

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

ПОВЕРХНОСТНЫЙ СВЧ-РАЗРЯД В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЗДУШНО-УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПОТОКАХ

А. Ф. Александров, В. М. Шибков, Л. В. Шибкова

(кафедра физической электроники)

E-mail: shibkov@phys.msu.ru

Исследовано влияние неравновесной плазмы поверхностного СВЧ-разряда на процессы воспламенения сверхзвукового ($M = 2$) пропан-воздушного потока, а также спирта, бензина и керосина в условиях до- и сверхзвукового воздушного потока.

Для исследования возможности поджига с помощью поверхностного СВЧ-разряда [1–9] высокоскоростных углеводородных потоков использовалась экспериментальная установка, включающая в себя вакуумную камеру, ресивер высокого давления воздуха, ресивер высокого давления пропана, систему для смешивания пропана с воздухом, систему для создания сверхзвукового потока, прямоугольный аэродинамический канал, высоковольтный источник питания, магнетронный генератор, систему для ввода СВЧ-энергии в камеру, блок синхронизации и диагностическую аппаратуру. Источником СВЧ-излучения служит импульсный магнетронный генератор сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор имеет следующие характеристики: длина волны $\lambda = 2.4$ см; импульсная СВЧ-мощность $W < 200$ кВт; длительность импульса $\tau = 5\text{--}200$ мкс.

Воспламенение пропан-воздушного сверхзвукового потока исследовалось в зависимости от импульсной мощности ($W = 30\text{--}70$ кВт), длительности СВЧ-импульса ($\tau = 5\text{--}200$ мкс), массового расхода воздуха ($dm_{\text{air}}/dt = 25\text{--}120$ г/с), массового расхода пропана ($dm_{\text{propane}}/dt = 1\text{--}7$ г/с), при этом эквивалентное отношение Φ для пропана изменялось от 0.3 до 2. В частности, на рис. 1 приведены интегральная фотография общего вида горения сверхзвукового пропан-воздушного потока (слева) и мгновенная теневая фотография этого процесса (справа). На теневой фотографии зафиксирована передняя граница области горения, совпадающая по конфигурации с границей области сверхзвукового горения, которую мы наблюдаем на интегральной фотографии. Такое пространственное распределение фронта горения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси подтверждает наше предположение о возможном вкладе собственного ультрафиолетового излучения поверхностного СВЧ-разряда на кинетику воспламенения углеводородного горючего [2, 8]. Следует отметить, что газодинамические возмущения, возникающие в процессе развития поверхностного

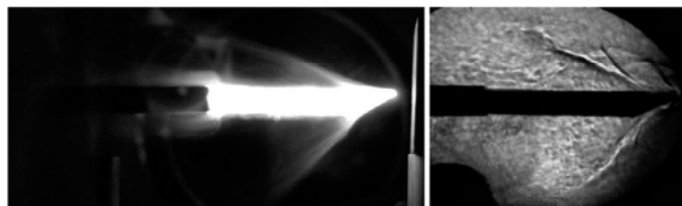


Рис. 1. Общий вид (слева) и мгновенная теневая картина (справа) воспламенения сверхзвукового стехиометрического пропан-воздушного потока в условиях поверхностного СВЧ-разряда на кварцевой антенне при $dm_{\text{air}}/dt = 55.5$ г/с, $dm_{\text{propane}}/dt = 3.6$ г/с, $\phi = 1$, $\tau = 120$ мкс, $W = 70$ кВт. Импульс лампы вспышки длительностью 4 мкс задержан относительно переднего фронта СВЧ-импульса на 120 мкс

СВЧ-разряда, также могут оказывать сильное влияние на процесс развития горения сверхзвукового пропан-воздушного потока. Экспериментально показано, что воспламенение происходит уже при импульсной мощности 35 кВт на расстоянии 1.5 см от переднего торца антенны. С увеличением подводимой энергии интенсивность горения сверхзвукового пропан-воздушного потока возрастает, при этом при мощности 70 кВт горение начинается приблизительно на расстоянии 0.5 см от переднего края антенны.

Важным параметром при воспламенении и горении воздушно-углеводородного топлива является состав смеси. В экспериментах эквивалентное отношение для пропана регулировалось либо изменением расхода воздуха при постоянном секундном расходе пропана, либо изменением секундного расхода пропана при неизменном секундном расходе воздуха. Проведенные исследования позволили установить, что поверхностный СВЧ-разряд приводит к воспламенению как бедных, так и богатых смесей. Задержка воспламенения сверхзвукового пропан-воздушного потока изменяется в зависимости от условий эксперимента от 5 до 20 мкс. Поперечная скорость распространения фронта горения

определялась по известной скорости сверхзвукового потока и измеренному тангенсу угла наклона резкой передней границы характерного свечения. Получено, что скорость зависит от подводимой мощности и эквивалентного отношения. Она максимальна в стехиометрической смеси и достигает в этих условиях величины порядка 200 м/с. Факт воспламенения фиксировался также с помощью двойного зонда, помещенного в область горения, при этом интенсивность сигнала при воспламенении пропан-воздушного потока на порядок величины превышала интенсивность сигнала, соответствующего поверхностному СВЧ-разряду в воздушном потоке. Температура пламени в процессе горения сверхзвукового стехиометрического пропан-воздушного потока в условиях поверхностного СВЧ-разряда порядка 3000 К.

При помещении жидкости в вакуумную камеру происходит ее интенсивное испарение, что не позволяет исследовать процесс воспламенения углеводородного топлива в жидкой фазе при давлениях воздуха в барокамере меньше атмосферного. Система подвода электромагнитной энергии к антенне, разработанная в работах [10, 11], позволила создать поверхностный СВЧ-разряд в широком диапазоне давлений воздуха вплоть до атмосферного и исследовать процесс воспламенения жидких углеводородов с помощью поверхностного СВЧ-разряда в условиях высокоскоростного воздушного потока. Воспламенение жидкого углеводорода изучалось на примере спирта, бензина и керосина, которые наносились тонким слоем на верхнюю и нижнюю поверхности кварцевой антенны. С помощью компрессора можно нагнетать в ресивер высокого давления воздух до давления 6 атм, что позволяло создавать высокоскоростные воздушные потоки с заданной скоростью при атмосферном давлении в барокамере. На рис. 2 представлены фотографии горения спирта в дозвуковом (верхняя фотография) и сверхзвуковом (нижняя) потоках. Получено, что при импульсной СВЧ-мощности 70 кВт период индукции в керосине равен примерно 10 мкс, а скорость распространения передней границы области горения в этих

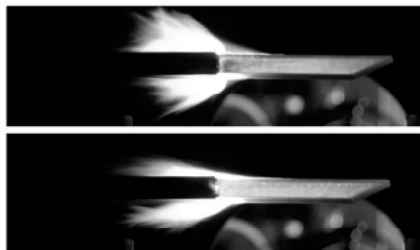


Рис. 2. Воспламенение спирта с помощью поверхностного СВЧ-разряда при длительности СВЧ-импульса $\tau = 120$ мкс, начальном давлении воздуха в барокамере $P_0 = 1$ атм, импульсной СВЧ-мощности $W = 65$ кВт и различных скоростях воздушного потока: $v_{\text{blast}} = 190$ м/с (вверху) и 390 м/с (внизу)

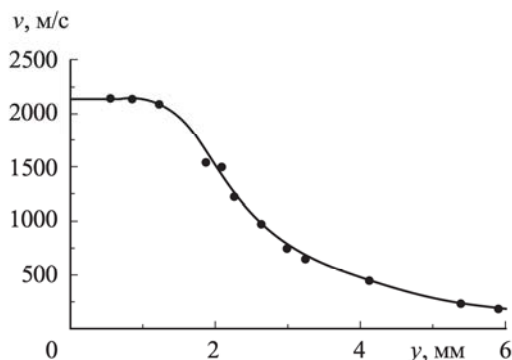


Рис. 3. Поперечная скорость развития воспламенения спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда ($\tau = 120$ мкс, $W = 65$ кВт), создаваемого в воздушном потоке ($v_{\text{blast}} = 190$ м/с)

условиях достигает 100 м/с. Измеренный за время СВЧ-импульса временной ход температуры показывает, что воспламенение керосина происходит при 1200 К и температура быстро (в течение 10 мкс) увеличивается до 3200 К. У поверхности антенны наблюдается развитие режима, близкого к детонационному горению (рис. 3). Однако из-за того что активная среда в условиях данного эксперимента находится только около антенны, детонационный режим быстро затухает.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-01251) и программы П-09 Препридуиума 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. технич. физики. 2005. **75**, № 4. С. 67.
4. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. // Журн. технич. 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. Shibkov V.M., Alexandrov A.F., Chernikov A.V. et al. // Proc. of the 43rd Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA. AIAA-2005-0779. P. 1.
9. Шибкова Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 5. С. 62.
10. Шибкова Л.В. Воспламенение спирта в условиях поверхностного СВЧ-разряда в воздухе: Препринт № 4. М.: Физический ф-т МГУ, 2007.
11. Шибкова Л.В. Физические процессы в движущейся плазме многокомпонентных инертных и химически активных смесей: Дисс. ... д.ф.-м.н. М.: ОИВТ РАН, 2007.

Поступила в редакцию
11.04.2008