соединений свинца и галогенов. Первые находят применение в двухосновных топливах в качестве катализаторов горения, вторые, обладая высоким сродством к электрону, способны влиять на реакции химионизации и тем самым на сажеобразование.

В работе [3] указывается, что добавление свинца в углеводородные пламена резко уменьшает скорость рекомбинации зарядов за счет замены быстрой диссоциативной реакции рекомбинации иона  $\text{H}_3\text{O}^+$  и электрона, протекающей по схеме



более медленной трехчастичной реакцией рекомбинации



В результате увеличивается концентрация химионов в газе, что должно вести к росту сажеобразования в реакционной зоне.

Введение в зону химионизации галогенсодержащих добавок дает при их термическом распаде соединения, обладающие повышенным сродством к электрону. При этом происходит прилипание электронов, в результате уменьшается скорость рекомбинации зарядов, что ведет к увеличению концентрации химионов [6], способствуя сажеобразованию. Одновременно снижается концентрация свободных электронов.

Таким образом, учитывая раннюю химионизацию газа, прилегающего к поверхности баллистичных порохов, можно ожидать ее влияния на сажеобразование на поверхности и тем самым на скорость горения порохов. При этом возможно воздействие на сам процесс химионизации с помощью добавок, способных подавлять или интенсифицировать его. Процессы химионизации способны также тормозить реакции горения за счет поглощения  $\text{SH}$  и  $\text{O}$  и уменьшения центров цепных реакций [2].

Для проверки рассмотренных предположений изучалось сажеобразование на поверхности горения двухосновных порохов. Эффективен контроль за сажеобразованием на поверхности измерением ее электропроводности, зависящей от объемной доли сажи. Для дисперсных систем, какой является поверхность горения с сажистыми включениями, эффективная электропроводность  $\sigma^*$  системы определяется известным в физике полимеров выражением Бруггемана

$$\frac{\sigma_c - \sigma^*}{\sigma_c - \sigma_0} = \alpha_0 \left( \frac{\sigma^*}{\sigma_0} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  и  $\alpha_0$  — электропроводность и парциальный объем полимерной части поверхности;  $\sigma_c$  — электропроводность включений сажи. Учитывая, что  $\sigma_0 \approx 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  и  $\sigma_c \approx 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , т. е.  $\sigma_c \gg \sigma_0$ , можно записать

$$\sigma^* = \frac{\sigma_0}{(1 - \alpha_c)^3}, \quad (7)$$

где  $\alpha_c$  — объемная доля включений сажи;  $(\alpha_c + \alpha_0) = 1$ . Таким образом, в случае высокопроводящих включений эффективная электропроводность дисперсной системы (поверхности горения) определяется парциальным объемом высокопроводящего наполнителя (сажи).

Испытывались образцы топлив прямоугольного сечения размером  $6 \times 8 \times 50$  мм. На большие боковые грани образцов напылением в вакууме наносились сгорающие пленочные электроды из олова толщиной

Состав	$u$ (м/с) при $p$ , атм				$\sigma_n \cdot 10^2$ (См <sup>-1</sup> · м <sup>-1</sup> ) при $p$ , атм			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Н	3,1	5,1	6,8	8,2	0,6	1,2	1,5	2,1
Н + 1 % РbO	5,0	7,6	8,6	9,5	35	65	3,6	3,1
Н + 2 % РbO	5,6	7,8	8,8	9,6	100	12,6	2,6	1,5
Н + 2 % РbO + + 3 % Ф-3	4,6	6,7	8,5	10,1	60	77	58	39

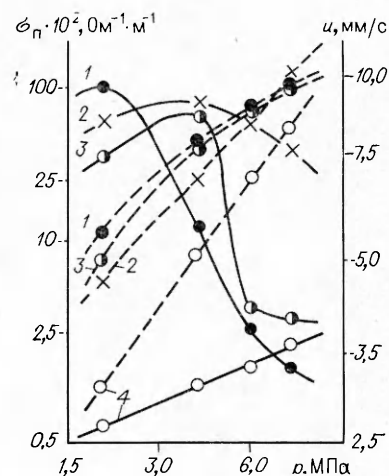
1 мм. Для обеспечения торцевого горения образцы покрывались слоем парафина толщиной 2 мм. Измерения электрического сопротивления поверхности проводились на переменном токе частотой 1000 Гц.

Определялась величина удельной электропроводности поверхности  $\sigma_n = d/Rbh$  ( $R$  — измеренное сопротивление,  $d$  — расстояние между электродами,  $b$  — ширина пленочных электродов,  $h$  — толщина реакционного слоя в  $\kappa$ -фазе). Из-за неопределенности величины  $h$  использовались значения толщины прогретого слоя  $\delta = \kappa/u$ , где  $\kappa \approx 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с — коэффициент температуропроводности;  $u$  — скорость горения. Величина  $\delta$  позволяла косвенно учитывать характер изменения  $h$  со скоростью горения.

Исследовались образцы пороха Н с добавками (сверх 100 %) окиси свинца и политрифторхлорэтилена (Ф-3). В таблице приведены численные значения скорости горения образцов  $u$  и удельной электропроводности поверхности  $\sigma_n$  при разных давлениях  $p$ . Как следует из таблицы и рисунка, при введении 1 % РbO наблюдается увеличение при низких давлениях содержания сажи на поверхности по сравнению с порохом Н. Концентрация сажи растет до  $p = 4$  МПа и затем резко падает. Последнее связано с ростом температуры и ускорением окисления сажистых образований окисью азота в присутствии окиси свинца. Введение 2 % РbO в еще большей степени увеличивает сажеобразование на поверхности. При этом максимум сдвигается в сторону более низких давлений. Добавка 3 % фторопласта-3 к пороху Н + 2 % РbO ведет к росту сажеобразования с максимумом при 4 МПа. Некоторое снижение содержания сажи по сравнению с составом Н + 2 % РbO связано с охлаждающим действием добавки. При этом падает и скорость горения. В области высоких давлений ход зависимости  $\sigma_n(p)$  аналогичен составам с РbO. Для составов с РbO (без Ф-3) характерно замедление роста скорости горения с давлением в областях резкого падения сажеобразования и приближение ее к скорости горения пороха Н. При  $p > 6$  МПа скорость горения пороха с фторопластом-3 выше, чем у других составов из-за более высокого содержания сажи.

Таким образом, введение в состав пороха Н соединений свинца и фтора увеличивает содержание сажи на поверхности в области низких и средних давлений.

Для оценки электропроводности газовой фазы вблизи поверхности распределение электропроводности газа от поверхности горения вдоль оси пламени измеряли с помощью проходного электрического зонда на переменном токе частотой 1000 Гц. Зонд — это два вольфрамовых



Зависимости электропроводности поверхности горения (—) и скорости горения (---) от давления.

1 — Н + 2 % РbO; 2 — Н + 2 % РbO + 3 % Ф-3; 3 — Н + 1 % РbO; 4 — порох Н.

электрода диаметром 0,4 мм, заклеиваемых в образец на расстоянии 10 мм от плоскости воспламенения, расстояние между электродами 3 мм. Использовались образцы круглого сечения диаметром 10 и длиной 50 мм. Для обеспечения торцевого горения образцы покрывались тонким слоем парафина. В процессе горения зонд, оставаясь неподвижным, последовательно проходил через поверхность и газовую фазу, прилегающую к ней. Малый диаметр электродов обеспечивал их быстрый прогрев, тем самым исключалось влияние пограничных слоев на электродах.

Измерения показали, что после прохода зондом поверхности электропроводность газа нарастает, достигая максимума на расстоянии 3—4 мм от поверхности. Максимальная электропроводность газа у поверхности при  $p = 4$  МПа (в  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ )  $6,4 \cdot 10^{-2}$  для пороха Н,  $7,8 \cdot 10^{-2}$  для Н + 2 % РbО и  $1,5 \cdot 10^{-2}$  для Н + 2 % РbО + 3 % Ф-3. Данные получены без учета эффекта растекания тока, что завышает их значения приблизительно на порядок.

Поскольку электропроводность пламени определяется электронами пламени, введение в состав пороха Н добавки РbО увеличивает концентрацию электронов, а Ф-3 резко снижает ее за счет явления прилипания. В обоих случаях возрастает сажеобразование на поверхности, что согласуется с представлениями, изложенными выше.

Таким образом, подтверждается предположение о влиянии химической ионизации на процесс сажеобразования на поверхности горения  $\kappa$ -систем. При этом возможно регулирование процессов химионизации с помощью добавок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иващенко Ю. С., Зенченко В. М., Павленко В. Л. и др. Исследование ионизационных явлений вблизи поверхности горения баллистического пороха // ФГВ.— 1984.— 20, № 5.— С. 55—57.
2. Дьячков Б. Г., Попов В. А., Снятков Ю. П. Интенсификация процесса горения с помощью присадок // ТВТ.— 1972.— 10, № 6.— С. 1289—1294.
3. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения.— М.: Энергия, 1976.— С. 186.
4. Calcote H. F. Mechanisms of soot nucleation in flames — a critical review // Combust. Flame.— 1981.— 42, N 3.— P. 215—242.
5. Calcote H. F. Why does soot inception stop? // Ibid.— 1988.— 71, N 1.— P. 105—106.
6. Фиалков А. Б., Зиновьев Л. А., Фиалков Б. С. Влияние тетрафтордибромэтана на химионизацию и химилюминесценцию в пропан — бутан — воздушных пламенах // ФГВ.— 1983.— 19, № 6.— С. 41—43.

г. Красноярск

Поступила в редакцию 18/X 1990

УДК 614.841.11

*Г. Е. Голиневич, В. Л. Карнов, А. П. Федотов,  
И. А. Болодьян, В. И. Макеев, А. П. Пермяков*

#### ЕСТЕСТВЕННАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ И СРЫВ ОТОРВАННОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФФУЗИОННОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

Приближенным аналитическим методом получена формула для определения скорости истечения при срыве оторванного диффузионного факела. Экспериментально исследованы пределы устойчивого горения пламен водорода и метана, разбавленных азотом, в атмосфере с переменным содержанием кислорода на горелках различного профиля.

Исследованию механизма стабилизации и условий срыва диффузионных факелов посвящены работы [1—7]. Предложены различные зависимости для определения условий срыва пламени. Например, в [4] полу-