ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.95:537.52

ГОРЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПРОПАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Ф. Александров, А. Ю. Бауров, А. П. Ершов, А. А. Логунов, В. А. Черников

(кафедра физической электроники)

E-mail: ershov@ph-elec.phys.msu.su

Приводятся результаты экспериментальных исследований горения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси, инициированного разрядом постоянного тока. Обнаружено, что характер режимов горения зависит от ряда начальных условий, связанных как с созданием плазмы, так и с внешними параметрами сверхзвукового потока.

В последние годы проявляется большой интерес к электрическим разрядам в сверхзвуковых горючих газовых потоках. Именно электрические разряды позволяют в принципе обеспечить объемное и быстрое воспламенение и горение топливно-воздушной смеси, необходимое для эффективной работы прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Однако выбор оптимальных условий воспламенения и горения невозможен без фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований.

В настоящей работе изучались режимы плазменно-стимулированного горения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси при различных начальных условиях, связанных с внешними параметрами как плазмы (величина разрядного тока I, длительность разряда τ и т. п.), так и сверхзвукового потока (начальные давления в системах подачи воздуха P_0 и пропана $P_{\rm pr}$, начальное давление в балластной камере p, соотношение времен напусков воздуха и пропана и длительности импульса тока).

В экспериментах использовалась баллонно-вакуумная аэродинамическая труба кратковременного действия [1]. Ее сверхзвуковой канал состоял из осесимметричного сопла, рассчитанного на число Maxa M = 2, формирующей секции диаметром 25 мм и четырех прямоугольных рабочих секций сечения 20×40 мм², в одной из которых размещался генератор плазмы, а другие служили для диагностики процессов воспламенения и горения потока (рис. 1). На границе между формирующей и рабочей секциями существует уступ, создающий зону внезапного расширения (застойную зону). Топливо вводилось в канал через топливораздаточные фланцы как непосредственно в сверхзвуковой тракт, так и в область за уступом.

Для инициации горения потока сверхзвуковой воздушно-пропановой смеси применялся разряд постоянного тока между двумя электродами, которые располагались в области внезапного расширения сверхзвукового канала. Он создавался с помощью источника питания с выходным напряжением до 5 кВ и максимальным током I до 20 А. Длительность работы источника τ могла изменяться в пределах от 1 мс до нескольких секунд. Вкладываемая в разряд средняя мощность не превышала 2.0 кВт.

Для регистрации процесса горения и контроля основных параметров сверхзвукового потока использовались 20 датчиков давления, размещенных во всех секциях канала. Кроме того, для регистрации свечения продуктов горения использовался фотоумножитель, расположенный на расстоянии 60 см от электродов по потоку. В этом же месте проводилась киносъемка процесса горения.

Проведенные исследования показали, что характер горения сверхзвуковой воздушно-пропановой смеси существенным образом зависит от соотношения масс пропана и воздуха, поступающих в канал, т. е. от того, является ли топливная смесь относительно «богатой» или «бедной». Это соотношение изменялось путем вариации начального давления в системе подачи воздуха при постоянном давлении в системе напуска пропана. На рис. 2, *а* приведены типичные примеры сигналов с датчиков давления, полученные при величине разрядного тока 15 А и начальных давления воздуха $P_0 = 3$ атм и пропана $P_{\rm pr} = 3.5$ атм (начальное давление в балластной камере p = 50 торр). Длительность разряда составляла 1 с.

Датчик под номером 4 на этом рисунке регистрирует давление пропана на входе в канал, электроды расположены в области датчика с номером 11, датчики с номерами меньше 11 помещены ближе к сверхзвуковому соплу против потока, а датчики с номерами больше 11 размещены вдоль канала от 11-го датчика по потоку. Как видно из приведенного рисунка, в момент начала разряда



Рис. 1. Схема аэродинамического канала: 1 — сверхзвуковое (M = 2) осесимметричное сопло, 2 — система инжекторов предварительной подачи топлива, 3 — изолирующая вставка, 4 — система инжекторов основной подачи топлива, 5 — 1-я секция камеры сгорания, 6 — 2-я секция камеры сгорания, 7 — кварцевое окно, 8 — система инжекторов дополнительной подачи топлива, 9 — продольно-поперечный разряд



Рис. 2. Осциллограммы сигналов с датчиков давления при стабильном режиме горения (*a*) и разрядного тока (верхний луч) и свечения продуктов горения (нижний луч) (*б*). I = 15 A, $P_0 = 3$ атм, $P_{\rm Dr} = 5$ атм

происходит резкое (в несколько раз) возрастание давления в канале, что соответствует не менее резкому повышению температуры, т.е. началу горения топливной смеси в канале. При этом повышенное давление существует столько времени, сколько продолжается разряд. Таким образом, при указанных условиях горение смеси продолжается в течение времени существования разряда. Эти результаты подтверждаются и данными, полученными с фотоумножителя, представленными на рис. 2, δ , из которого следует, что длительность свечения продуктов горения (т.е. фактически время самого горения смеси) практически полностью совпадает с длительностью разряда. На основании полученных результатов можно сказать, что при данных условиях реализуется режим стабильного несамостоятельного горения топливной смеси в сверхзвуковом потоке.

При понижении начального давления в системе подачи воздуха, т.е. при переходе к относительно «богатой» смеси, режим стабильного горения становится нестационарным. При этом горение становится нестабильным: оно прекращается в течение импульса разряда, затем начинается вновь, и так происходит несколько раз за разряд. Можно сказать, что в этом случае реализуется нестабильный режим горения.

Введем некоторый коэффициент К, который



Рис. 3. Зависимость коэффициента K от давления в системе подачи воздуха (I = 15 A, $P_{\rm pr} = 3.5$ атм) (a) и от величины тока разряда ($P_0 = 3$ атм, $P_{\rm pr} = 3.5$ атм) (b); $\tau = 1$ с

определим как отношение времени горения смеси t_b к тому интервалу времени t_d , в течение которого импульс тока или его часть совпадает со временем напуска пропана: $K = t_b/t_d$. Отметим, что условие K = 1 соответствует горению смеси в течение времени существования разряда. При этом в случае возникновения самостоятельного горения смеси K может принимать значения больше единицы.

На рис. 3, *а* представлена зависимость величины *K* от давления в системе подачи воздуха, а на рис. 3, δ — от величины разрядного тока, полученные при постоянном начальном давлении в системе подачи пропана $P_{\rm pr} = 3.5$ атм.

Из приведенных зависимостей следует, что режим стабильного несамостоятельного горения воздушно-пропановой смеси в данном сверхзвуковом канале реализуется при давлении в системе подачи воздуха больше 2.5 атм (при максимальном значении 6 атм), и при значениях разрядного тока больше 13 А. При понижении давления в воздушной системе от 2.5 до 1.5 атм реализуется нестабильный режим горения, а при $P_0 < 1.5$ атм горение вообще не наблюдается. Аналогичная зависимость наблюдается и при уменьшении величины разрядного тока: при значениях тока меньше 9 А горение не наблюдается, при токах больше 13 А реализуется стабильный режим горения, а в промежуточном интервале токов горение протекает в нестабильном режиме.

Таким образом, исследование режимов воспламенения и горения сверхзвукового потока воздушно-пропановой смеси с помощью ППР показало, что при относительно бедной смеси реализуется режим стабильного несамостоятельного горения, который при обогащении смеси переходит в нестационарный режим, а затем в режим воспламенения. Определены границы существования стабильного горения при изменении начального давления в ресивере и величины разрядного тока.

Работа выполнена при финансовой поддержке комплексной программы научных исследований президиума РАН «Исследование вещества в экстремальных условиях» (подпрограмма 2 «Фундаментальные проблемы магнитоплазменной аэродинамики») и программы «Ориентированные фундаментальные исследования» (грант 07-01-12010).

Литература

1. Александров А.Ф., Ершов А.П., Колесников Е.Б. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 4. С. 77.

Поступила в редакцию 20.09.2007