

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

РАДИОФИЗИКА

УДК 533.9

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА
УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАЗРЯДОВ****В. М. Шибков, А. Ф. Александров, А. П. Ершов, А. А. Карачев,
Р. С. Константиновский, И. Б. Тимофеев, В. А. Черников, Л. В. Шибкова***(кафедра физической электроники)*

E-mail: shibkov@ph-elec.phys.msu.ru

Показано, что с помощью неравновесной плазмы газового разряда можно реализовать нетепловое воспламенение сверхзвукового потока газообразного углеводородного топлива. Математическое моделирование воспламенения водород-кислородной, метан-воздушной и пропан-воздушной смесей выявило, что влияние неравновесной плазмы проявляется наиболее отчетливо при низких температурах, когда время теплового равновесного воспламенения велико.

Управление процессами поджига и горения топлива в гиперзвуковом прямоточном реактивном двигателе является важнейшим условием для его успешного использования. Исследованию кинетики горения углеводородных топлив в смеси с кислородом или воздухом посвящено большое число работ, например [1–3]. В этих работах основное внимание уделяется механизмам воспламенения газообразных горючих. При этом в подавляющем числе исследований рассматриваются лишь механизмы, определяющие время индукции смеси при равновесном тепловом воспламенении. И только в последнее время стали появляться работы, в которых авторы рассматривают возможность влияния газового разряда на кинетику горения [4, 5]. Для решения этой проблемы, в значительной степени определяющей прогресс в развитии гиперзвуковой авиации, предлагается использовать различные типы генераторов плазмы.

В данной работе влияние неравновесной плазмы на кинетику горения газообразного топлива исследовалось на примере воспламенения сверхзвукового предварительно перемешанного пропан-бутан-воздушного потока с числом Маха $M = 2$. Эксперименты были выполнены на установке, состоящей из вакуумной камеры диаметром 100 см и длиной 300 см, системы смещения пропан-бутановой смеси с воздухом, системы создания сверхзвукового потока, аэродинамического канала, разрядной секции, трех генераторов плазмы, системы синхронизации и диагностической системы. Вакуумная система позволяла проводить исследования в широком диапазоне давлений $p = 1.0\text{--}760$ Тор. Для поджига использовались три типа газового разряда: безэлектродные свободно локализованный [6] и поверхностный [7]

СВЧ-разряды и электродный поперечный импульсный разряд [8].

Свободно локализованный СВЧ-разряд создавался с помощью импульсного магнетронного генератора, имеющего следующие характеристики: длина волны $\lambda = 2.4$ см; длительность импульсов $\tau = 1\text{--}100$ мкс; скважность (отношение периода следования импульсов к их длительности) $Q = 1000$; импульсная СВЧ-мощность $W < 200$ кВт. Микроволновый поток формировался рупорной антенной, напротив которой устанавливалось сферическое металлическое зеркало. СВЧ-разряд в сверхзвуковом потоке создавался в цилиндрическом кварцевом канале диаметром 30 мм без застойной зоны, помещенном между рупором и зеркалом в фокальной плоскости зеркала. Направление сверхзвукового потока было перпендикулярно направлению распространения СВЧ-энергии. При создании поверхностного СВЧ-разряда использовался тот же самый магнетрон. При этом волновод, введенный в разрядную камеру, оканчивался плоской диэлектрической антенной, на поверхности которой и создавался СВЧ-разряд в сверхзвуковом потоке газа. В этом случае направление сверхзвукового потока было противоположно направлению распространения поверхностного СВЧ-разряда. Поперечный импульсно-периодический электродный разряд формировался на внутренней поверхности диэлектрической стенки аэродинамического канала. Выходное напряжение импульсного источника питания $U = 10\text{--}30$ кВ, длительность импульса $\tau = 50\text{--}1000$ мкс, разрядный ток $i = 5\text{--}20$ А.

Эксперименты показали, что импульсный электродный разряд приводит к поджигу сверхзвуковой пропан-бутан-воздушной смеси только при длитель-

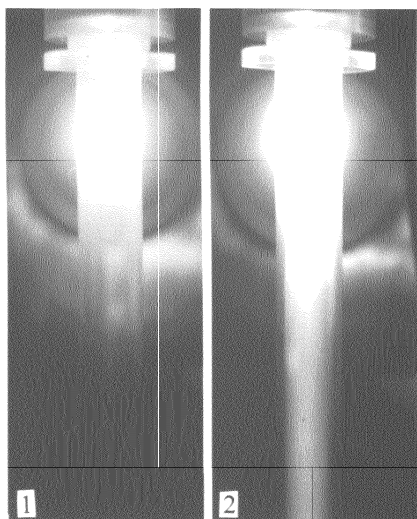


Рис. 1. Общий вид свободно локализованного СВЧ-разряда в сверхзвуковом потоке воздуха (1) и пропан-бутан-воздушной смеси (2) при $M = 2$, $p = 300$ торр, $\tau = 100$ мкс и импульсной СВЧ-мощности $W = 200$ кВт

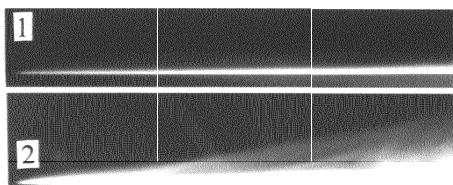


Рис. 2. Вид сбоку поверхностного СВЧ-разряда на плоской антенне, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха (1) и пропан-бутан-воздушной смеси (2) при $M = 2$, $p = 40$ Тор, $\tau = 100$ мкс и импульсной СВЧ-мощности $W = 60$ кВт

ности импульса $\tau > 150$ мкс. Поджиг с помощью свободно локализованного СВЧ-разряда (рис. 1) осуществляется уже при $\tau \approx 25$ мкс, а воспламенение с помощью поверхностного СВЧ-разряда (рис. 2) происходит практически без задержки. Измеренная температура газа в поверхностном СВЧ-разряде в сверхзвуковом потоке воздуха равна 800 К, тогда как при поджиге сверхзвукового потока пропан-бутан-воздушной смеси температура возрастает до 2800 К. Так как самостоятельный СВЧ-разряд существует при больших величинах приведенного электрического поля, то в этом случае нарабатывается больше активных частиц, чем в плазме электронного разряда, что оказывает сильное влияние на кинетику процессов с участием активных радикалов и приводит к уменьшению времени индукции. Поэтому необходимо детальное исследование влияния заряженных и активных частиц, которые очень быстро формируются в разряде, на уменьшение времени задержки воспламенения.

Математическое моделирование было проведено на примере водород-кислородной, метан-воздушной и пропан-воздушной смесей при учете диссоциации молекул и возникновения активных радикалов и заряженных частиц в условиях низкотемпературной плазмы газового разряда при высоких значениях приведенного электрического поля. В основу модели

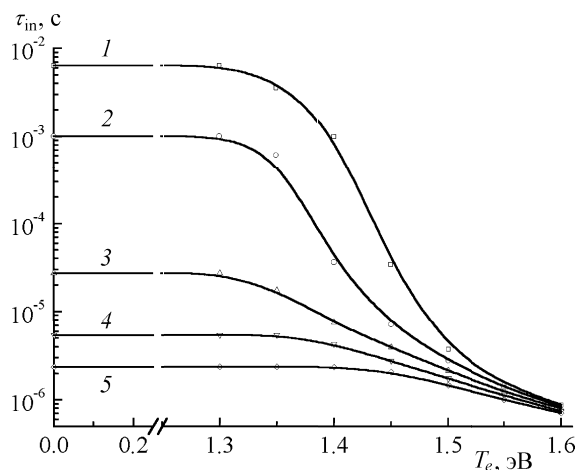


Рис. 3. Влияние газового разряда на время воспламенения стехиометрической (67–33%) смеси H_2-O_2 при $P_0 = 10^5$ Па и мгновенном нагреве газа до различных начальных температур T_0 , К: 1 – 800; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200

была положена система нестационарных уравнений, описывающая процессы окисления в таких смесях и включающая в себя уравнение энергии, уравнения изменения концентраций частиц, уравнение состояния. При моделировании считалось, что при включении электрического поля температура газа мгновенно увеличивается до некоторого начального значения T_0 . Расчеты проводились без учета потерь энергии и диффузии активных частиц в окружающее пространство.

Влияние газового разряда на время воспламенения водород-кислородной стехиометрической смеси показано на рис. 3. Видно, что время задержки воспламенения в условиях неравновесной плазмы при низких температурах газовой смеси уменьшается на несколько порядков при увеличении температуры электронов. Расчеты также показали, что при увеличении процентного содержания водорода в смеси с кислородом газовый разряд приводит к большому снижению времени задержки воспламенения по сравнению со стехиометрической смесью, тогда как влияние газового разряда на воспламенение бедных смесей значительно ниже. Было получено также, что при давлении $P_0 = 10^5$ Па и начальной температуре газа $T_0 = 900$ К время индукции при окислении метана в присутствии неравновесной плазмы газового разряда с температурой электронов $T_e = 1.0$ эВ равно 5.6 мкс, тогда как при автозажигании оно составляет ~ 0.118 с. Для стехиометрической пропан-воздушной смеси при $T_0 = 1400$ К и $P_0 = 10^5$ Па время индукции изменяется от ~ 1 мс при тепловом равновесном воспламенении до ~ 10 мкс в условиях газового разряда при $T_e = 0.75$ эВ. Эти результаты удовлетворительно согласуются с нашими экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02-02-17116) и EOARD (проект МНТЦ № 2248р).

Литература

1. *Coffee T.R.* // Combustion and Flame. 1984. **55**, N 2. P. 161.
2. *Frenklach M., Bornside D.E.* // Combustion and Flame. 1984. **56**, N 1. P. 1.
3. *Старик А.М., Титова Н.С., Яновский Л.С.* // Кинетика и катализ. 1999. **40**, № 1. С. 11.
4. *Bozhenkov S.A., Starikovskaya S.M., Starikovskii A.Y.* // Combustion and Flame. 2003. **133**, N 1–2. P. 133.
5. *Shibkov V.M., Chernikov A.V., Ershov A.P.* et al. // American Institute of Aeronautics and Astronautics Papers 2004-0513 and 2004-0838 presented at 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2004. Reno, Nevada, USA.
6. *Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М.* Свободно локализованный СВЧ разряд в воздухе. М., 1996. С. 204.
7. *Шибков В.М., Виноградов Д.А., Восканян А.В.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2000. **41**, № 6. С. 64.
8. *Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б.* и др. // Теплофизика высоких температур. 2004. **42**, № 3.

Поступила в редакцию
09.06.04