

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛЕНОК В УСЛОВИЯХ ПОВЕРХНОСТНОГО СВЧ-РАЗРЯДА**А. Ф. Александров, В. М. Шибков, Л. В. Шибкова***(кафедра физической электроники)*

E-mail: shibkov@phys.msu.ru

В условиях поверхностного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе реализовано быстрое плазменно-стимулированное воспламенение жидких углеводородов. Показано, что в зависимости от подводимой СВЧ-мощности период индукции изменяется от 5 до 30 мкс, воспламенение происходит на антенне в области существования поверхностного СВЧ-разряда при температуре газа, не превышающей 1000 К, скорость распространения передней границы области интенсивного горения около антенны достигает 300 м/с.

Особенности самостоятельного поверхностного СВЧ-разряда очень перспективны с точки зрения быстрого воспламенения углеводородных химически активных смесей [1–7]. В настоящее время эта проблема является очень актуальной с точки зрения новой области физики, а именно плазменной аэродинамики, где одним из главных направлений является задача максимального сокращения периода индукции для воспламенения высокоскоростных газовых потоков. Это можно осуществить с помощью газоразрядной плазмы, которая интенсифицирует разветвленно-цепные реакции при горении углеводородов. С целью применения поверхностного СВЧ-разряда для воспламенения жидких углеводородов необходимо проводить эксперименты при атмосферном давлении воздуха, так как летучие жидкости, помещаемые в вакуумную камеру, начинают быстро испаряться при понижении давления. В работах [8, 9] реализован поверхностный СВЧ-разряд при атмосферном давлении воздуха на поверхности кварцевой антенны прямоугольного сечения 9×18 мм при импульсной СВЧ-мощности всего 10–20 кВт.

Для изучения воспламенения жидких углеводородных пленок использовалась экспериментальная установка, состоящая из вакуумной камеры, магнетронного генератора, системы для ввода СВЧ-энергии в камеру и диагностической системы. В качестве источника СВЧ-излучения использовался импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор мог работать либо в однократном режиме, либо в режиме частых посылок СВЧ-импульсов. Магнетрон имел следующие характеристики: длина волны $\lambda = 2.4$ см; отдаваемая в тракт импульсная СВЧ-мощность $W < 100$ кВт; длительность импульсов $\tau = 5 \div 200$ мкс; частота повторения импульсов

$f = 1 \div 100$ Гц, скважность в режиме повторяющихся импульсов $Q = 1000$; при этом средняя мощность не превышала 100 Вт.

На рис. 1 представлен интегральный снимок процесса воспламенения и горения чистого спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении воздуха. Жидкий спирт нанесен тонким слоем только на левую поверхность вертикально расположенной кварцевой антенны. Так как время экспозиции кадра равно 2 с, то на одной фотографии одновременно можно видеть горение спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда, т. е. при наличии сильного приведенного электрического поля (яркое белое свечение слева у поверхности антенны), и слабое синеватое свечение справа от антенны (это обычное нормальное стационарное горение спирта). На этом же кадре можно видеть некоторое компактное светящееся образование, оно



Рис. 1. Интегральный снимок процесса воспламенения и горения чистого спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда. Условия эксперимента: давление воздуха 1 атм, длительность СВЧ-импульса 100 мкс, импульсная СВЧ-мощность 55 кВт

начинает образовываться в зоне СВЧ-разряда при воспламенении спирта, газ нагрет в нем до 2000 К и ионизован. Это образование можно отождествить с процессом автовоспламенения и догорания мелких капелек спирта, инжестируемых из зоны горения у поверхности антенны, а также паров спирта и газообразных продуктов его деструкции в СВЧ-разряде. Если СВЧ-разряд создается внутри налитого в углубление на фланце спирта и внешнее воспламенение спирта не происходит, то выделяемая внутри спирта энергия переходит в направленное движение либо капелек жидкости, либо наблюдаются струйки жидкости, летящие со скоростью ~ 10 м/с.

Также нами исследован ряд параметров рассматриваемого выше процесса. В частности, на рис. 2 представлены данные о положении (кривая 1) и скорости (кривая 2) передней границы области интенсивного горения спирта, воспламеняемого поверхностным СВЧ-разрядом. Регистрируемая скорость учитывает движение газа, вызванное ударными волнами, инициируемыми поверхностным СВЧ-разрядом, а также связанное с расширением продуктов горения спирта вблизи антенны. Видно, что период индукции для воспламенения спирта в этих условиях равен приблизительно 20 мкс. Следует подчеркнуть, что за 10–20 мкс воздух в условиях поверхностного СВЧ-разряда при атмосферном давлении нагревается только до 1000 К. Поэтому в этих условиях наблюдается нетепловой механизм воспламенения.

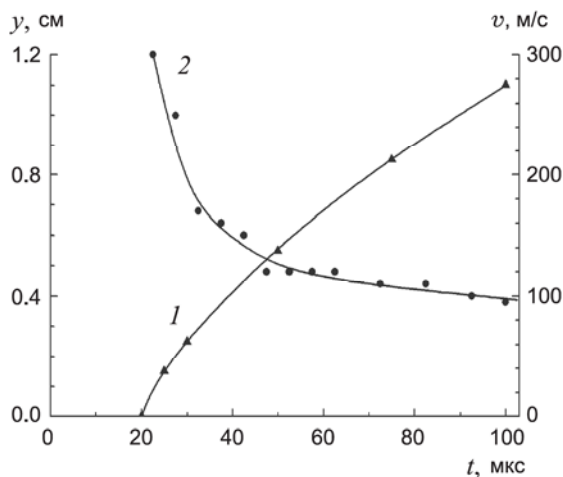


Рис. 2. Положение (кривая 1) и скорость (кривая 2) передней границы области интенсивного горения спирта в воздухе в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p = 1$ атм, $W = 55$ кВт, $\tau = 100$ мкс

Сравнение тепловых потоков от плазмы импульсно-периодического поверхностного СВЧ-разряда в воздухе и от пламени при горении спирта в воздухе показало, что на всех расстояниях от антенны потоки тепла от пламени при воспламенении спирта в 4–10 раз больше потоков от плазмы поверхностно-

го СВЧ-разряда в воздухе. У поверхности антенны в зоне интенсивного горения $n_e = 3 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$.

Был исследован также процесс воспламенения бензина и керосина с помощью поверхностного СВЧ-разряда. Теплотворные способности бензина и керосина почти в два раза больше, чем у спирта. Общий вид горения бензина, воспламененного в условиях однократного поверхностного СВЧ-разряда, представлен на рис. 3. Период индукции с увеличением подводимой СВЧ-мощности уменьшается с 22 мкс при $W = 55$ кВт до 8 мкс при $W = 75$ кВт.



Рис. 3. Горение бензина, воспламененного в условиях поверхностного СВЧ-разряда при $p = 1$ атм, $W = 55$ кВт, $\tau = 100$ мкс. Время экспозиции 1 с

Вблизи антенны при создании поверхностного СВЧ-разряда происходит эффективное испарение и деструкция бензина, наработка активных частиц и радикалов. Происходит также эффективный выброс паров и мелких капелек бензина. На расстоянии $y = 1$ –3 см от антенны происходит автовоспламенение продуктов деструкции бензина и движущихся капелек бензина, начинающееся через время порядка 3–5 мс после окончания СВЧ-импульса. Интенсивность свечения достигает максимального значения через 10 мс и продолжается еще в течение 30–40 мс. Измеренная в условиях интенсивного горения бензина температура пламени $T = 3100$ К. Аналогичные эксперименты были выполнены при воспламенении керосина в условиях поверхностного СВЧ-разряда. Период индукции для керосина, определенный тем же способом, что и при воспламенении спирта и бензина, равен 15 мкс при подводимой импульсной СВЧ-мощности 55 кВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-01251) и программы П-09 Президиума РАН.

Литература

1. Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. № 6. С. 64.
2. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2004. № 5. С. 67.

3. Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А., Шибкова Л.В. // Журн. техн. физики. 2005. **75**. С. 67.
4. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. // Журн. техн. физики. 2005. **75**. № 4. С. 74.
5. Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2005. **31**. № 9. С. 857.
6. Двинин С.А., Шибков В.М., Михеев В.В. // Физика плазмы. 2006. **32**, № 7. С. 654.
7. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П. и др. // Физика плазмы. 2007. **33**, № 1. С. 77.
8. Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 62.
9. Шибкова Л.В. Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2007.

Поступила в редакцию
04.04.2008