

Общероссийский математический портал

В. В. Иванов, В. В. Скворцов, Б. Г. Ефимов, А. М. Пындик, А. Ю. Киреев, В. Н. Крашенинников, С. В. Шиленков, Спектроскопические исследования продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при инъекции пропана в зону разряда, *ТВТ*, 2008, том 46, выпуск 1, 7–14

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: 18.97.14.81

26 марта 2025 г., 16:59:46



ИССЛЕДОВАНИЕ
ПЛАЗМЫ

УДК 537.525

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОДОЛЬНОГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА
ПРИ ИНЖЕКЦИИ ПРОПАНА В ЗОНУ РАЗРЯДА© 2008 г. В. В. Иванов*, В. В. Скворцов*, Б. Г. Ефимов*, А. М. Пындык**,
А. Ю. Киреев*, В. Н. Крашенинников**, С. В. Шиленков*

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

**Институт спектроскопии РАН, г. Троицк

Поступила в редакцию 23.10.2006 г.

Приведены результаты исследований продольного контрагированного электрического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при числе Маха $M = 2$, статическом давлении 3.47×10^4 Па (260 Тор) и разрядном токе 1 А, при инжекции пропана в зону разряда через расположенный выше по потоку электрод. Особенность разряда состояла в том, что в нем реализовалась практически одна, анодная, ветвь. Методами эмиссионной спектроскопии получены данные о составе излучающих продуктов, которые возникали в процессах преобразования топливовоздушной смеси в разряде, и их пространственном распределении. В частности, приведены данные о распределении интенсивности излучения радикалов C_2 , OH, CN, CH, а также атомарных водорода, кислорода, углерода, азота в ряде сечений разрядного канала. Установлено, что основной зоне реакций в таком канале предшествует зона индукции, где развитие реакций затруднено, несмотря на протекание в ней потока электронов. Исползованная методика позволила определить изменение поперечных размеров разрядного канала по длине и такие детали течения, как постепенное смещение газодинамических линий тока, обусловленное характером обтекания электродов. В результате анализа распределения интенсивности излучения в спектре атомарного кислорода в разряде без инжекции пропана получены оценки температуры электронов, которая оказалась равной примерно 1.1–1.2 эВ.

PACS: 52.70.Kz, 52.80.-s

ВВЕДЕНИЕ

Применение электрических разрядов рассматривается (см., например, [1–6]) как возможный эффективный метод решения проблем иницирования и стабилизации горения топливовоздушных смесей в прикладных аэродинамических задачах в условиях, когда использование для этих целей традиционных методов затруднено (высокие скорости потока, низкие статические температуры и давления).

Судя по параметрам использовавшихся в [1–6] дуговых источников, они инжестировали приблизительно равновесную плазму, т.е. плазму, в которой температура электронов близка к температуре тяжелых компонент. В работе [6] отмечалось, что плазменные струи, создаваемые дуговыми источниками, не обладают интенсивностью, достаточной для самостоятельного проникновения поперек потока в область основного течения, и необходимо тщательное сочетание устройств для инжекции топлива и таких плазматронов, которые способны усилить эффект проникновения плазменной струи, например путем создания выше по потоку вихревых структур.

Вместе с тем известно, что многие плазмохимические процессы идут более эффективно, если

возбуждаются высоко расположенные колебательные уровни молекул. Если для этой цели используются электрические разряды, необходимо, чтобы температура электронов в создаваемой ими плазме была достаточно высокой. Именно такими свойствами обладают неравновесные разряды, в которых температура электронов значительно превышает температуру нейтральных молекул и ионов. Для неравновесных разрядов характерной является температура электронов порядка 1 эВ [7, 8]. При создании неравновесных разрядов в смесях углеводородных топлив с воздухом происходит диссоциация молекул, образуются свободные радикалы, имеющие ненасыщенные валентные связи, возникают атомарные кислород и водород, которые активно участвуют в химических реакциях. Перечисленные компоненты могут быть центрами цепных реакций и цепного воспламенения [9]. Последний тип воспламенения существует независимо от теплового механизма и может ускорять результирующий процесс воспламенения в условиях, когда действие теплового механизма затруднено. В аэродинамике, как уже отмечалось, это – низкие статические температуры и низкие статические давления. Примерами исследований по разработке методик примене-

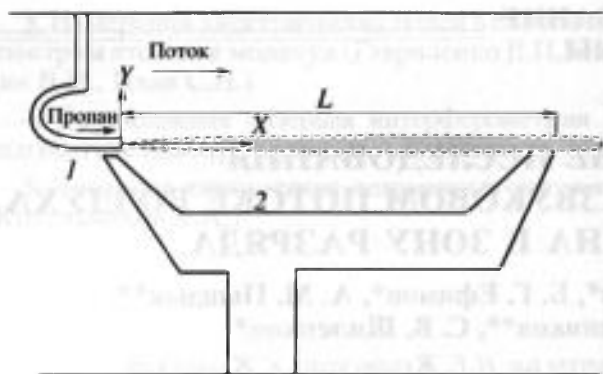


Рис. 1. Схема создания продольного разряда.

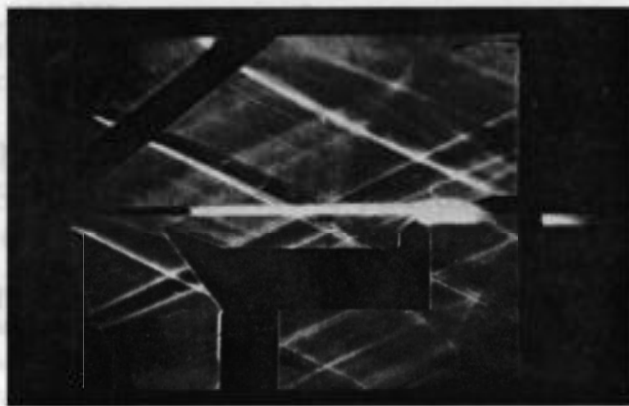


Рис. 2. Теневое изображение течения с продольным разрядом.

ния неравновесных разрядов (СВЧ-разряды, импульсные, импульсно-периодические разряды) для аэродинамических приложений являются публикации [10–14]. В выполненном исследовании использовалась методика создания неравновесного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, опубликованная в [15]. Разряд, создаваемый по этой методике, в зависимости от условий в потоке, геометрии электродов и подведенной мощности может быть как продольным по отношению к вектору скорости потока, так и продольно-поперечным. Методика позволяет реализовать разряд практически в любом месте основного потока на удалении от стенок, ограничивающих поток. Для целей исследования вопросов применения такого разряда как метода инициирования экзоэнергетических реакций в топливовоздушных смесях была реализована схема инъекции в него пропана. Ниже рассматриваются результаты спектроскопических исследований разряда в этих условиях.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ РАЗРЯДА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема создания продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха представлена на рис. 1. Разряд создавался между выполненным из меди или латуни электродом 1, концевой участок которого был ориентирован вдоль потока, и профилированной пластиной 2 из дюралюминия, имевшей два выступа. Ближний к верхнему электроду выступ предназначен для надежного пробоя разрядного промежутка. После зажигания разряда он сносился потоком вдоль пластины и при определенной величине разрядного тока контрагировал, замыкаясь в основном на дальний от верхнего электрода выступ. Теневая фотография разряда в случае реализации такого режима приведена на рис. 2. Исследования показали, что при такой форме разряд имел низкий (до 3–5%) уровень

пульсаций тока в отличие от ситуаций, когда он мог замыкаться на различных участках пластины. Длина L разрядного промежутка при статическом давлении 3.47×10^4 Па и токе разряда 1 А составляла 70–80 мм, если $M = 2$, и 40 мм, если $M = 2.5$ или $M = 0.65$ –0.7. При проведении экспериментов с инъекцией в разряд пропана его подача осуществлялась через верхний электрод, для чего последний был выполнен из трубки, которая заканчивалась круглым или овальным отверстием. Разработанная методика позволяла проводить эксперименты при длительном непрерывном горении разряда. Характерные времена горения разряда составляли 5–7 мин при возможности многократного использования одной и той же сборки электродов. Вариант разряда, когда верхний электрод был анодом, обеспечивал низкую эрозию электродов. В ряде случаев взаимодействие набегающего потока с трубчатым электродом приводило к отклонению потока и вместе с ним разряда от горизонтали. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе с достаточно большим (120×120 мм) поперечным сечением рабочей части, которое гарантировало отсутствие теплового запираания трубы. Длина рабочей части трубы была равна 400 мм.

На основании исследований распределения температуры в следе за разрядом термометрическим методом, которые были выполнены на достаточно большом расстоянии от среза катода в зоне, где сам разряд уже отсутствовал, и оценок по этим распределениям приобретенной потоком энтальпии найдено, что при $M = 0.6$ –0.7 доля прореагировавшего пропана составляла около 30%, а при $M = 2$ она была равна примерно 12.5%.

В проведенных экспериментах методом эмиссионной спектроскопии было исследовано распределение интенсивности излучения ряда компонент, возникавших в результате плазмохимических реакций в пропано-воздушном потоке в зоне разряда.

Разработанный малогабаритный дифракционный спектрометр позволял путем нескольких оперативных перенастроек производить регистрацию спектров с записью их на персональный компьютер в диапазоне длин волн от 220 до 885 нм (полный спектральный диапазон прибора составляет 190–1080 нм) при спектральном разрешении менее 0.2 нм и времени интегрирования каждого участка спектра менее 1 с. Чувствительность аппаратуры позволяла с высоким отношением сигнал/шум регистрировать колебательно-вращательные полосы радикала C_2 и других радикалов, линии атомарного кислорода, линии H_α , H_β водорода и др. 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 позволила провести исследование распределения интенсивности излучения по вертикали. При этом приходилось мириться с неизбежным осреднением распределений по координате Z . Для обеспечения возможности регистрации спектра как в видимом, так и ультрафиолетовом диапазоне длин волн окно рабочей части аэродинамической трубы было выполнено из кварца. Эксперименты проведены при одинаковой настройке как оптической, так и электронной аппаратуры для различных диапазонов длин волн, что дало возможность сравнить распределения, получаемые для различных условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились при следующих условиях: $M = 2$, статическое давление – 3.47×10^4 Па, расход пропана $G = 1\text{--}2$ г/с, разрядный ток – 1 А, напряжение на разряде – 1.5–2.5 кВ.

Полученные спектры для некоторых диапазонов длин волн приведены на рис. 3.

Общий вывод из расшифровок полученных спектров состоял в том, что при инжекции пропана в зону разряда в ней возникали свободные радикалы C_2 , CN, NH, CH, OH, а также одноатомные водород, кислород, азот, углерод, причем интенсивность излучения в линиях H_α водорода и 777 нм кислорода могла быть в 35–60 раз выше уровня фона, что, по-видимому, свидетельствует о глубокой переработке исходного пропана и активной наработке участвующих в реакциях атомов. Вместе с тем при оптимальном уровне сигнала для регистрации основных компонент в спектре не появлялись полосы, соответствующие излучению формальдегида H_2CO и альдегидной группы HCO, которые должны были бы наблюдаться (по идентификации, приведенной в [16]), если бы исследуемый спектр был спектром холодного пла-

мени или спектром свечения, предшествующего воспламенению.

По распределению интенсивности излучения в спектре атомарного кислорода в разряде без инжекции пропана были получены оценки температуры электронов. Она оказалась лежащей в диапазоне от 12 300 до 14 300 К. При определении температуры использовалась методика построения синтетических спектров с привлечением разработанной программы для определения характеристик воздуха и сложных газовых смесей при высоких температурах и попарного сравнения интенсивностей в линиях: 777 нм и 823 нм (триплеты), 777 нм (триплет) и 807.3 нм (линия), 777 нм (триплет) и 624.2 нм (линия). При анализе учитывались три момента: 1) распределение интенсивностей в зарегистрированном спектре приблизительно имело больцмановскую зависимость от энергии квантов, 2) энергия анализировавшихся возбужденных состояний была велика по сравнению с температурой электронов, 3) распределение интенсивности излучения в спектре кислорода в рассматриваемых условиях формировалось в основном благодаря неупругим столкновениям электронов с атомами.

В дальнейшем преимущественно рассматриваются распределения интенсивностей для $\lambda = 516.5$ нм (кант полосы C_2); 410–420 нм (область излучения радикала CN); 305–310 нм (область излучения OH); 431.4 нм (кант полосы CH), 615–630 нм (область излучения N_2); линии $\lambda = 656.3$ нм атомарного водорода, 844.6 нм кислорода (O), 247.9 нм углерода (C) и 742.4 нм азота (N). Техническими факторами, определившими выбор перечисленных областей и длин волн, было отсутствие наложения на них излучения других компонент, а также обрезания сигнала электронной аппаратурой спектрометра. По последней причине на ряде рисунков не приводятся распределения интенсивности для триплета 777 нм атомарного кислорода.

Исследование распределения интенсивности излучения в выбранных спектральных компонентах проводилось в основном на трех расстояниях X от среза верхнего электрода: 10, 20 и 50 мм. Кроме того, ряд распределений был получен на расстоянии 5 мм от среза этого электрода и 76 мм, т.е. уже за срезом катода (полная длина L была равна 71 мм).

Полученные распределения интенсивностей приведены на рис. 4–9 и разбиты на две группы. В первой из них (рис. 4–6) представлены данные в основном для молекулярных компонент (C_2 , OH, CN, CH, N_2) и атомарного водорода H, во второй (рис. 7–9) – для атомарных компонент C, H, O, N. Координата Y отсчитывается по вертикали от оси, соединяющей центр среза анода и край дальнего от него выступа катода. За положительное

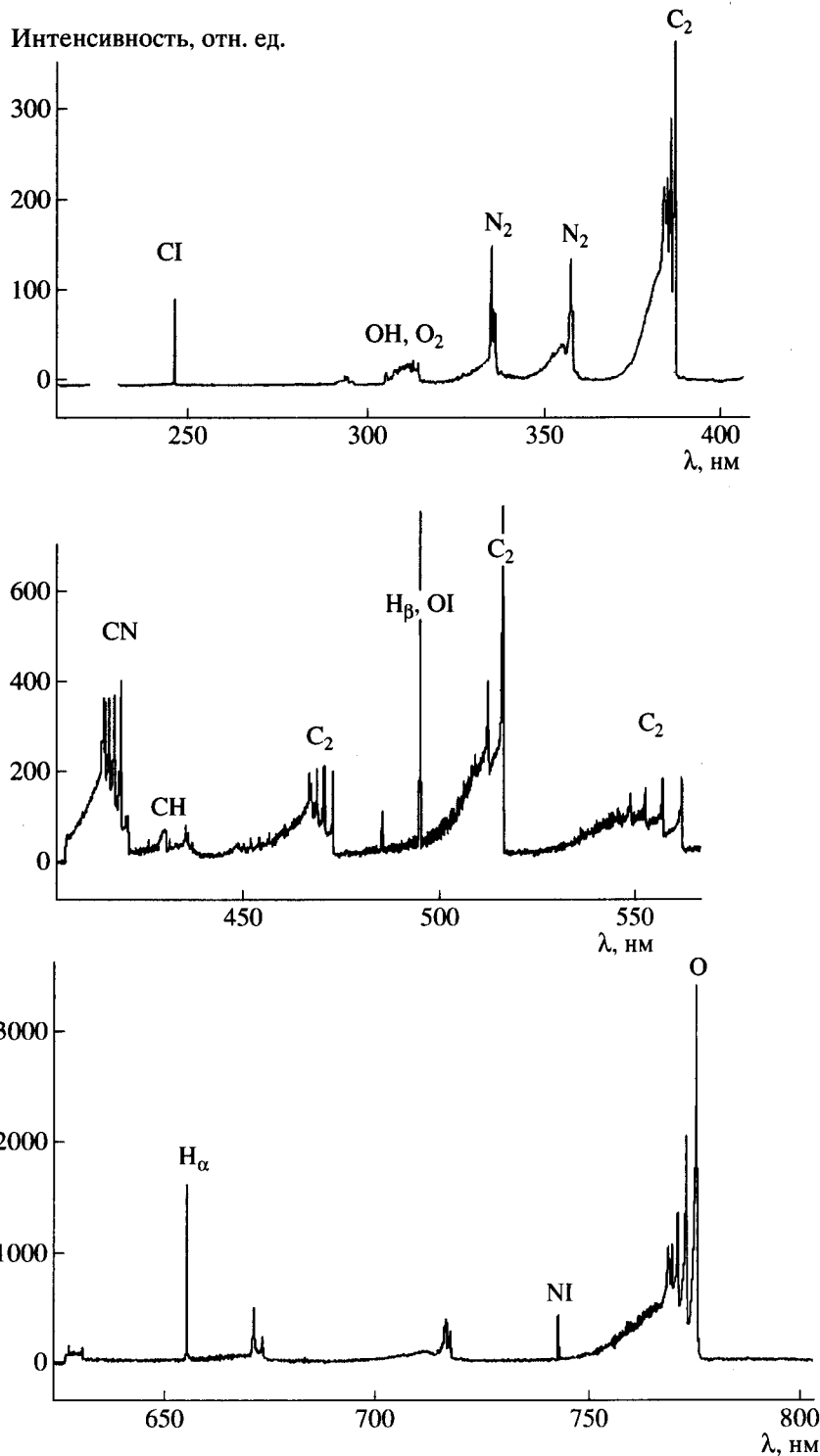


Рис. 3. Эмиссионные спектры, полученные в продольном разряде при инъекции пропана.

направление Y принято направление вверх от катода. На приведенных рисунках через "clip" обозначен уровень обрезания сигнала электронной аппаратурой спектрометра. Данные для $X = 5$ и 76 мм (на рис. 4 и 6 соответственно) обозначены

такими же по форме, но более мелкими символами, как и для других значений координаты X .

Полученные экспериментальные распределения позволяют сделать вполне определенные выводы относительно геометрии зоны разряда, в кото-

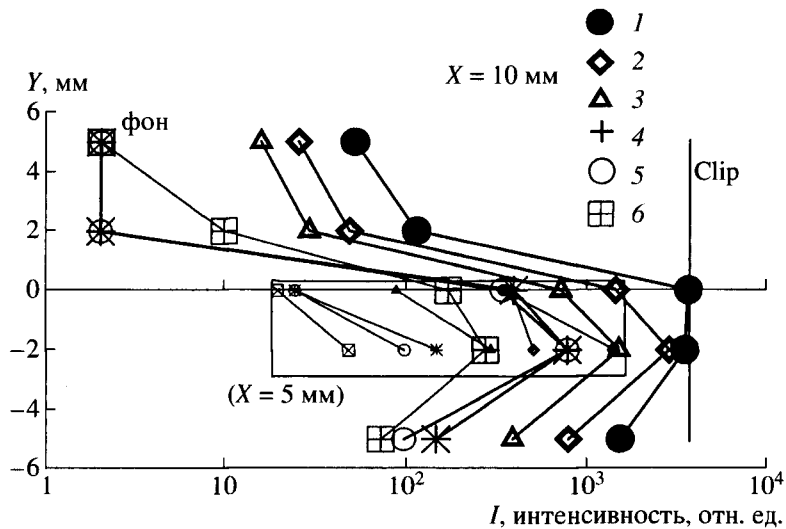


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения молекулярных компонент и атомарного водорода на расстоянии 10 и 5 мм от среза анода; 1 – H (656.3 нм), 2 – C₂ (516.5 нм), 3 – CN (410–420 нм), 4 – N₂ (615–630 нм), 5 – OH (305–310 нм), 6 – CH (431.4 нм).

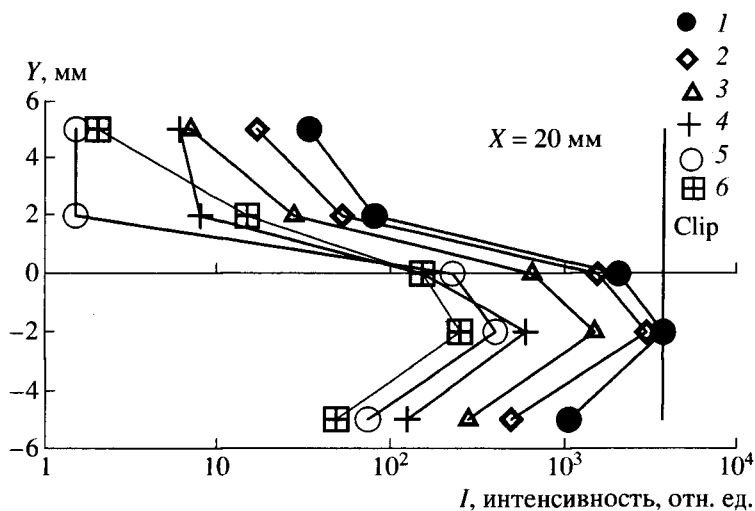


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения молекулярных компонент и атомарного водорода на расстоянии 20 мм от среза анода; обозначения те же, что на рис. 4.

рой протекали плазмохимические реакции. В частности, по мере удаления от анода зона реакций постепенно смещалась вниз от оси $Y = 0$. Если на расстояниях $X = 10$ и 20 мм это смещение составляло около 2 – 2.5 мм, то при $X = 50$ мм оно было более 6 мм (заметим, что глубина выреза в катодной пластине между первым и вторым выступами составляла 20 мм). Такое смещение зоны разряда, по-видимому, отражает изменение течения за верхним электродом и качественно согласуется с результатами визуальных наблюдений. Из полученных распределений также следует, что характерный поперечный к потоку размер зоны реакций был равен примерно 6 мм. Обращает на себя

внимание также то, что на расстоянии 5 мм от анода интенсивность излучения как молекулярных, так и атомарных компонент была значительно ниже, чем на расстоянии 10 мм, т.е. происходила задержка в развитии реакций, которая, возможно, была связана с тем, что около анода имелась очень богатая топливовоздушная смесь (по оценкам коэффициент избытка воздуха α на срезе анода составлял примерно 0.14 и 1.1 – 1.3 на уровне заднего выступа катода). Кроме того, время пролета промежутка в 5 мм равнялось $\sim 10^{-5}$ с и могло быть недостаточным для развития плазмохимических процессов. Можно отметить, что в этой области была более низкой (по сравнению с

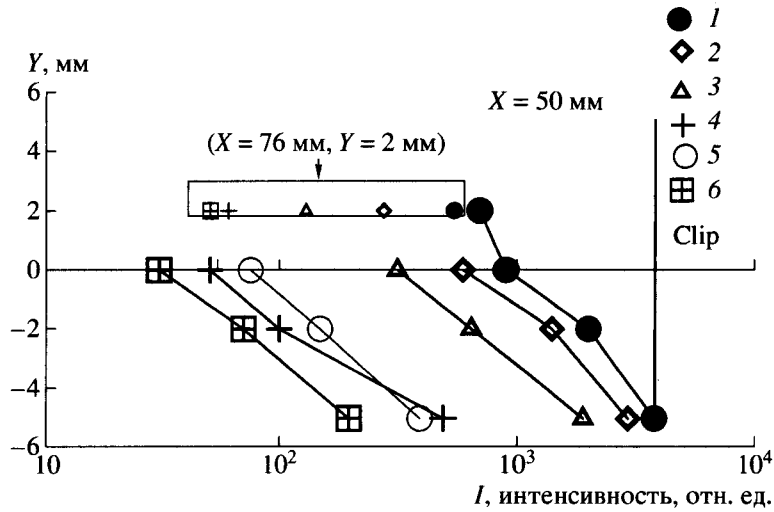


Рис. 6. Распределение интенсивности излучения молекулярных компонент и атомарного водорода на расстоянии 50 мм от среза анода и за задней кромкой катода ($X = 76$ мм); обозначения те же, что на рис. 4.

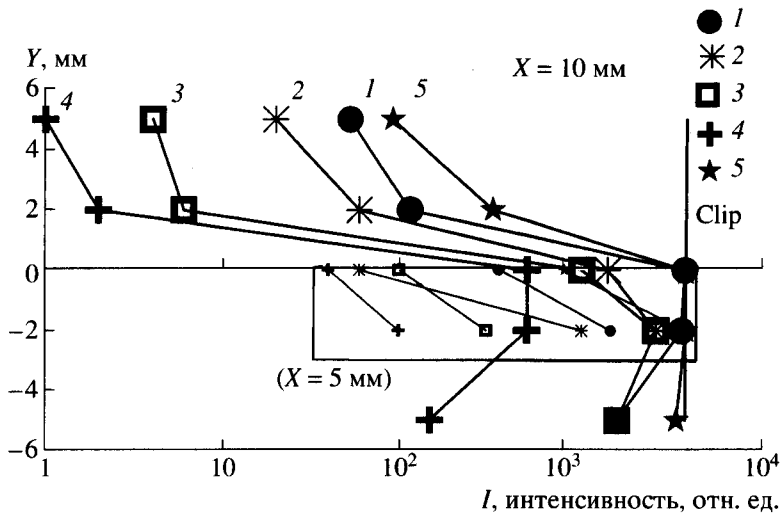


Рис. 7. Распределение интенсивности излучения атомарных компонент на расстоянии 10 и 5 мм от среза анода; 1 – Н (653.3 нм), 2 – N (742.4 нм), 3 – С (247.9 нм), 4 – О (845 нм), 5 – О (777 нм).

$X = 10$ и 20 мм) интенсивность не только компонент, связанных с разложением пропана, но и таких компонент, как N_2 и N.

В области значений X от 10 до 20 мм интенсивность излучения как молекулярных, так и атомарных компонент менялась слабо, причем для последних она убывала с увеличением расстояния X . Вместе с тем поведение интенсивности излучения молекулярных компонент с изменением X было разнохарактерным. Если для радикала OH она убывала с увеличением X (по-видимому, следуя за изменением концентраций атомарных водорода и кислорода), то для C_2 , CN, CH оставалась приблизительно постоянной. Для молекуляр-

ного азота интенсивность излучения при $X = 10$ мм была незначительно выше, чем при $X = 20$ мм.

По мнению авторов представляет интерес также тот факт, что концентрация атомарного кислорода – одного из основных участников окислительных реакций – очень слабо изменялась на длине от 10 до 20 мм и уменьшалась только в 1.6 раза при переходе к координате $X = 50$ мм.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования продольного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха при инъекции в него пропана свидетельствуют о том, что современными методами эмиссионной спектроскопии могут быть получены важные качественные и количествен-

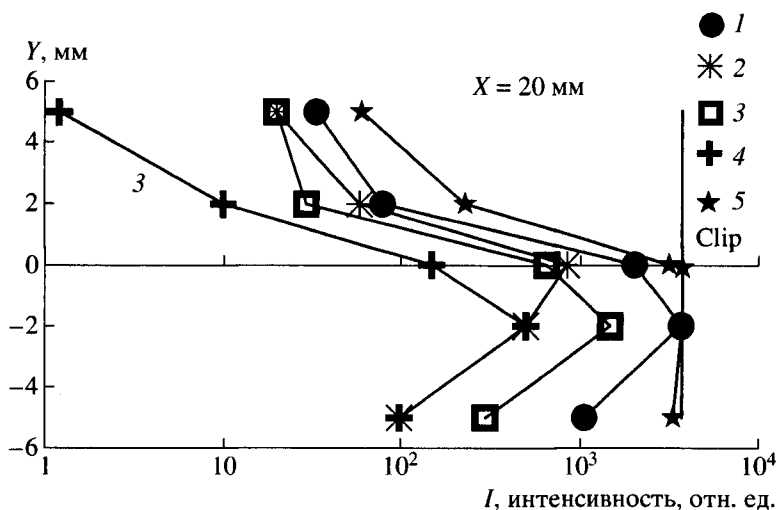


Рис. 8. Распределение интенсивности излучения атомарных компонент на расстоянии 20 мм от среза анода; обозначения те же, что на рис. 7.

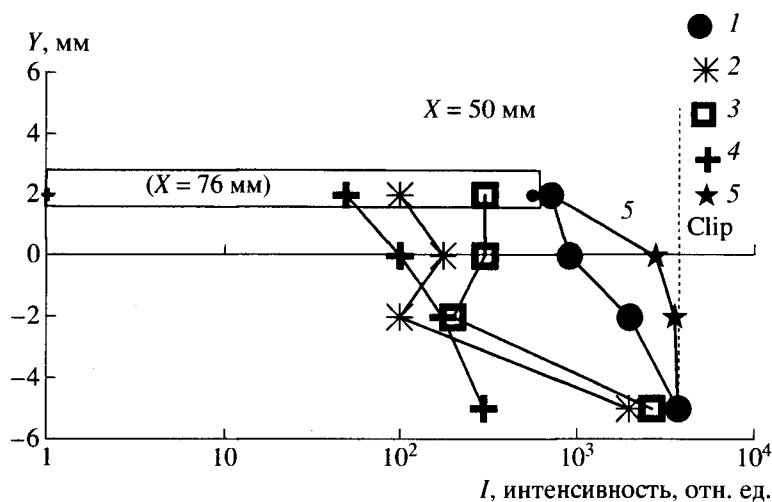


Рис. 9. Распределение интенсивности излучения атомарных компонент на расстоянии 50 мм от среза анода; обозначения те же, что на рис. 7.

ные данные о параметрах зоны плазмохимических реакций, которая возникает в таком разряде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выполненной работе методами эмиссионной спектроскопии проведены исследования продольного контрагированного разряда, который создавался в сверхзвуковом потоке воздуха в условиях инжекции в разряд пропана и в котором реализовалась практически только одна, прианодная, ветвь. Эта ветвь распространялась в основном по линиям газодинамического потока и лишь в нижней части течения замыкалась на катод. Установлено, что в таком разряде происходило активное преобразование исходной топливоздушн

си с образованием атомарных водорода, кислорода, углерода и радикалов C_2 , OH , CN , CH . Вместе с тем при оптимальном уровне сигнала для регистрации основных компонент в спектре из общего фона не выделялись полосы, соответствующие излучению формальдегида H_2CO и альдегидной группы HCO , которые должны были бы наблюдаться, если бы исследуемый спектр был спектром холодного пламени или спектром свечения, предшествующего воспламенению.

Исследование пространственного распределения интенсивности излучения этих продуктов плазмохимических реакций показало, что непосредственно за анодом, через который инжектировался пропан, возникает сравнительно короткая по длине зона индукции, в которой развитие реак-

ций, несмотря на прохождение через нее потока электронов, в значительной степени ослаблено по сравнению с расположенной ниже по потоку протяженной зоной реакций. Методика эксперимента позволила определить геометрические размеры разрядного канала в направлении, нормальном к направлению потока, для ряда сечений канала и получить количественные данные о смещении оси разряда, которое было обусловлено, по-видимому, спецификой обтекания расположенного выше по потоку электрода. Поэтому использование возможностей современных методов эмиссионной спектроскопии позволяет получить важные данные не только о составе возникающих в разрядах компонент, но и о пространственных параметрах разрядов.

В результате анализа распределения интенсивности излучения в спектре атомарного кислорода в отсутствие инъекции пропана получены данные о температуре электронов в разряде, которая оказалась равной примерно 1.1–1.2 эВ и была, как можно предполагать, значительно выше температуры нейтральных частиц, связанной с поступательными степенями свободы, что свидетельствует о неравновесном характере разряда.

Авторы благодарят Б.В. Ларина и П.А. Доброва за помощь в выполнении данной работы.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы поддержки ведущих научных школ (НШ-4272.2006.1) и гранта РФФИ (№ 05-08-33633).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kimura I., Aoki H., Kato M.* The Use of Plasma Jet for Flame Stabilization and Promotion of Combustion in Supersonic Air Flows // *Combustion and Flame*. 1981. V. 42. P. 297.
2. *Takita K., Uemoto T., Sato T. et al.* Ignition Characteristics of Plasma Torch for Hydrogen Jet in an Airstream // *J. Propulsion and Power*. 2000. V. 16. № 2. P. 227.
3. *Sato Y., Sayama M., Katsura O. et al.* Effectiveness of Plasma Torches for Ignition and Flameholding in Scramjet // *J. Propulsion and Power*. 1992. V. 8. № 4. P. 883.
4. *Wagner T.C., O'Brien W.F., Norhman G.B., Eggers J.M.* Plasma Torch Igniter for Scramjets // *J. Propulsion and Power*. 1989. V. 5. № 5. P. 548.
5. *Jacobson L.S., Gallimore S.D., Schetz J.A., O'Brien W.F.* Integration of an Aeroramp Injector/Plasma Igniter for Hydrocarbon Scramjets // *J. Propulsion and Power*. 2003. V. 19. № 2. P. 170.
6. *Gallimore S.D., Jacobson L.S., O'Brien W.F., Schetz J.A.* Operational Sensitivities of an Scramjet Ignition/Fuel – Injection System // *J. Propulsion and Power*. 2003. V. 19. № 2. P. 183.
7. *Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А.* Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
8. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
9. *Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е.* Кинетика и механизм газофазных реакций. М.: Наука, 1974. 559 с.
10. *Shibkov V.M., Alexandrov A.F., Chernikov A.V. et al.* Freely Localized Microwave Discharge in Supersonic Flow // *AIAA-2001-2946*.
11. *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*.
12. *Klimov A., Bityrin V., Brovkin V. et al.* Optimization of Plasma Generators for Plasma Assisted Combustion // *AIAA-2001-2874*.
13. *Chernikov V., Ershov A., Shibkov V. et al.* Gas Discharges in Supersonic Flows of Air – Propane Mixtures // *AIAA-2001-2948*.
14. *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.
15. *Вутковский В.В., Грачев Л.П., Грищов Н.Н. и др.* Исследование нестационарного обтекания тел сверхзвуковым потоком воздуха, подогретым продольным электрическим разрядом // *ТВТ*. 1990. Т. 28. № 6. С. 1156.
16. *Гейдон А.* Спектроскопия пламен. М.: Изд-во иностран. лит., 1959. 382 с.