

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Б. Г. Ефимов, С. И. Иншаков, В. В. Скворцов, Спектроскопические исследования взаимодействия струй пропана, введенных в сверхзвуковой поток воздуха, в условиях создания в одной из них неравновесного разряда, *ТВТ*, 2009, том 47, выпуск 3, 344–348

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.211.24.175

4 ноября 2024 г., 15:07:43



УДК 537.525

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУЙ ПРОПАНА, ВВЕДЕННЫХ В СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК ВОЗДУХА, В УСЛОВИЯХ СОЗДАНИЯ В ОДНОЙ ИЗ НИХ НЕРАВНОВЕСНОГО РАЗРЯДА

© 2009 г. Б. Г. Ефимов, С. И. Иншаков, В. В. Скворцов

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

Поступила в редакцию 04.03.2008 г.

Методами эмиссионной спектроскопии исследовано течение, возникавшее при инъекции в сверхзвуковой поток воздуха в продольном направлении струй пропана, которые были пространственно разнесены друг от друга в начальной области инъекции и в одной из которых создавался неравновесный разряд. Эксперименты выполнены при числе Маха $M = 2$, статическом давлении 3.47×10^4 Па и разрядном токе 1 А. Получены данные о составе и пространственном распределении излучающих продуктов, которые возникали в процессе преобразования топливовоздушной смеси в образующемся комбинированном течении. В частности, приведены данные о распределении интенсивности излучения радикалов C_2 , CN, CH, а также атомарных водорода и кислорода. Проведенные исследования позволили положительно ответить на ранее не исследовавшийся вопрос о возможности поджига топливовоздушной смеси в сверхзвуковом потоке, которая распространялась за пределами зоны реакций, поддерживаемой неравновесным разрядом. Установлено, что перераспределение топлива между основным потоком, в котором разряд отсутствует, и вспомогательным каналом, в котором создается разряд, может приводить к повышению эффективности процессов в основном потоке. Использованная методика позволила определить геометрию возникавшего течения в присутствии плазмохимических реакций.

PACS: 52.80.–s

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение неравновесных электрических разрядов, т.е. разрядов, в которых температура электронов значительно превышает температуру тяжелых компонент газовой среды, рассматривается как возможный эффективный метод решения задач инициирования и стабилизации горения топливовоздушных смесей в условиях аэродинамических течений, когда использование для этих целей традиционных методов затруднено. Это высокие скорости потока, низкие статические температуры и давления. Примерами исследований по разработке методик создания неравновесных разрядов для аэродинамических приложений являются публикации [1–7].

Традиционная схема соответствующих экспериментов состоит в том, что разряды создаются только в части общей области сверхзвукового течения, которая заполнена топливовоздушной смесью. Ее сечение в поперечном направлении обычно меньше, чем полное сечение, в котором необходимо осуществить поджиг смеси. При этом необходим ответ на вопрос, могут ли плазмохимические реакции, возникшие в некоторой области сверхзвукового потока и поддерживаемые неравновесным разрядом, вызвать развитие реакций за пределами этой области, где нет разряда. Для отве-

та на этот вопрос были проведены эксперименты, идея которых предложена проф. М.Н. Коганом (ЦАГИ).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились при числе Маха основного потока $M = 2$, статическом давлении 3.47×10^4 Па, единичном числе Рейнольдса $Re = 3 \times 10^7$ 1/м в аэродинамической трубе с достаточно большим (120×120 мм²) поперечным сечением, которое гарантировало отсутствие теплового запыриания трубы. Длина рабочей части равна 400 мм.

Схема модели, на которой проводились эксперименты, показана на рис. 1. Продольно-поперечный разряд создавался между анодом 1 из медной трубки, выполненным в двух вариантах (рис. 1а и 1б), и профилированной пластиной 2 из стали размером 60×120^2 мм (катодом). В варианте, показанном на рис. 1а, концевой участок анода, ориентированный вдоль потока, представлял собой трубку с внешним диаметром 4 мм и внутренним – 1.8 мм. В эту трубку была впаивалась дополнительная трубка 3, которая заканчивалась диэлектрической насадкой, чтобы разряд не привязывался на данную трубку. Внутренний диаметр этой трубки

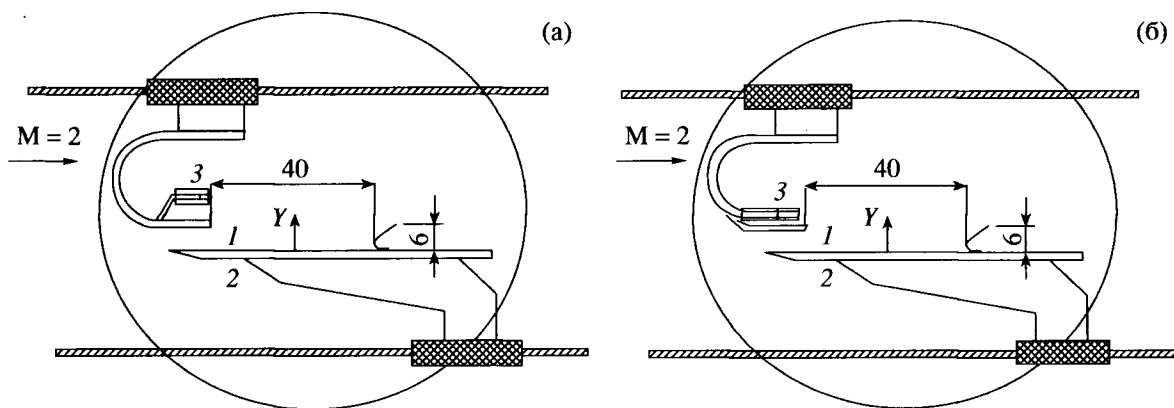


Рис. 1. Схематическое изображение модели. (а): 1 – трубчатый анод с внутренним диаметром 2 мм, 2 – пластина-катод, 3 – дополнительная трубка с диэлектрическим насадком с внутренним диаметром 0.9 мм; (б) 1 – трубчатый анод с внутренним диаметром 0.9 мм, 2 – пластина-катод, 3 – трубка из изолятора с внутренним диаметром 2 мм, через которую подавалась основная часть пропана.

составлял 0.9 мм. Пропан с расходом 0.8 г/с подавался через обе трубки. Расстояние между трубками изменялось подгибанием дополнительной трубки. Расстояние от нижней образующей анода до поверхности пластины устанавливалось равным 5.5 мм. При этом обеспечивался надежный пробой разрядного промежутка.

В варианте, показанном на рис. 1б, геометрия опыта была обращена по сравнению с рис. 1а: трубка меньшего диаметра с прежними геометрическими параметрами без диэлектрической насадки располагалась ближе к поверхности пластины и выполняла функции анода 1, а трубка большего диаметра, располагавшаяся над анодом, была выполнена из изолятора и имела наружный диаметр 4 мм, внутренний – 1.8 мм. Ось концевой части анода находилась на расстоянии 7 мм от поверхности пластины. Ось трубки из изолятора располагалась от пластины на расстоянии 11 мм. В этой геометрии опыта разряд горел только между трубкой-анодом и поверхностью пластины. Пропан при том же расходе 0.8 г/с мог подаваться как через обе трубки, так и только через одну из них.

Пластина устанавливалась так, что ее поверхность находилась в плоскости симметрии рабочей части аэродинамической трубы. На расстоянии 43 мм от среза анода на поверхности пластины был расположен интерцептор из латуни, который ограничивал область распространения разряда. Угол скоса поверхности интерцептора, обращенной к потоку, относительно плоскости пластины был равен 40° , высота интерцептора – 6 мм. Окружность, нанесенная на рис. 1, – граница окна рабочей части установки.

Эксперименты были выполнены при силе разрядного тока 1 А. Напряжение на разряде при подаче пропана составляло 2–2.2 кВ. Методом эмиссионной спектроскопии были исследованы распре-

деления интенсивности излучения ряда компонент (радикалов C_2 , CN, CH, атомарных кислорода и водорода), возникавших в результате плазмохимических реакций, в различных вариантах подачи пропана в сверхзвуковой поток, которые реализовались схемами, показанными на рис. 1. Для исследований использовался дифракционный спектрометр [7], который позволял производить регистрацию спектров в диапазоне длин волн от 220 до 980 нм при спектральном разрешении <0.2 нм и времени интегрирования каждого участка менее 1 с. Измерительный объем имел длину вдоль потока 6 мм, по линии визирования 5–6 мм и в вертикальном направлении (по оси Y) 1.5 мм. Небольшая высота измерительного объема в вертикальном направлении позволяла провести исследование распределения интенсивностей излучения по этому направлению. При этом приходилось мириться с неизбежным осреднением распределения по линии визирования. Эксперименты проведены при одинаковой настройке как оптической, так и электронной аппаратуры спектрометра для различных длин волн, что дало возможность сравнить распределения, полученные для различных условий. Для того чтобы избежать обрезания сигнала электронной аппаратурой, на входе в спектрометр был установлен нейтральный фильтр.

Примеры спектров, которые регистрировались на данной установке, при $M = 2$, статической температуре 160 К, статическом давлении 3.47×10^4 Па, но в контрагированном разряде, который горел в пропано-воздушной смеси, приведены в [7]. В рассматриваемых ниже экспериментах анализировались распределения интенсивностей для $\lambda = 387$ нм (кант полосы C_2), 410–420 нм (область излучения радикала CN), 431.4 нм (кант полосы CH), линий 656.3 нм атомарного водорода и 777 нм атомарного кислорода. Исследования про-

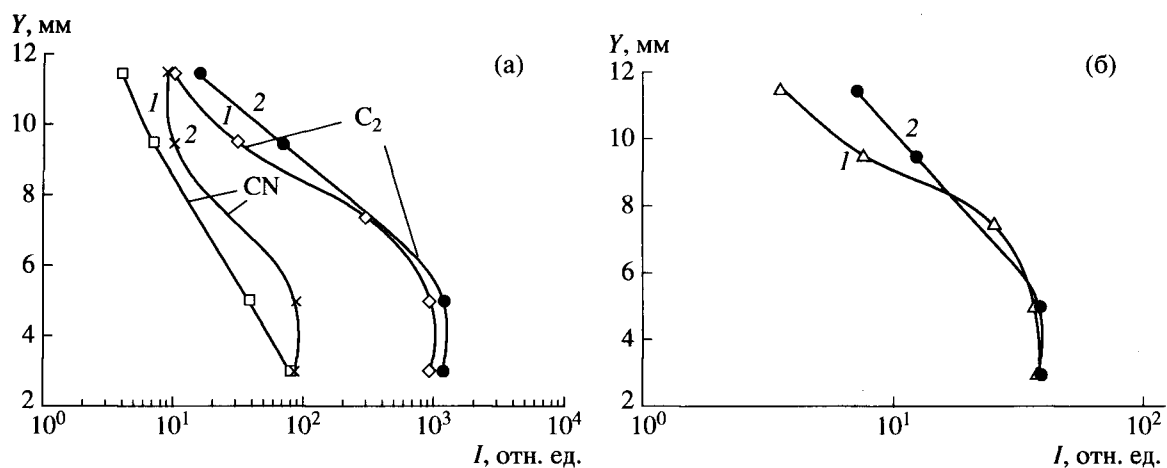


Рис. 2. Распределение интенсивности молекулярных компонент в варианте эксперимента, показанном на рис. 1а: (а) – C_2 (387 нм) и CN (410–420 нм), (б) – CH (431.4 нм).

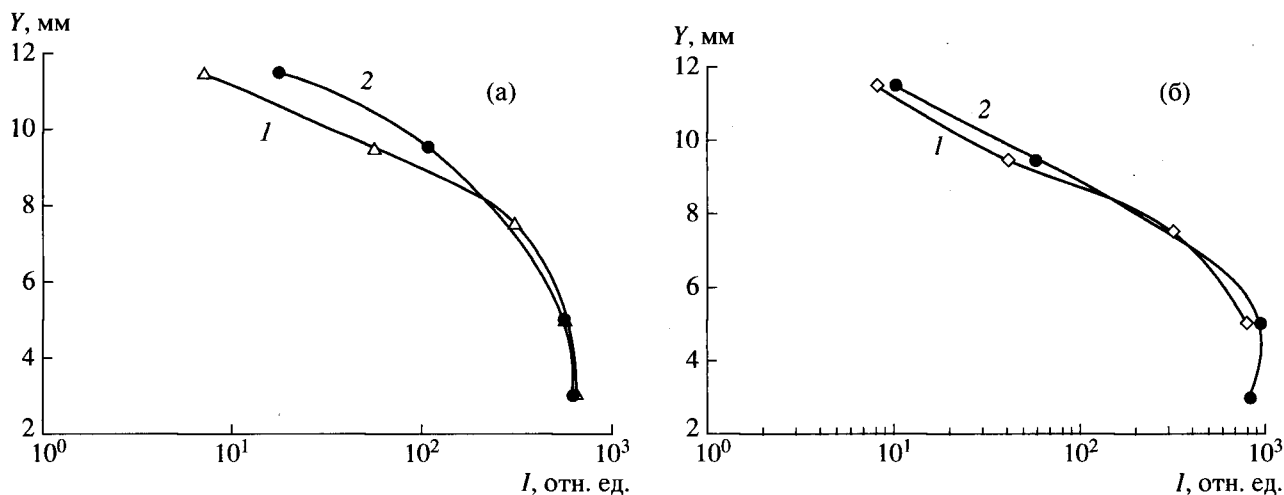


Рис. 3. Распределение интенсивности атомарных компонент в варианте эксперимента, показанном на рис. 1а: (а) – H (656.3 нм), (б) – O (777 нм).

водились в плоскости, которая находилась на расстоянии 34 мм от среза анода.

В случае геометрии, показанной на рис. 1а, по мере приближения дополнительной трубки, через которую подавался пропан, к оси основного разряда появлялось отличие в спектрограммах по сравнению с опытом, когда трубка была удалена на значительное расстояние. В частности, на рис. 2а дано сравнение распределений интенсивности излучения радикалов C_2 и CN по высоте над поверхностью пластины (координата Y отсчитывается от этой поверхности). Ось дополнительной трубки находилась на расстоянии 4 мм от оси основного разряда (11.5 мм от поверхности пластины). По визуальным наблюдениям ось разряда в зоне спектральных измерений проходила на расстоянии 4 мм от поверхности пластины, что согласуется с положением максимумов интенсивности

излучения, приведенным на рис. 2. Экспериментальные точки здесь и в дальнейшем аппроксимированы кубическим сплайном. Цифры 1 относятся к случаю, когда инжекция пропана через дополнительную трубку не влияла на распределение интенсивностей в зоне реакций, обусловленных подачей пропана через анод, цифры 2 – к случаю, когда процессы в основной зоне реакций распространялись и на дополнительную струю пропана. Видно, что это влияние захватывает область вплоть до оси дополнительной струи и, по-видимому, распространяется на более высокие значения Y .

Аналогичная ситуация с еще большим различием в соотношении интенсивностей наблюдается для радикала CH (рис. 2б). Такое же расширение области экзоэнергетических реакций при подаче части пропана через дополнительную трубку вне

зоны реакций, поддерживаемых разрядом, наблюдается для атомарного водорода (рис. 3а) и в меньшей степени для атомарного кислорода (рис. 3б).

Таким образом, проведенные исследования позволили положительно ответить на ранее не исследованный вопрос о возможности поджига топливовоздушной смеси в сверхзвуковом потоке, которая распространяется за пределами зоны реакций в стабилизирующем неравновесном разряде. Поперечный размер дополнительной области, в которой возникали реакции, был сравним с поперечным размером создаваемой струйки пропана.

В серии экспериментов, результаты которых представлены на рис. 4, 5, инициирование плазмохимических реакций проводилось в трех вариантах: 1) весь пропан подавался через анод – трубку с внутренним диаметром 0.9 мм (кривые на рис. 4, 5 обозначены цифрой 1); 2) с тем же расходом пропан подавался только через изолированную трубку с внутренним диаметром 1.8 мм (кривые 2); 3) пропан распределялся между трубкой с внутренним диаметром 1.8 мм и трубкой-анодом с внутренним диаметром 0.9 мм (кривые 3). В последних двух случаях разряд на сравнительно большом участке вдоль оси потока горел только между указанным анодом и поверхностью пластины, не распространяясь в область, где создавалось течение, вызванное инжекцией пропана через изолированную трубку 3 (рис. 1б). Из приведенных данных видно, что в последних двух случаях интенсивность реакций была значительно выше, чем в случае, когда весь пропан подавался через анод, по-видимому, из-за более благоприятного для развития реакций коэффициента избытка воздуха. При этом в случае, когда пропан подавался через обе трубки, интенсивность процессов образования продуктов плазмохимических реакций в максимумах распределений излучения компонент по оси Y была для радикалов CN и CH примерно в 3–5 раз, а для C_2 в 1.2–2 раза выше, чем для случая, когда весь пропан подавался через основную трубку. Аналогичные результаты получены и для атомарных компонент. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что перераспределение расхода топлива между основным и дополнительным каналами в условиях, когда разряд горит только по дополнительному каналу, может приводить к повышению эффективности развития процессов в основном потоке, где разряд отсутствует.

Можно отметить, что примененная методика спектральных измерений, как и в работе [7], позволила определить геометрию сложных течений с плазмохимическими реакциями для различных вариантов инжекции струй пропана. При вводе пропана только через одну трубку (анод или расположенную над ним основную трубку) область

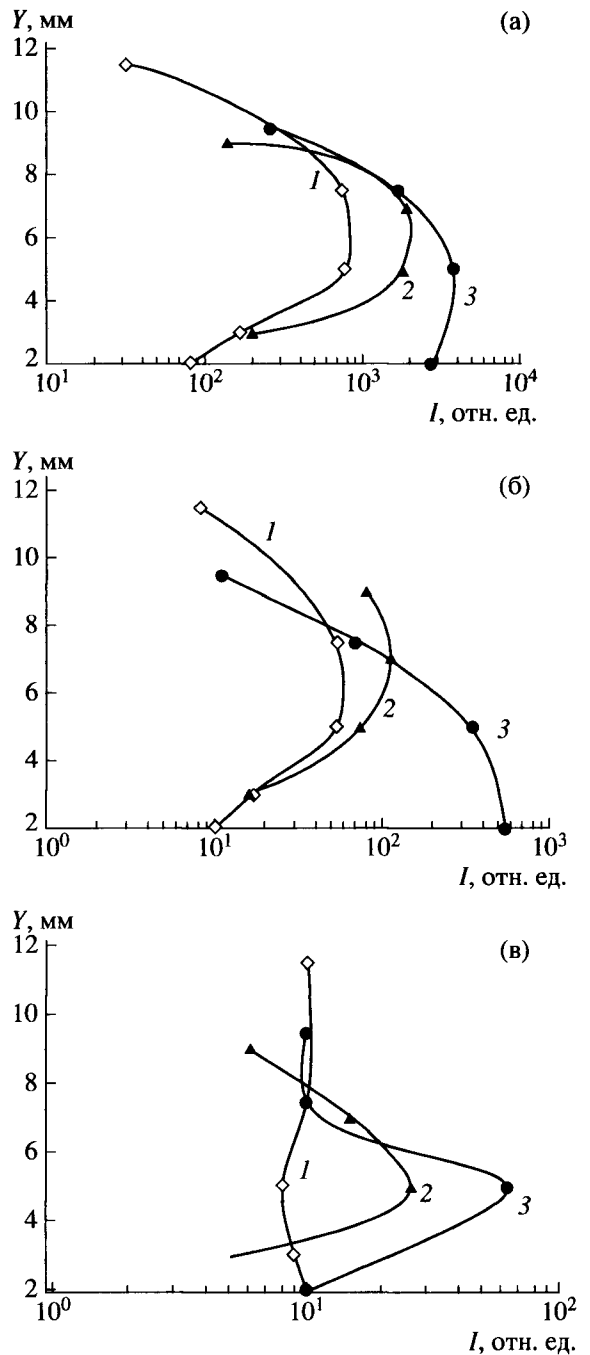


Рис. 4. Распределение интенсивности молекулярных компонент в варианте эксперимента, показанном на рис. 1б: (а) – C_2 (387 нм), (б) – CN (410–420 нм), (в) – CH (431.4 нм).

плазмохимического взаимодействия располагалась по оси анодной трубки, о чем свидетельствует положение максимумов в распределении интенсивностей радикала C_2 на рис. 4, кривые 1 и 2 (интенсивность излучения C_2 , согласно [8], сильно возрастает с увеличением концентрации пропана в смеси, в особенности при пониженных давлениях). При подаче пропана по двум каналам течение

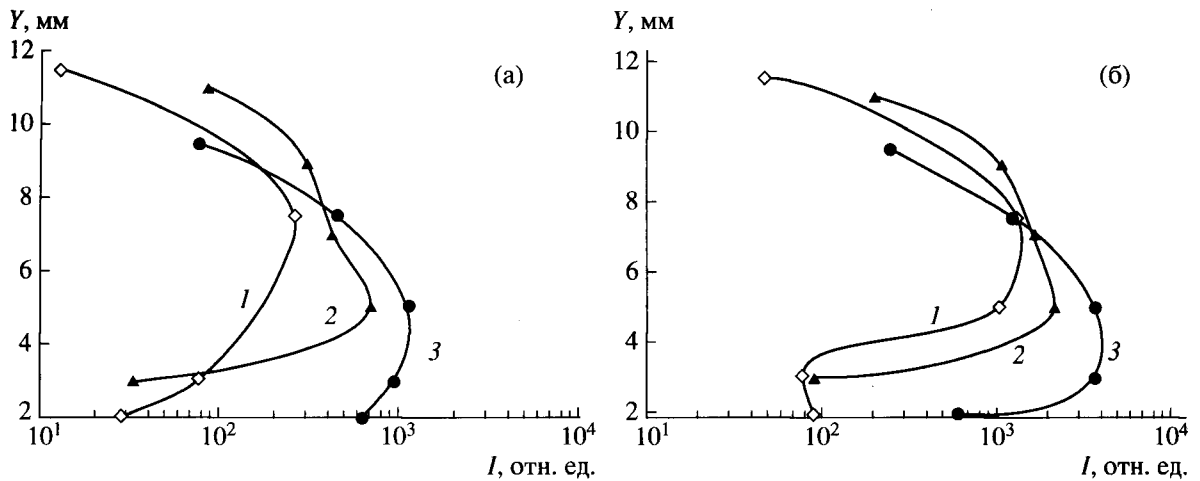


Рис. 5. Распределение интенсивности атомарных компонент в варианте эксперимента, показанном на рис. 1б: (а) – Н (656.3 нм), (б) – О (777 нм).

с плазмохимическим взаимодействием постепенно смещалось по направлению к пластине, в результате чего в области измерений на расстоянии 36 мм от среза анода максимум распределения интенсивностей радикала C_2 был зарегистрирован вблизи от пластины, на расстоянии 2–4 мм от нее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выполненной работе методами эмиссионной спектроскопии исследован вопрос о возможности распространения области плазмохимических реакций, сформированной неравновесным разрядом в сверхзвуковом потоке, за пределы этой области в направлении, ортогональном к направлению распространения потока, где разряд уже отсутствует. С этой целью в продольном направлении инжестрировались две струи пропана, разнесенные в начальном сечении пространственно друг от друга. В одной из струй создавался неравновесный продольно-поперечный разряд. Эксперименты выполнены при числе Маха $M = 2$, статическом давлении 3.47×10^4 Па и разрядном токе 1 А. Получены данные о распределении интенсивности излучения радикалов C_2 , CN, CH, а также атомарных водорода и кислорода. Проведенные исследования, в которых производилось постепенное сближение указанных струй, позволили положительно ответить на вопрос о возможности поджига топливовоздушной смеси в сверхзвуковом потоке за пределами области, где реакции поддерживаются разрядом. Установлено также, что, организовав взаимодействие струи с низким расходом топлива, в которой создан неравновесный разряд, со струей большего расхода и большего диаметра, в которой разряд отсутствует, можно обеспечить развитие плазмохимических реакций в последней из струй. В этом случае интенсив-

ность реакций может быть существенно выше, чем в случае, когда все топливо инжестрируется по каналу небольшого диаметра.

Авторы благодарят Б.В. Ларина за помощь в выполнении данной работы. Работа выполнена при поддержке Государственной программы поддержки ведущих научных школ (НШ-4272.2006.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klimov A., Bityirin V., Brovkin V. et al. Optimization of Plasma Generators for Plasma Assisted Combustion // AIAA-2001-2874.
2. Shibkov V.M., Alexandrov A.F., Chernikov A.V. et al. Freely Localized Microwave Discharge in Supersonic Flow // AIAA-2001-2946.
3. Esakov I.I., Grachev L.P., Khodataev K.V. Investigation of the Under – Critical Microwave Streamer Discharge for Jet Engine Fuel Ignition // AIAA-2001-2939.
4. Chernikov A., Ershov A., Shibkov V. et al. Gas Discharges in Supersonic Flows of Air-Propane Mixtures // AIAA-2001-2948.
5. Leonov S., Bituirin V., Savelkin K., Yarantsev D. Hydrocarbon Fuel Ignition in Separation Zone of High Speed Duct by Discharge Plasma // The 4th Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics for Aerospace Applications (Abstracts). Moscow. 9–11 April 2002. P. 56.
6. Aleksandrov N., Anikin N., Starikovskaia S.A. et al. Chemical Reactions and Ignition Initiation in Hydrocarbon-Air Mixtures by High-Voltage Nanosecond Gas Discharge // AIAA-2001-2949.
7. Иванов В.В., Скворцов В.В., Ефимов Б.Г. и др. Спектроскопические исследования продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при инжестрии пропана в зону разряда // ТВТ. 2008. Т. 46. № 1. С. 7.
8. Гейдон А. Спектроскопия пламен. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 382 с.