

УДК 537.525

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА В ПРИСУТСТВИИ НЕРАВНОВЕСНОГО РАЗРЯДА

©2011 Б. Г. Ефимов, В. В. Иванов, С. И. Иншаков, В. В. Скворцов, М. А. Стародубцев

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

Приведены результаты газодинамических и спектроскопических исследований возможности формирования пространственного положения продольного разряда в сверхзвуковом потоке с помощью искусственно создаваемой за анодом зоны разрежения при подаче углеводородного топлива в область разряда. Особенностью исследуемой конфигурации модуля является отсутствие привязки зоны горения к стенкам камеры сгорания. Благодаря использованию возникающей газодинамической особенности течения и неравновесного электрического разряда модуль данной конструкции как стабилизирует зону горения, так и интенсифицирует процессы смешения топлива. Эксперименты проводились при числе  $M=2$  и статическом давлении в потоке  $\sim 34,7$  кПа в аэродинамической трубе с закрытой рабочей частью квадратного сечения  $120 \times 120$  мм<sup>2</sup>. Ток разряда поддерживался на уровне 1 А, расход пропана, используемого как углеводородное топливо, составлял 1,2 г/с, керосина – 1,3 г/с. Проведено сопоставление распределений интенсивности излучения возникавших продуктов химических реакций при различных вариантах инъекции топлива.

*Сверхзвуковое течение, воспламенение, стабилизация горения, керосин, пропан, неравновесный разряд, рециркуляционная зона, плазмохимические реакции, эмиссионная спектроскопия.*

### Введение

В последние годы ведутся интенсивные исследования по применению электрических разрядов для инициирования и стабилизации горения в высокоскоростных потоках топливовоздушных смесей [1, 2]. Важную роль в постановке и развитии этого направления сыграли исследования, начатые в России [3, 4]. В рамках данной проблемы представляют интерес исследования по созданию вспомогательных модулей на основе неравновесных разрядов для поджига и стабилизации горения топлива [5, 6]. В результате этих исследований на базе продольного и продольно-поперечного разрядов были созданы образцы модулей с низким аэродинамическим сопротивлением. Они позволяют осуществлять инициирование и стабилизацию горения пропана в высокоскоростных потоках воздуха при низких статических температурах и давлениях при расположении модулей на стенках камер. В разработанных схемах топливо инжестировалось в область горения неравновес-

ного разряда спутно или по нормали в набегающий на пластину сверхзвуковой поток воздуха. В ходе дальнейших разработок была реализована конструкция модуля для поджига и стабилизации горения с низким аэродинамическим сопротивлением, у которой зона горения располагалась не на стенке, а в потоке за анодом специальной формы. В отличие от модуля с продольным разрядом, в ней возникает газодинамический эффект стабилизации зоны горения, который дополнительно интенсифицирует процессы, происходящие в самом разряде. В представленной работе приведены результаты исследований газодинамического течения, возникшего в таком модуле, и данные по спектроскопии зоны реакций.

### Схема электроразрядного модуля и расчётное газодинамическое исследование его обтекания

Схема модуля показана на рис. 1, а. Он включает в себя два электрода: латунный анод 1, выполненный в виде крыла с

полым ромбовидным профилем в поперечном сечении, и катод 2 из листа дюралюминия с двумя выступами. Передний выступ катода располагается под торцом анода с зазором 3–4 мм и предназначен для надёжного пробоя разрядного промежутка, задний выступ служит для замыкания анодной ветви разряда. Анод выполнен как комбинация вертикального и наклонного (угол скольжения  $45^{\circ}$ ) участков. На вертикальном участке анода имеется ряд отверстий диаметром 0,4 мм, расположенных с шагом 2 мм, для ввода струй пропана и керосина в сверхзвуковой поток воздуха.

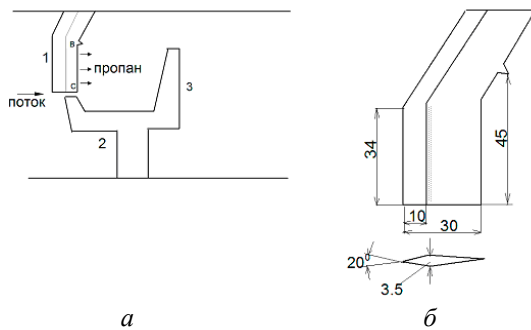


Рис. 1. Схема экспериментального устройства (а) и основные размеры анода в газоразрядном модуле (б)

Геометрические размеры анода показаны на рис.1, б. Модуль размещался в плоскости симметрии закрытой рабочей части аэродинамической трубы поперечным сечением  $120 \times 120 \text{ мм}^2$ . Эксперименты проводились при числе  $M=2$  и статическом давлении в потоке  $\sim 34,7 \text{ кПа}$ . Расход пропана составлял 1,2 г/с, керосина – 1,3 г/с. Ток разряда поддерживался на уровне 1 А, напряжение на разряде  $\sim 1,8\text{--}2,5 \text{ кВ}$ . После своего зажигания в сверхзвуковом потоке без подачи пропана разряд лишь при небольшой начальной величине тока ( $\leq 0,5 \text{ А}$ ) был привязан к угловой точке С (рис.1, а) анода. Дальнейшее увеличение тока приводило к тому, что точка привязки канала разряда к аноду скачком перемещалась приблизительно в среднее положение между точками В и С, сам канал занимал горизонтальное положение и имел контрагиро-

ванную форму. Для того, чтобы понять причины такого поведения канала разряда, были проведены визуализация течения воздуха за анодом и численные исследования его обтекания в отсутствии разряда.

Визуализация течения была осуществлена с помощью ввода в поток через отверстия в аноде мелкодисперсных капель керосина с внешней подсветкой возникающего течения. Она показала, что за анодом распространяется пелена капель, стягивающаяся к оси, проходящей через середину вертикального участка анода (рис.2). Экспериментальное исследование распределения статического давления показало, что в следе за анодом в этом месте образуется область с локальным минимумом статического давления. Область нестационарна как вдоль кромки электрода, так и в направлении потока.

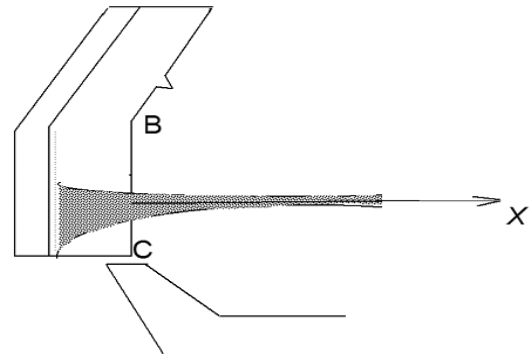


Рис. 2. Качественное изображение результатов визуализации течения за анодом с помощью мелкодисперсных капель керосина

Проведённое численное моделирование пространственной структуры течения качественно подтвердило результаты эксперимента. Численное моделирование пространственного течения выполнялось методом интегрирования усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, для замыкания которых использовалась  $k-\omega$  SST модель турбулентности [7]. При интегрировании уравнений использовался метод конечного объёма со вторым порядком точности, реализованный в программном пакете ANSYS CFX. Данный подход гарантировал выполнение законов сохранения энергии, массы и импульса в каждом элементарном объёме и обеспечи-

вал высокий порядок аппроксимации исходных уравнений. Обтекание электрода (рис.3, *a*) считалось стационарным и происходившим в отсутствие электрического разряда. Это позволило, оставаясь в рамках приближения совершенного газа, не прибегая к решению системы уравнений для кинетических реакций, инициированных электронным ударом, показать, что смещение точки привязки разряда с торца анода к середине вертикального участка ВС (рис.1), зарегистрированное в экспериментах, имеет аэродинамическую природу.

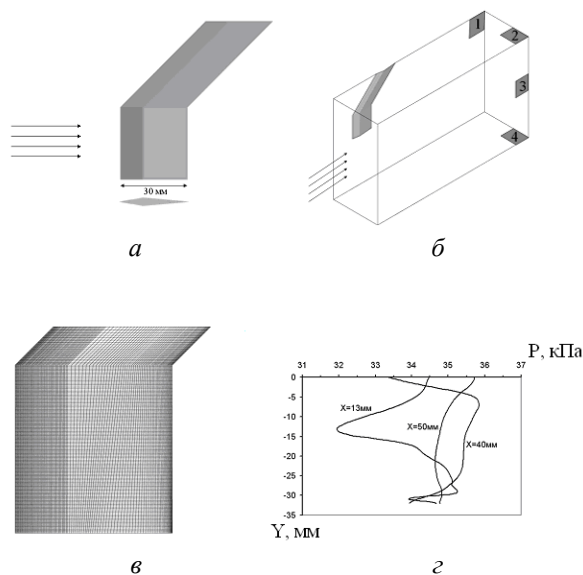


Рис.3. Параметры расчётной модели:  
*a* - используемая в расчетах геометрическая модель анода, *б* - внешний вид расчётной области, *в* - фрагмент расчётной сетки, *г* - распределение статического давления по высоте  $Y$  для ряда сечений  $X$  за моделью

Приведённые на рис.3, *г* графики распределений статического давления по высоте  $Y$  в средней плоскости течения за анодом для трёх значений координаты  $X$  ( $Y$  отсчитывается от точки В к С на рис.1, *a*;  $X$  – от задней кромки анода) наглядно иллюстрируют наличие локального минимума давления, который возникает в центральной зоне течения и вблизи анода находится на расстоянии 1,2–1,4 см выше его среза.

### Влияние возникающей газодинамической особенности на динамику электрического разряда в сверхзвуковом потоке

Как уже отмечалось, эксперименты показали, что после пробоя разрядного промежутка разряд только при небольших значениях тока был привязан к нижней кромке анода. При этом его канал локализовался между указанной кромкой и некоторой точкой на заднем выступе катода (рис.4). Однако при дальнейшем увеличении тока разрядный канал скачком переходил в новое стационарное состояние, располагаясь точно по оси газодинамической особенности (рис.5). Изменение расстояния между электродами в диапазоне 30–70 мм, смена полярности электродов, уменьшение высоты заднего выступа катода до уровня на 10 мм ниже оси разрядного канала не влияли на расположение канала разряда.

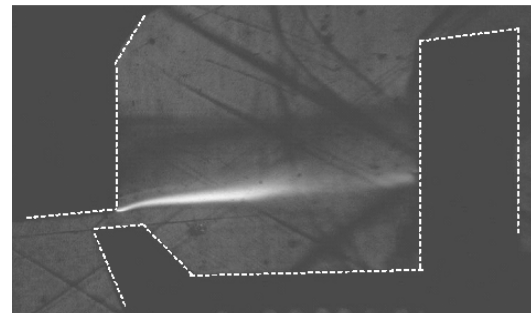


Рис. 4. Локализация разряда в промежутке анод–катод при низких значениях тока разряда

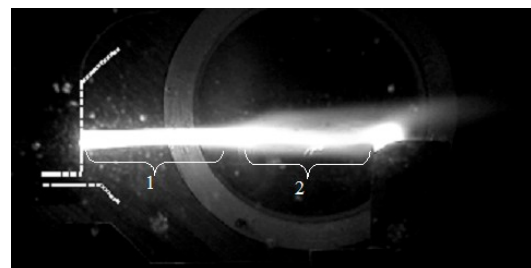


Рис. 5. Локализация разрядного канала при токе разряда  $\sim 1$  А

В последнем случае замыкание разряда на задний выступ катода осуществлялось веером микроразрядов, которые распространялись от основного канала разряда поперек потока.

Если верхняя кромка заднего выступа катода находилась выше оси разрядного канала, последний был полностью контрагирован. Сопоставление данного разряда с разрядом, исследовавшимся авторами в работе [8] на той же установке в близких условиях, позволяют считать его неравновесным разрядом с характерными значениями температуры электронов на уровне  $\sim 1,0\text{--}1,2$  эВ ( $T \sim 10^4\text{K}$ ), которая много больше температуры нейтрального газа и ионов. Данный разряд является разновидностью контрагированных неравновесных разрядов в сверхзвуковых потоках воздуха при средних значениях статических давлений. Те же результаты были получены для анода, выполненного в виде тонкого крыла, состоявшего из вертикального и наклонного участков такой же ширины, как и основной анод, без инъекции пропана. Когда же в экспериментах был использован анод прямоугольной формы, разряд всегда локализовался горизонтально между нижней кромкой анода и задним выступом катода. Все эти результаты свидетельствуют о том, что необходимым условием возникновения газодинамической особенности с локальным минимумом статического давления и скачкообразного изменения положения разрядного канала является выполнение анода в виде комбинации вертикального и наклонного участков.

Структура течения в отсутствие разряда такова, что за электродом в центральной зоне течения по координате  $Y$  возникают локальные минимумы статического давления (рис.3,  $z$ ) и соответственно плотности, расположенные в окрестности оси, проходящей через середину вертикального участка анода. При создании разряда наличие минимума концентрации нейтральных молекул азота влечёт за собой увеличение в данной области приведенного поля  $E/N$  и, как следствие, константы скорости ионизации, концентрации электронов и проводимости газа. Поэтому положение канала разряда стабилизируется в данной области. В ней же, по результатам визуализации с помощью ке-

росина, оказываются максимальными концентрации подаваемых топлив.

Рис.5 дает представление о структуре канала разряда при инъекции пропана (расстояние между задней кромкой анода и передней кромкой катода  $L$  равно 60 мм). На цветных фотографиях при подаче пропана в свечении канала в области 1 преобладает белый цвет с голубым ореолом по периферии, а в области 2 – голубой и зеленовато-голубой с значительным расширением области свечения и сохранением розового цвета вблизи оси канала. Розовое свечение обусловлено процессами в воздухе, а белое, голубое и зеленое – плазмохимическими реакциями в смеси пропана с воздухом. Обращает на себя внимание, что в условиях подачи пропана примерно с середины длины разрядного канала образуется область расширяющегося по потоку зеленовато-голубого свечения, охватывающего разрядный канал. Эту область, по-видимому, можно идентифицировать как зону диффузионного турбулентного горения. Фронт пламени имеет размытые контуры и значительную толщину. Стабилизации пламени при скорости потока воздуха  $\sim 500$  м/с способствуют, по-видимому, непрерывно действующий источник подвода энергии – токовый канал электрического разряда, проходящий через область максимальной концентрации пропана, и вихревая структура течения в зоне горения, создающая процесс самозажигания свежей смеси активными продуктами горения. Время движения потока газа через разрядный канал от анода до зоны горения (4-8 мкс) можно рассматривать как период индукции, то есть как время наработки активных центров, которые затем выносятся в зону турбулентного горения.

### Спектроскопические исследования разряда

В проведенных экспериментах методами эмиссионной спектроскопии было исследовано распределение интенсивности излучения компонент возникавших плазмохимических реакций в различных

зонах течения в промежутке анод–катод при распределённой по оси  $Y$  подаче пропана и керосина через анод. Напряжение на разряде при токе 1 А было равно примерно 2 кВ. Для исследований применялся спектрометр, разработанный в Институте спектроскопии РАН (г. Троицк) и описанный в [8].

Регистрация спектра проводилась в диапазоне от 220 до 980 нм при спектральном разрешении менее 0,2 нм. Спектры записывались на персональный компьютер. Время регистрации каждого участка спектра не превышало 0,5 с. Примеры записи спектров, полученных с помощью данного спектрометра в условиях, близких к рассматриваемым в данной работе, приведены в [8, 9]. Оптическая система спектрометра формировала измерительный объём высотой 1,5 мм по оси  $Y$ , 5–6 мм – по линии визирования, около 6 мм – вдоль оси  $X$ . Небольшая высота указанного объёма по координате  $Y$  дала возможность получить распределения интенсивности излучения различных компонент поперёк потока.

Преимущественно анализировались распределения интенсивности излучения радикалов  $C_2$ ,  $CN$ ,  $CH$ ,  $OH$ , молекулярного азота и атомарных водорода, кислорода, углерода, азота. Полосы радикалов выбирались в соответствии со справочными данными, приведёнными в монографии [10]. Рассматривались распределения интенсивностей для длин волн

$\lambda=385$  и  $516,5$  нм (канты полос  $C_2$ );  $305-310$  нм (область излучения  $OH$ );  $410-420$  нм и  $386,2-388,3$  нм (область излучения радикала  $CN$ ); излучение  $CH$  при  $\lambda=431,5$  нм; интенсивность излучения второй положительной системы азота при  $\lambda=337$  нм; его первой положительной системы при  $\lambda=615-630$  нм; интенсивность линий  $\lambda=656,3$  нм атомарного водорода,  $777$  и  $844,6$  нм атомарного кислорода,  $247,9$  нм углерода ( $C$ ). Соотношение интенсивностей существенно изменялось по длине разрядного промежутка и по  $Y$ . Поэтому на приводимых ниже рисунках представлены данные для наиболее интенсивных компонент, которые могли присутствовать в одной области значений  $Y$  и отсутствовать в другой. За координату  $Y=0$  принималась визуально видимая точка привязки разряда к аноду.

Подача пропана через анод осуществлялась в двух вариантах: либо через все отверстия, которые были расположены как выше, так и ниже линии, на которой располагался минимум статического давления, либо только через отверстия, расположенные ниже указанной линии. Эксперименты, выполненные при первом варианте инжекции пропана, показали, что плазмохимические реакции в данном варианте модуля начинаются уже на боковой стенке анода (рис.б, а), а не с его кромки, как можно было бы ожидать.

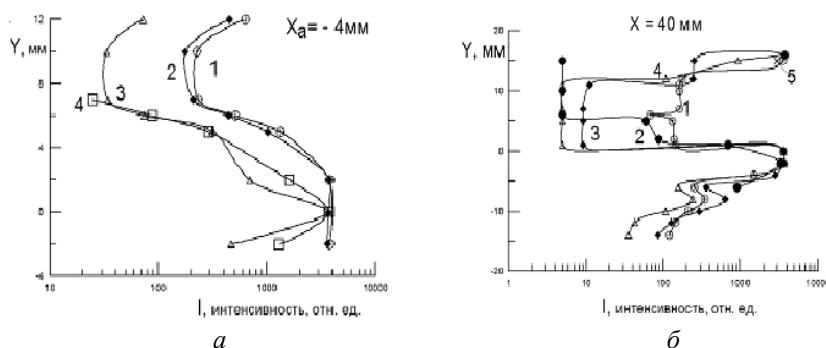


Рис. 6. Распределение интенсивности излучения продуктов плазмохимических реакций при подаче пропана по всей высоте анода: а - на расстоянии от задней кромки анода навстречу потоку воздуха  $X_a = -4$  мм: 1 -  $CN$  (388 нм), 2 -  $2^+N_2+C_2$ , 3 -  $OH$ , 4 -  $C$ ; б - на расстоянии от задней кромки анода по потоку  $X = 40$  мм: 1 -  $CN$  (388 нм), 2 -  $H_\alpha$ , 3 -  $2^+N_2+C_2$ , 4 -  $OH$ , 5 -  $CO$

Кроме основных компонент только на аноде было зарегистрировано появление атомарного углерода. Распределение по  $Y$  интенсивности излучения продуктов плазмохимических реакций в области значительного расширения разрядного канала ( $X=40$  мм) оказалось различным для молекулярных компонент и атомарного водорода (рис.6, б).

Для первой группы между областями со значительными уровнями интенсивности излучения (максимум одной из них соответствовал и линии привязки разряда к аноду, другая – лежала выше координаты  $Y=15$  мм) располагалась область, из которой излучение было ослаблено. Это качественно согласовывалось с визуальным наблюдением. Для атомарного водорода интенсивность излучения изменялась монотонно, достигая максимума на оси разряда.

Вместе с тем на расстояниях, близких к аноду (в области, где разряд имел вид шнура) и к катоду (например, при  $X=50$  мм) зона плазмохимических реакций перестраивалась, и интенсивность излучения молекулярных компонент также достигала максимума на оси разряда.

Второй вариант подачи пропана рассматривался как целесообразный, поскольку визуализация течения за этим электродом (рис.3) показала, что поток имеет чёткую тенденцию к стягиванию к середине электрода именно из области ниже точки привязки. Это должно приводить к более эффективной переработке топлива в разряде.

На рис.7 прослежено изменение в распределении интенсивности излучения радикалов ОН и СН (а) и атомарных кислорода и водорода (б) по координате  $X$  в

области 1 канала разряда (рис.5). Время экспозиции каждого участка спектра было уменьшено до 0,25 с для того, чтобы избежать зашкаливания спектрометра. Характерным в поведении этих распределений в центре разрядного канала оказалось то, что при удалении от анода уменьшение интенсивности излучения ОН, СН и  $O_{777}$  сменилось на ее увеличение при приближении к области расширения канала. Вместе с тем, интенсивность излучения водорода только уменьшалась.

Распределения интенсивности излучения тех же продуктов плазмохимических реакций для области канала разряда, в которой он резко расширился ( $X=42, 50$  и  $55$  мм), представлены на рис.8. Время экспозиции соответствующих участков спектра было равно 0.5 с. В этом случае тенденция в поведении распределений интенсивности излучения радикалов ОН и СН вблизи оси канала разряда имела разный характер: если для ОН наблюдалось увеличение интенсивности по мере приближения к катоду, то для СН она, наоборот, незначительно убывала от анода к катоду (рис.8, а).

Интенсивность излучения атомарного водорода нарастала при приближении к катоду, а атомарного кислорода – практически оставалась постоянной (рис.8, б).

Можно предположить, что характер изменения интенсивности излучения ОН скоррелирован с изменением концентрации атомарного водорода. Из результатов экспериментов, представленных на рис.7 и 8, видно, что линия максимумов интенсивности излучения лежала примерно на 2 мм ниже визуально видимой точки ( $Y=0$ ) привязки разряда к аноду.

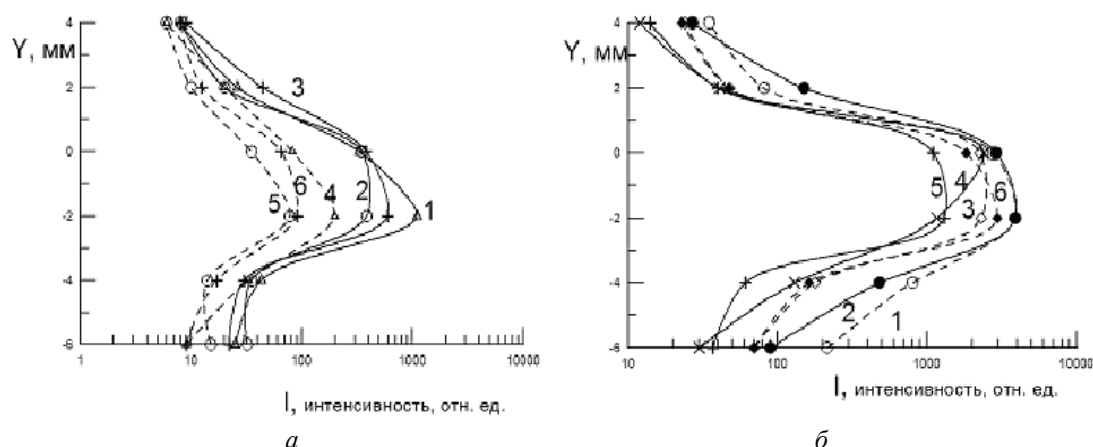


Рис.7. Распределения интенсивности излучения радикалов (а) и атомарных продуктов (б) плазмохимических реакций по длине токового шнура:

а - OH: 1 -  $X=14$  мм, 2 - 21 мм, 3 - 28 мм; CN: 4 -  $X=14$  мм, 5 - 21 мм, 6 - 28 мм;  
 б - O ( $I = 777$  нм): 1 -  $X=14$  мм, 3 - 21 мм, 6 - 28 мм;  $H_{\alpha}$ : 2 -  $X=14$  мм, 4 - 21 мм, 5 - 28 мм

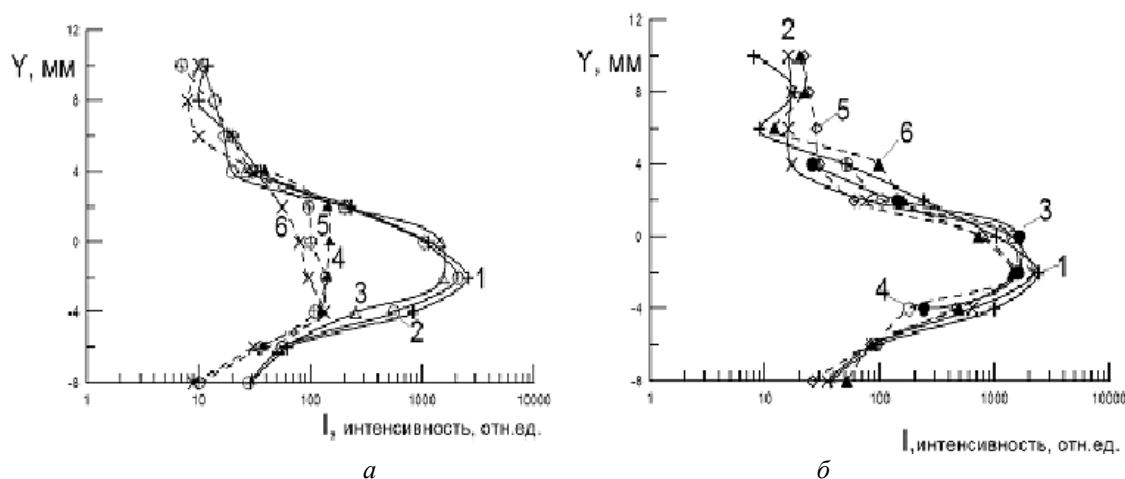


Рис.8. Распределения интенсивности излучения радикалов (а) и атомарных продуктов (б) плазмохимических реакций по длине нестационарного участка канала разряда:

а - OH: 1 -  $X=55$  мм, 2 - 50 мм, 3 - 42 мм; CN: 4 -  $X=42$  мм, 5 - 50 мм, 6 - 55 мм;  
 б -  $H_{\alpha}$ : 1 -  $X=55$  мм, 2 - 50 мм, 3 - 42 мм; O ( $I = 777$  нм): 4 -  $X=42$  мм, 5 - 50 мм, 6 - 55 мм

Эксперименты с керосином в качестве исходного топлива были выполнены при мелкодисперсной подаче последнего через отверстия в аноде, большинство которых находилось ниже точки привязки разряда к прямоугольной части этого электрода. Расход керосина был равен 1,3 г/с. Ток разряда поддерживался равным 1 А. Напряжение на разряде составляло 1,8–1,9 кВ. Эксперименты проводились при расстоянии  $L$  между задней кромкой анода и передней кромкой катода, равном 50 мм, при котором обеспечивалось устойчивое горение разряда.

В случае подачи керосина свечение разряда выглядело бело-голубым в отличие от розового свечения в отсутствие подачи керосина. Вместе с тем, при подаче керосина разряд уже не имел четкой привязки к определенной локальной зоне на аноде и визуально занимал по оси  $Y$  более широкую область. Результаты обработки серии спектроскопических измерений показали, что в разряде возникают те же продукты плазмохимических реакций, как и для пропана, включая радикалы OH и CN. Наиболее интенсивным было излучение радикала CN на длине волны 388,3 нм

и атомарных кислорода при  $\lambda = 777$  нм и линии водорода  $H_{\alpha}$ .

Сопоставление этих распределений с аналогичными распределениями для пропана показывает, что в случае керосина область плазмохимических реакций была более широкой по вертикальной координате, что согласуется с результатами визуальных наблюдений. Другая особенность состояла в том, что относительная доля излучения радикалов OH и CN в сравнении с наиболее интенсивно излучающими компонентами CN и  $2^+N_2$  была в случае керосина более низкой.

### Заключение

Реализован и исследован электро-разрядный модуль с низким аэродинамическим сопротивлением в сверхзвуковом потоке. Модуль стабилизирует зону горения и интенсифицирует процессы смешения топлива, при этом зона горения находится вдали от стенок камеры сгорания.

Экспериментом и численным расчётом показано, что область пониженного давления за анодом, где локализуется разряд и зона горения, имеет газодинамическую природу.

Методом эмиссионной спектроскопии установлено, что в разряде, формируемом в таком модуле, при инъекции в него пропана и керосина происходит их глубокая переработка с образованием ряда химически активных свободных радикалов, а также атомарных кислорода и водорода. Получены профили интенсивности излучения продуктов плазмохимических реакций в различных областях возникающего течения.

Данная работа демонстрирует один из перспективных путей создания сверхзвуковых камер сгорания для ГПВРД.

### Библиографический список

1. Магнитоплазменная аэродинамика в аэрокосмических приложениях [Текст]: / тр. междунар. совещаний. –М.: ИВТАН, 2001–2009.

2. Weakly Ionized Gases Workshops. USAF Academy. Anaheim, Reno, Orlando. 2001-2009. USA.

3. Proceedings of 3 rd Workshop “PA and MHD in Aerospace Applications”. (2001; Moscow)./ V.Bityurin, A.Bocharov, A.Brovkin [et al]. Van Wie D.M. Plasma Assisted Combustion / M. IVTAN. P. 33-51.

4. Proceedings of 5 th Workshop “PA and MHD in Aerospace Applications”. (2003. Moscow)./ S.Leonov, V.Bityurin, K.Savelkin [et al]. Plasma-Induced Ignition and Plasma Assisted Combustion of Fuel in High Speed Flow / IVTAN. P. 172-183.

5. Иванов, В.В. Исследование течений около пластины в присутствии экзо-энергетических процессов, обусловленных взаимодействием неравновесного электрического разряда и пропановоздушной смеси [Текст]/ В.В. Иванов, М.Н. Коган, В.В. Скворцов// Изв. РАН. МЖГ, 2006. - № 3. - С. 163-168.

6. Ефимов, Б.Г. Инициирование и стабилизация горения при низких давлениях и температуре с помощью неравновесного электрического разряда [Текст]/ Б.Г. Ефимов, В.В. Иванов, В.В. Скворцов// Изв. РАН. МЖГ, 2008. - № 5. - С. 155-160.

7. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [Text]/ F.R. Menter // AIAA Journal, 1994. V. 32. No 8. P. 1598-1610.

8. Спектроскопические исследования продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при инъекции пропана в зону разряда [Текст]/ В.В. Иванов, В.В. Скворцов, Б.Г. Ефимов [и др.]. // ТВТ. - 2008. - Т.46. - №1. - С.7-13.

9. Исследование структуры зоны плазмохимических реакций за экраном в сверхзвуковом потоке при инъекции керосина и пропана под экран в присутствии неравновесного разряда [Текст] / Б.Г. Ефимов, В.В. Иванов, С.И. Иншаков [и др.]. // ТВТ. - 2010. - Т.48. - №2. - С.169-174.

10. Гейдон, А. Спектроскопия пламен [Текст] / А. Гейдон. - М.: Изд-во Иностр. лит., 1959. - 382 с.



## RESEARCH OF THE ZONE OF PLASMACHEMICAL REACTIONS IN A SUPERSONIC AIR FLOW IN THE PRESENCE OF NON-EQUILIBRIUM ELECTRIC DISCHARGE

© 2011 B. G. Yefimov, V. V. Ivanov, S. I. Inshakov, V. V. Skvortsov, M. A. Starodubtsev

Central Aerohydrodynamic Institute named after N. Ye. Zhukovsky  
Zhukovsky, Moscow region

The paper presents the results of gasodynamic and spectroscopic studies of the possibility of creating the spatial position of longitudinal discharge in a supersonic flow with the help of the vacuum area formed behind the anode when hydrocarbon fuel is fed into the discharge zone. The peculiarity of the module configuration under study is that the burning zone is not close to the walls of the combustion chamber. Due to using the gasodynamic peculiarity of flow and nonequilibrium electric discharge the module of the structure both stabilizes the burning area and intensifies the processes of fuel mixing. The experiments were carried out at  $M=2$  and static pressure in the flow  $\sim 34.7$  kPa in the wind tunnel with the closed  $120 \times 120$  mm<sup>2</sup> working section. The discharge current was maintained at 1A, the consumption of propane used as hydrocarbon fuel was 1.2 g/s, that of kerosene – 1.3 g/s. The distributions of intensity of emission of the products of chemical reactions using various methods of fuel injection were compared.

*Supersonic flow, ignition, stabilization of burning, kerosene, propane, nonequilibrium electric discharge, recirculation zone, plasmachemical reactions, emission spectroscopy.*

### Информация об авторах

**Ефимов Борис Гаврилович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. Область научных интересов: газодинамика, горение, аэродинамический эксперимент.

**Иванов Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. Область научных интересов: газодинамика, спектроскопия, аэродинамический эксперимент, оптика.

**Иншаков Сергей Иванович**, кандидат технических наук, доцент, начальник сектора, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. Область научных интересов: газодинамика, спектроскопия, аэродинамический эксперимент, интерферометрия, оптика.

**Скворцов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор, начальник сектора, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. Область научных интересов: газодинамика, горение, неравновесные плазмохимические реакции, аэродинамический эксперимент.

**Стародубцев Михаил Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского. Область научных интересов: вычислительная газодинамика, численный эксперимент, разностные схемы.

**Yefimov Boris Gavrilovich**, c. t. s., leading research worker, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. Ye. Zhukovsky. Area of research: gas dynamics, burning, aerodynamic experiment.

**Ivanov Vladimir Vladimirovich**, c. t. s., leading research worker, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. Ye. Zhukovsky. Area of research: gas dynamics, spectroscopy, aerodynamic experiment, optics.

**Inshakov Sergey Ivanovich**, c. t. s., docent, head of sector, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. Ye. Zhukovsky. Area of research: gas dynamic, spectroscopy, aerodynamic experiment, interferometry, optics.

**Skvortsov Vladimir Vladimirovich**, d. t. s., professor, head of sector, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. Ye. Zhukovsky. Area of research: gas dynamics, burning, nonequilibrium plasmachemical reactions, aerodynamic experiment.

**Starodubtsev Mikhail Aleksandrovich**, c. ph.-m. s., senior research worker, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. Ye. Zhukovsky. Area of research: computational gas dynamics, numerical experiment.