

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. С. Тюльпанов, С. А. Михальчук. ФГВ, 1981, 17, 2.
2. В. Н. Кондратьев, Е. Е. Никитин. Химические процессы в газах. М.: Наука, 1981.
3. V. N. Kondratiev. X-th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburg, 1965.
4. D. B. Olson, W. C. Gardiner, Jr. J. Phys. Chem., 1977, 81, 25.
5. В. Я. Басевич, С. М. Когарко. Изв. АН СССР. Сер. хим., 1979, 6, 1404.
6. T. Tsuboi. Japan. J. Appl. Phys., 1976, 15, 159.
7. Г. С. Аравин и др. ФГВ, 1982, 18, 1.
8. В. Н. Кондратьев. Константы скорости газофазных реакций. Справочник. М.: Наука, 1971.
9. Р. С. Тюльпанов. Диффузионные турбулентные пламена. Л.: ЛГУ, 1981.
10. Теория и практика сжигания газа/Под ред. А. С. Иссерлипа и М. И. Певзнера. Л.: Недра, 1981.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНОГО ПОРОХА

*Ю. С. Иващенко, В. М. Зенченко, В. Л. Павленко, А. Л. Садырин
(Красноярск)*

Процесс горения углеводородных топлив сопровождается химической ионизацией, отражающей интенсивность реакций горения [1]. В работе [2] предполагается, что реакции химионизации могут влиять на концентрацию активных частиц в зоне горения. Поскольку цепные реакции горения и реакции химической ионизации совмещены в пространстве и во времени, последняя может оказывать влияние на процесс горения.

До сих пор неравновесная ионизация наиболее широко исследовалась при горении газообразных углеводородных топлив. Поэтому представляет интерес изучение химионизации при горении конденсированных систем. Известно [3], что неравновесная ионизация газовой фазы сопровождается процессом горения твердых топлив. В работе [4] говорится о существовании ранней (по сравнению с основным приращением температуры) ионизации в порах поверхностного слоя твердого топлива.

Для изучения взаимосвязи между процессом горения и уровнем химической ионизации у поверхности исследовали горение баллиститного пороха Н, содержащего добавку 1% окиси свинца. Измеряли распределение электропроводности газа от поверхности горения вдоль оси пламени. Измерения проводили на переменном токе частотой 4 кГц с помощью электрического зонда. Зонд представлял собой два вольфрамовых электрода диаметром от 20 до 100 мкм, заклеиваемых в образец. Расстояние между электродами 3 мм. Образцы прямоугольного сечения имели размер $7 \times 10 \times 50$ мм. Электроды заклеивали параллельно малой грани на расстоянии 10 мм от плоскости воспламенения. Для обеспечения торцевого горения образцы покрывали слоем парафина. После этого образец и электроды фиксировали в контактной пробке прибора постоянного давления.

При сгорании образца зонд, оставаясь неподвижным, последовательно проходил через поверхность горения и газовую фазу, примыкающую к ней. Малый диаметр электродов обеспечивал их быстрый прогрев. Тем самым исключалось влияние пограничных слоев охлажденного газа на электродах на результаты измерений. Для расширения динамического диапазона схема измерений включала логарифмический усилитель. Один из электродов зонда был заземлен. Постоянная времени измерений составляла $2 \cdot 10^{-3}$ с.

На рис. 1 дан характерный вид осциллограммы электропроводности (2) при давлении 5 МПа. На ней имеется также запись температуры (1), полученная с помощью вольфрам-рениевой термопары, сваренной встык и выполняющей одновременно роль активного электрода зонда. Из осциллограммы видно, что вблизи поверхности существует зона ионизации,

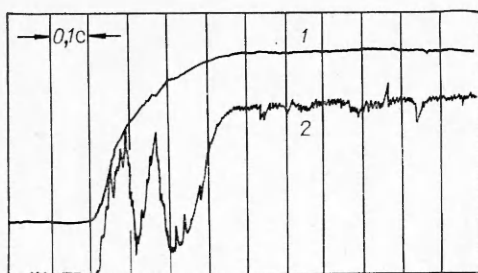


Рис. 1.

состоящая из двух пиков (волн) электропроводности, предшествующих максимуму температуры газа. Характерно наличие флуктуаций электропроводности, вызванных турбулентностью пламени и нестационарностью процесса. Достоверность существования пиков (волн) у поверхности подтверждается статистической обработкой результатов измерений. При этом проводилось по 20 опытов при каждом выбранном давлении.

Среднеквадратичное отклонение при определении средней амплитуды пиков составляло 5—7%. При давлении 2 МПа у первой волны наблюдается примыкающий к ней пик электропроводности поверхности. При повышении давления до 4 МПа пик электропроводности поверхности сливается с первым пиком электропроводности газа и становится неразличим даже в случае использования электродов диаметром 20 мкм.

За первой зоной следует вторая зона ионизации, являющаяся сравнительно протяженной и однородной. На рис. 2, а даны зависимости протяженности пиков первой ионизационной зоны (1) и расстояния от поверхности до начала второй ионизационной зоны (2) от давления. Протяженность группы пиков первой зоны сокращается от 2 мм при 2 МПа до 0,7 мм при 8 МПа. Расстояние от поверхности горения до начала зоны 2, совпадающего с максимумом температуры газа, изменяется от 2,3 мм при 2 МПа до 0,85 мм при 8 МПа. В последнем случае характерно линейное уменьшение расстояния с давлением. При давлениях выше 5 МПа наблюдается замедление сокращения протяженности первой зоны. Именно в этой области имеет место замедление роста скорости горения пороха Н + 1% РbО с давлением.

На рис. 2, б приведены зависимости удельной электропроводности σ первого ионизационного пика газа (2) и электропроводности поверхности горения (1) пороха Н + 1% РbО от давления [5]. Последняя получена с помощью сгорающих пленочных электродов из олова толщиной 0,5 мкм, нанесенных на образцы напылением в вакууме. При определении удельной электропроводности к-фазы измеренные значения электропроводности из-за неопределенности толщины реакционного слоя в к-фазе относились к толщине прогретого слоя, что занижало расчетное значение удельной электропроводности приблизительно на порядок. В то же время найденные величины удельной электропроводности газовой фазы, как показывают расчеты, завышены по крайней мере на порядок из-за эффекта растекания тока. Оценка концентрации электронов в первом ионизационном пике с учетом эффекта растекания тока дает величину $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (при $p = 4 \text{ МПа}$, $T = 1000 \text{ К}$ и $\sigma = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$), что говорит о неравновесном характере ионизации.

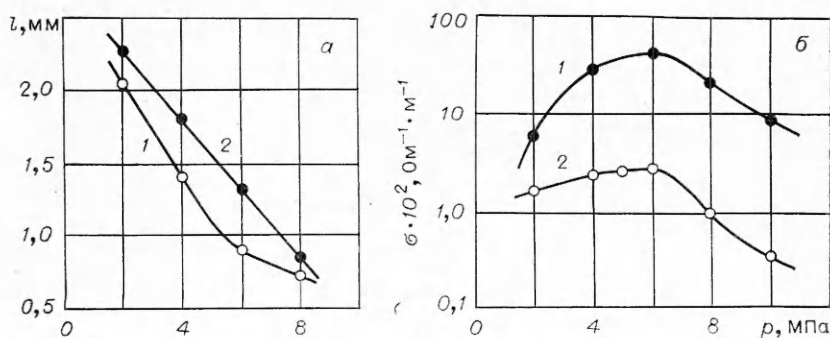


Рис. 2.

Таким образом, можно предположить, что величины удельной электропроводности газовой и конденсированной фазы различаются между собой на два-три порядка. Однако это не изменяет хода зависимостей $\sigma(p)$, и, рассматривая рис. 2, б, можно видеть, что зависимости уровня ионизации газа и электропроводности к-фазы повторяют друг друга.

Как указывалось в [5], ход кривой $\sigma(p)$ для к-фазы объясняется изменением интенсивности сажеобразования с давлением. При этом отмечалось, что при $p > 5$ МПа интенсивность сажеобразования падает в связи с уменьшением каталитической активности PbO. В этой же области наблюдается замедление роста скорости горения пороха с давлением. Следует отметить, что эффект увеличения электропроводности может быть как за счет сажеобразования, так и за счет науглероживания поверхностного слоя из-за накопления сопряженных (двойных) углеродных связей при термическом разложении пороха. В работе [6] также отмечается, что введение в состав пороха свинецсодержащих добавок приводит к увеличению сажеобразования (углеродистого вещества) в к-фазе лишь в ограниченном интервале давлений. На участке платообразной зависимости скорости горения от давления и за ним углерод исчезает.

Поскольку зависимость электропроводности газовой фазы от давления повторяет аналогичную зависимость для к-фазы, можно говорить о связи процесса химической ионизации при горении пороха с процессом сажеобразования на его поверхности и, возможно, с процессом диспергирования углерода. Действительно, в [7] указывается, что присутствие в пламени высокодисперсных частиц углерода приводит к значительному увеличению концентрации электронов по сравнению с равновесной, определяемой по формуле Саха, в результате образования так называемой коллоидной плазмы и термоэлектронной эмиссии с поверхности частиц углерода. Однако этот эффект становится значительным лишь при сравнительно высоких (выше 1600 К) температурах.

С другой стороны, привлекает внимание обратный механизм — влияние химической ионизации на процессы в пламени. Так, в работе [8] для объяснения механизма образования зародышей сажи в пламенах углеводородных топлив рассматриваются ионы, возникающие при химической ионизации и являющиеся активными центрами конденсации углерода. Полагается, что хемиионы могут быть центрами, на которых свободные радикалы, полициклические ароматические углеводороды и другие соединения вступают в ионно-молекулярные реакции. Учитывая раннюю ионизацию газа, примыкающего к поверхности пороха, можно ожидать его влияния на процесс сажеобразования у поверхности. К сожалению, факторы, влияющие на механизм химической ионизации, в настоящее время еще изучены мало.

Таким образом, исследование газовой фазы у поверхности горения баллистического пороха с добавкой окиси свинца ионизационным зондом позволило обнаружить наличие у поверхности ионизационных волн с неравновесной ионизацией. При этом установлена связь процесса химической ионизации газа вблизи поверхности с процессами в конденсированной фазе.

*Поступила в редакцию 15/III 1983,
после доработки — 4/X 1983*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Аравин, Е. С. Семенов. ФГВ, 1979, 15, 5, 40.
2. Б. Г. Дьячков, В. А. Попов, Ю. И. Снятков. ТВТ, 1972, 10, 6, 1289.
3. В. С. Логачев и др. Докл. АН СССР, 1972, 199, 646.
4. А. Сэбеделл, Д. Виноград, М. Саммерфилд. РТК, 1965, 3, 9, 16.
5. В. М. Зенченко, Ю. С. Иващенко, В. С. Еремеев и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 135.
6. Сингх, Рао. РТК, 1977, 15, 11, 12.
7. M. S. Sodha e. a. J. Appl. Phys., 1975, 46, 9, 3806.
8. H. F. Calcote. Comb. Flame, 1981, 42, 3, 215.