

УДК 533.6.011.5:533.9.08

© 2006 г. В. В. ИВАНОВ, М. Н. КОГАН, В. В. СКВОРЦОВ

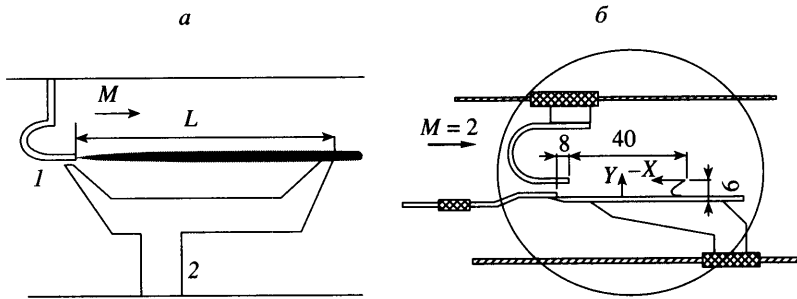
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО ПЛАСТИНЫ В ПРИСУТСТВИИ ЭКЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ НЕРАВНОВЕСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В рамках решения задач инициирования и стабилизации горения при низких статических температурах и давлениях исследована картина сверхзвукового течения ($M = 2$) около поверхности пластины, вдоль которой инжестировался пропан, в присутствии неравновесного разряда и интерцепторов из металла и диэлектрика, установленных на поверхности пластины. Эксперименты показали, что при установке на пластине интерцептора из металла возникают две области, где происходят экзоэнергетические реакции. Одна располагается перед передней отрывной зоной, другая – над и за кромкой интерцептора, причем ее граница частично уходит в область сверхзвукового потока. Современными спектроскопическими методами получены распределения интенсивности излучения ряда продуктов плазмохимических реакций около пластины перед интерцептором, за ним и над его кромкой. Установлено, что под действием разряда происходит глубокая переработка топлива с возникновением ряда свободных радикалов, атомарных водорода и кислорода, которые сами активны в химическом отношении.

Ключевые слова: сверхзвуковое течение, пластина, интерцептор, воспламенение, стабилизация горения, пропан, неравновесный разряд, плазмохимические реакции, эмиссионная спектроскопия.

Изучение вопросов управления течениями путем целенаправленного подвода энергии в потоки в настоящее время развилось в самостоятельное направление исследований. Значительный интерес представляет разработка способов управления воспламенением и стабилизацией горения в пристеночных областях сверхзвуковых течений воздуха, а также выноса горения из пристеночной области непосредственно в сверхзвуковой поток. В ряде работ (см., например [1–6]) исследовались течения в пристеночной области, в которых комбинировались инжекция топлива (водород, метан, этилен) поперек потока и плазменная струя, создаваемая электродуговым источником, также выбрасываемая поперек основного течения. Судя по параметрам использовавшихся дуговых источников, они инжестировали плазму, в которой температура электронов близка к температуре тяжелых компонент. В [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 плазмотронов, чтобы усилить эффект проникновения плазменной струи, например путем создания выше по потоку вихревых структур.

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 большой. Именно такими свойствами обладают неравновесные разряды, в которых температура электронов значительно превышает температуру нейтральных молекул и ионов. Для неравновесных разрядов характерна температура электронов около 1 эВ [7, 8]. При создании неравновесных разрядов в сме-

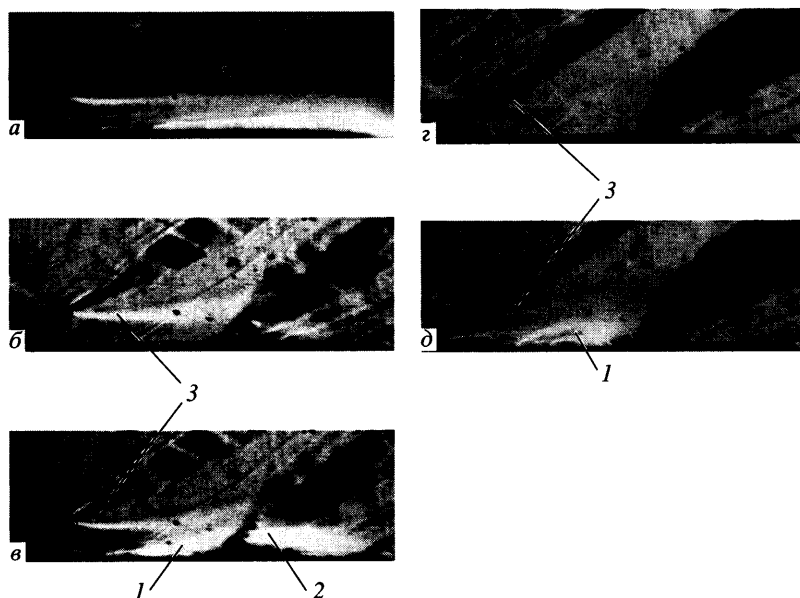


Фиг. 1. Схемы создания продольного (а) и продольно-поперечного (б) разрядов

схем углеводородных топлив с воздухом происходит диссоциация молекул, образуются свободные радикалы, имеющие ненасыщенные валентные связи, возникают атомарные кислород и водород – компоненты, 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 – это низкие статические температуры и низкие статические давления. Поэтому применение неравновесных разрядов может оказаться перспективным в условиях, когда традиционные методы иницирования и поддержания процессов тепловыделения в топливовоздушных смесях не дают желаемых результатов.

В рассматриваемых экспериментах при статическом давлении примерно 260 Тор были созданы большие по длине в сравнении с применявшимися дугами [1–6] разрядные каналы при возможности проведения длительных по времени экспериментов без значительной эрозии электродов, в том числе в условиях инжекции топлива. При этом разряды могли быть созданы как в области основного потока, так и в пристеночных зонах.

1. Методика и результаты эксперимента при создании разряда около пластины с установленным на ней интерцептором. За основу была взята методика создания продольного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха (фиг. 1, а) [10]. Разряд создавался между электродом 1, выполненным из меди или латуни, концевой участок которого был ориентирован вдоль потока, и профилированной пластиной из дюралюминия 2, имевшей два выступа. Ближний к верхнему электроду выступ был предназначен для надежного пробоя разрядного промежутка. После зажигания разряда он сносился потоком вдоль пластины, и при определенной величине разрядного тока испытывал контракцию и замыкался, в основном, на дальний от верхнего электрода выступ. 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. При этом длина L разрядного промежутка для статического давления ~260 Тор составляла 70–80 мм, при $M = 2$ и 40 мм при $M = 2.5$ или 0.65–0.7. При проведении экспериментов с инжекцией в разряд пропана его подача могла осуществляться либо через верхний электрод, для чего последний был выполнен из трубки, которая заканчивалась круглым или овальным инжектором, либо через отдельный инжектор. Разработанная методика позволяла проводить эксперименты при длительном непрерывном горении разряда. Типичные 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. Эксперименты проводились в аэродинамической трубе с достаточно большим (120 × 120 мм) поперечным сечением, которое гарантировало отсутствие теплового запираания трубы. Длина рабочей части трубы была равна 400 мм.



Фиг. 2. Теневые картины течения около пластины при создании продольно-поперечного разряда в присутствии (а, в, д) и отсутствии (б, г) инъекции пропана: а – интерцептор отсутствует, б, в – интерцептор из металла, г, д – интерцептор из диэлектрика

Спектроскопические исследования такого разряда показали, что при инъекции в него пропана происходит глубокая переработка последнего с образованием свободных радикалов C_2 , CN, NH, CH, OH, а также одноатомных водорода, кислорода, азота, углерода, причем интенсивность излучения в линиях H_{α} водорода и 777.53 нм кислорода могла быть в 35–60 раз выше уровня фона, что, по-видимому, свидетельствует о высокой концентрации этих атомов. В результате анализа распределения интенсивности излучения в спектре атомарного кислорода в разряде без инъекции пропана были получены оценки температуры электронов от 12300 до 14300 К. Эксперименты, проведенные с продольным разрядом, позволили его модифицировать для исследования течений около пластины в присутствии экзоэнергетических процессов, обусловленных взаимодействием неравновесного электрического разряда и пропано-воздушной смеси.

В случае, показанном на фиг. 1, б, продольно-поперечный разряд создавался между анодом, выполненным из латуни, и профилированной пластиной из нержавеющей стали размером 50 × 70 мм (катодом). Пропан подавался вдоль поверхности пластины через овальный инжектор, установленный в ее носовой части. Эксперименты были выполнены при $M = 2$, статической температуре ~160 К, статическом давлении 260 Тор, силе разрядного тока 1 А и напряжении на разряде ~1.5–1.8 кВ. Единичное число Re было равно примерно $3 \cdot 10^7$ 1/м. Расход пропана G составлял 1 и 2 г/с. На пластине на расстоянии 36–40 мм от конца верхнего электрода устанавливались интерцепторы либо из латуни, либо из фторопласта (в последнем случае тело интерцептора было сплошным). Угол скоса поверхности, обращенной к потоку, относительно плоскости пластины в обоих случаях $\approx 40^\circ$. Высоты металлического и диэлектрического интерцепторов – 6 и 7 мм.

Теневые картины обтекания пластины получены с помощью прибора ИАБ-451 в варианте горизонтальной установки щели. Параметры использовавшегося дифракционного спектрометра будут приведены в разд. 2.

На фиг. 2 даны копии фотографий для разрядов без интерцепторов (а) и с интерцепторами из металла (б, в) и фторопласта (г, д). Расход пропана был равен 2 г/с.

В первом случае разряд распространялся по всей длине пластины, а его прикатодная зона была локализована только около поверхности. Главный результат для случая интерцептора из металла – наличие двух ярких световых областей: в зоне течения около поверхности пластины на некотором удалении от интерцептора выше по потоку (1 на фиг. 2) и области около кромки интерцептора (2). Первая зона, возможно, частично совмещена с передней отрывной зоной, где имеются наиболее благоприятные условия для воспламенения: низкие скорости, хорошее перемешивание и повышенное давление. Вторая зона расположена у верхней кромки интерцептора, на значительном удалении от поверхности. Ее граница спускается за срез интерцептора и уходит на некоторое расстояние в область сверхзвукового потока.

Увеличение расхода пропана с 1 до 2 г/с приводило к значительному увеличению размеров как первой, так и второй областей. При расходе пропана 2 г/с размер и яркость светового пятна на кромке интерцептора и за ним сопоставимы с аналогичными характеристиками для первой области. Непосредственно перед интерцептором область более частых локализаций тока расположена над передней отрывной зоной, т.е. разряд преимущественно распространяется выше этой зоны. Спектроскопические исследования (см. ниже) показали, что в этих областях имеют место химические, в том числе экзоэнергетические, реакции и происходит переработка пропана на ряд химически активных компонент (Н, ОН, О).

Таким образом, первая область – зона возникновения химически активных компонент, которые вдоль передней отрывной зоны выносятся на кромку интерцептора, и нагрева газа. Недостаток окислителя, поступающего в переднюю отрывную зону, блокирует развитие в ней реакций. Нагрев газа и образование радикалов в первой светящейся зоне и их вынос вниз по потоку на кромку интерцептора способствуют поджигу и интенсификации горения пропана около интерцептора и за ним в сверхзвуковом потоке. Вместе с тем важным фактором, способствующим образованию второй области реакций, является наличие разряда на кромке интерцептора.

В случае интерцептора из диэлектрика вторая зона не возникала. Весь разряд локализовался в пределах между верхним электродом и интерцептором. Однако, возможно, иногда токовые шнуры выносились вдоль его поверхности. В обоих случаях было четко видно разделение по цвету зон, где преобладают разряды в воздушной среде (как шнур розового цвета) и пропане (свечение бело-голубого цвета), примыкающее к пластине и интерцептору – в случае, когда он был выполнен из металла. Непосредственно перед интерцепторами, т.е. в глубине передней отрывной зоны, интенсивность свечения была более низкой, т.е. там процессы преобразования пропана, сопровождающиеся эмиссией излучения, шли менее интенсивно. В случае интерцептора из диэлектрика разряд целиком замыкался на пластину, что приводило к интенсификации процессов в передней отрывной зоне. Результатом этого было увеличение ее размера в вертикальном направлении.

Это проявлялось в изменении характера течения. Если в случае интерцептора из металла токовый шнур, идущий от верхнего электрода, имел прогиб вниз к пластине, то в случае интерцептора из диэлектрика этот прогиб ликвидировался, но образовывался нижний токовый шнур, замыкающийся на верхнюю кромку инжектора. Этот токовый шнур шел по границе, отделявшей зону, заполненную пропаном.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования сочетания электрического разряда и процессов, создаваемых отрывной зоной перед интерцептором, для реализации устойчивого горения воздушно-пропановой смеси при низких статических температурах и давлении в условиях сверхзвукового потока.

2. Результаты исследований распределения продуктов плазмохимических реакций методами эмиссионной спектроскопии. Методами эмиссионной спектроскопии было исследовано распределение интенсивности излучения компонент, образующихся в результате плазмохимических реакций в пропано-воздушном потоке около поверхности пластин.

тины и интерцепторов, в различных зонах течения. Разработанный в Институте спектроскопии РАН (г. Троицк) дифракционный спектрометр позволял производить регистрацию спектров в диапазоне длин волн от 220 до 980 нм (полный спектральный диапазон прибора 190–1080 нм) при спектральном разрешении <0.2 нм и времени интегрирования каждого участка спектра 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 позволила провести исследование распределения интенсивностей излучения по этому направлению. Для обеспечения возможности регистрации спектра как в видимом, так и ультрафиолетовом диапазоне длин волн рабочая часть аэродинамической трубы имела окно из кварца.

В дальнейшем преимущественно рассматриваются распределения интенсивностей излучения C_2 , CN, OH, N_2 , H, O, C, N. Полосы радикалов выбирались в соответствии со справочными данными, приведенными в [11]. Атомарные линии идентифицировались по [12]. Анализировавшиеся длины волн λ указаны

Продукт реакций	H	C_2	CN	OH	N_2	O	C	N	O
λ , нм	656.28	516.5	410–420	305–310	615–630	777.53	247.9	742.4	844.6
№ линии на фиг. 3–5	1	2	3	4	5	6	7	8	9

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 фигур не приводятся распределения интенсивности для триплета 777.53 нм атомарного кислорода.

В табл. 1 представлены указанные распределения по Y , в двух сечениях $X = -18$ (I) и -13 мм (II) перед металлическим интерцептором при $G = 1$ г/с (используется система координат, показанная на фиг. 1, б). При каждом значении Y верхняя строка дает абсолютное значение интенсивности в единицах шкалы спектрометра, а нижняя – его отношение к максимальному значению при данном X (приводимые значения округлены). Общая тенденция состоит в убывании интенсивности всех компонент при удалении от поверхности пластины примерно на порядок при переходе от $Y = 2$ мм к $Y = 8$ мм. Такой характер распределения интенсивностей обусловлен, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, пластина являлась катодом разряда, т.е. эмиттером электронов, которые в прикатодном падении потенциала набирали высокую энергию и поэтому были эффективны в интенсификации реакций. Плотность потока быстрых электронов была максимальна около поверхности пластины и убывала с увеличением Y . Во-вторых, концентрация пропана была максимальна около пластины (в частности, из-за низкой скорости в пограничном слое). В сечении $X = -13$ мм, которое находилось дальше от анода, чем сечение $X = -18$ мм, интенсивность процессов при $Y \geq 1$ мм была выше. Это связано с отмечавшимися ранее особенностями развития процессов выноса химически активных компонент из первой области (координата $Y = 1$ мм находилась выше границы передней отрывной зоны).

Можно отметить, что в относительных единицах все точки при каждом Y ложатся в некоторую узкую полосу (за исключением точки для радикала C_2 при $Y = 6$ мм). Это свидетельствует об указанной роли распределений электронов и пропана по координате Y в интенсивности протекавших процессов.

На фиг. 3, а и б даны распределения интенсивностей тех же компонент над кромкой интерцептора ($X = 0$) и за ним ($X = 10$ мм), которые исследовались при расходе пропана,

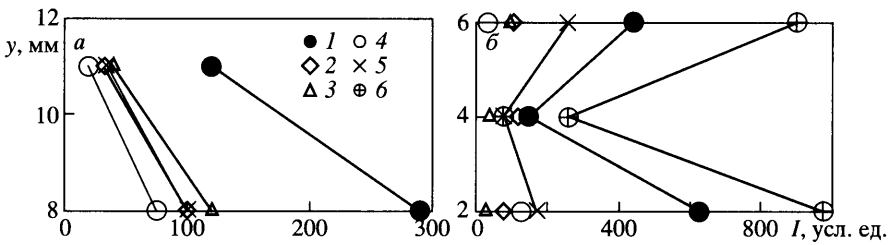
Таблица 1

Y, мм	H		C ₂		CN		OH		N ₂	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
2	1090	1450	275	250	575	625	390	510	810	650
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	690	910	115	130	290	310	210	250	475	525
4	0.63	0.63	0.42	0.52	0.5	0.5	0.54	0.49	0.59	0.81
6	140	290	220	210	140	180	110	150	100	180
6	0.13	0.2	0.8	0.84	0.24	0.29	0.28	0.29	0.12	0.28
8	170	260	25	45	68	95	25	60	80	100
8	0.15	0.18	0.09	0.18	0.12	0.15	0.06	0.12	0.1	0.15

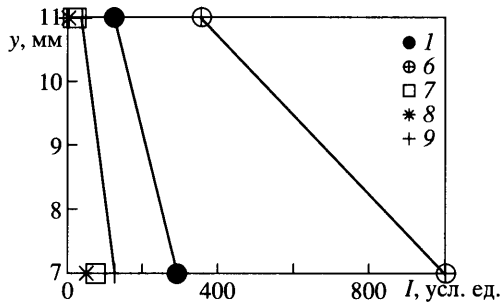
равном 2 г/с. Интенсивности в сечениях $X = 0$ и $X = -13$ мм при $Y = 8$ мм, $G = \text{const}$ близки по величине, т.е. над кромкой интерцептора продолжают идти плазмохимические процессы. Дополнительным фактором их интенсификации является вынос продуктов реакций из зон перед интерцептором. В области задней отрывной зоны присутствовали те же продукты плазмохимических реакций, что и перед интерцептором (фиг. 3, б). Интенсивности их излучения в области тени для разряда ($Y = 6$ мм) близки к интенсивности аналогичных компонент в точке с координатами $(-13, 8)$ мм. Увеличение интенсивности при $Y = 2$ мм можно объяснить тем, что разряд обтекает интерцептор, и поверхность пластины по краям интерцептора выполняет функцию катода.

Анализ полученных спектрограмм показал, что при использовании рассматриваемого разряда в течении воздушно-пропановой смеси около пластины наряду с атомарным водородом образовывался атомарный кислород и ряд других атомарных продуктов, например углерод и азот. Представление об этом дает табл. 2 ($G = 1$ г/с) и фиг. 4 ($G = 2$ г/с). На активное образование атомарного кислорода указывает то, что слабая линия 844.6 нм была сравнима по интенсивности с линией H_{α} водорода. Перед интерцептором интенсивности атомарных компонент с удалением от поверхности пластины убывают, как и для молекулярных компонент (табл. 2), но разброс точек значительно больше. Над кромкой интерцептора (фиг. 4) интенсивность излучения линий в триplete кислорода 777.53 нм была значительно больше интенсивности линии H_{α} водорода.

При сверхзвуковом обтекании пластины с интерцептором из диэлектрика и расходе пропана 1 г/с имеет место разный характер поведения компонент по Y для групп H_{α} , C_2 , CN и O, OH, N_2 : для первой группы интенсивность уменьшается с увеличением Y , для второй группы увеличивается (табл. 3). При этом интенсивность излучения атомарного кислорода (и, по-видимому, их концентрация) около пластины была примерно на порядок ниже, чем в эксперименте с металлическим интерцептором. Как результат этого, более низка и концентрация радикала OH. Причиной такого различия служит более высокая плотность тока около поверхности пластины в эксперименте с диэлектрическим интерцептором. Нагрев газа приводит к снижению напряженности электрического поля около стенки, требуемой для реализации разряда, и, тем самым, к более низкой величине энергии первичных электронов. Косвенно это подтверждается меньшим падением напряжения на разряде в экспериментах с диэлектрическим, чем с металлическим интерцептором (соответственно ~1300 и 1800 В).



Фиг. 3. Распределение интенсивности излучения продуктов плазмохимического взаимодействия над ($X = 0$, а) и за кромкой ($X = 10$, б) интерцептора из металла

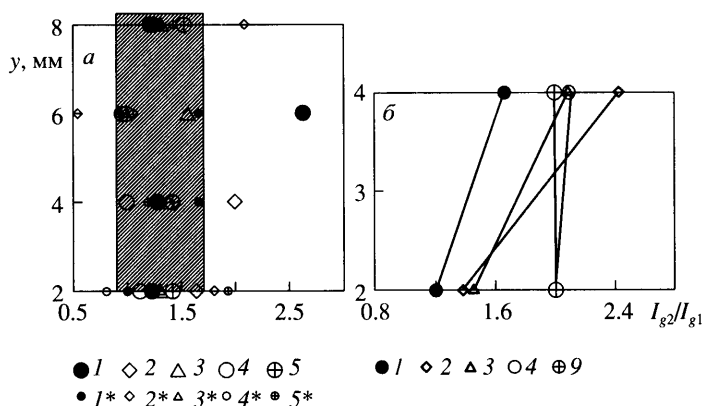


Фиг. 4. Распределение интенсивности излучения атомарных компонент по высоте течения над кромкой интерцептора из металла

В экспериментах с диэлектрическим интерцептором продукты плазмохимических взаимодействий были зарегистрированы и над его кромкой, где разряд отсутствовал. Интенсивность их излучения составила для Н 22%, C_2 20%, CN 25%, OH 15%, O 7.5% от аналогичных величин над пластиной при том же $Y = 8$ мм. Их присутствие над кромкой интерцептора обусловлено выносом из основной зоны, где происходили плазмохимические реакции. Если этот процесс имеет место и для интерцептора из металла, то он может приводить к интенсификации процессов во второй зоне.

Таблица 2

Y, мм	Н		С		N		O (9)	
	I	II	I	II	I	II	I	II
2	1090	1450	390	510	410	520	1420	1310
2	1	1	1	1	0.73	0.91	1	1
4	690	910	150	210	275	фон	990	990
4	0.63	0.63	0.38	0.41	0.49	0	0.7	0.76
6	140	290	70	75	560	570	910	980
6	0.13	0.2	0.18	0.15	1	1	0.64	0.75
8	170	260	25	35	60	130	275	300
8	0.15	0.18	0.06	0.07	0.11	0.25	0.19	0.23



Фиг. 5. Влияние расхода пропана на распределение интенсивности излучения продуктов плазмохимических реакций: *а* – интерцептор из металла ($X = -18$ мм – линии 1, 2, 3, 4, 5, 9; $X = -13$ мм – 1*, 2*, 3*, 4*, 5*, 9*), *б* – интерцептор из диэлектрика ($X = -15$ мм – линии 1, 2, 3, 4, 5, 9)

На фиг. 5 соотнесены интенсивности при двух расходах пропана. В случае интерцептора из металла (*а*) для большинства компонент отношение интенсивностей при $G = 2$ и 1 г/с, I_{g2}/I_{g1} лежит между 1.3–1.5. Наряду с этим при $X = -13$ мм, $Y = 2$ мм, т.е. в начале передней отрывной зоны, это отношение для радикала C_2 и атомарного кислорода приближается к 2. Для атомарного водорода получены значения I_{g2}/I_{g1} на уровне 2.5 при $X = -18$ мм, $Y = 6$ мм.

Для разряда, который горел перед интерцептором из диэлектрика (фиг. 5, *б*), реализовались значения I_{g2}/I_{g1} в диапазоне 1.2–1.7 для Н, 1.4–2.4 для C_2 и 2 – для О (данные приведены для сечения $X = -15$ мм). Причиной такого неоднозначного поведения этих отношений для разных компонент могло быть как сложное изменение характера растекания струи пропана, так и несохранение распределения потока электронов с пластины и их энергии при изменении величины G .

Заключение. Проведены эксперименты, цель которых состояла в том, чтобы использовать сочетание неравновесного продольно-поперечного разряда и процессов, создаваемых отрывной зоной, возникающей перед интерцептором, установленным на пластине, для реализации устойчивого горения воздушно-пропановой смеси при низких стати-

Таблица 3

Y, мм	Н		C ₂		CN		OH		N ₂		O (9)	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
2	2630	2250	2100	2090	1250	1450	130	75	150	150	150	110
2	1	1	1	1	1	1	0.32	0.25	0.13	0.25	0.29	0.11
4	2610	1850	850	1275	950	1150	240	130	350	120	310	150
4	~1	0.82	0.4	0.61	0.76	0.79	0.6	0.43	0.3	0.2	0.6	0.15
8	1120	1030	275	275	375	300	400	300	1150	610	520	990
8	0.42	0.46	0.13	0.13	0.3	0.21	1	1	1	1	1	1

ческих температурах и давлении в условиях сверхзвукового потока. При разряде над пластиной с металлическим интерцептором в условиях инжекции пропана возникают две области, где происходят экзоэнергетические реакции. Одна область располагается до передней отрывной зоны и вдоль смещения этой зоны с внешним потоком. Вторая область реакций расположена над и за кромкой интерцептора. Часть ее уходит вниз за интерцептор, в область задней отрывной зоны, другая – поднимается на некоторое расстояние вверх в область сверхзвукового потока. Необходимым условием возникновения второй области реакций является наличие разряда на кромке интерцептора. Вынос радикалов и активных атомов из первой области способствует поджигу и интенсификации реакций во второй области.

В случае интерцептора из диэлектрика возникает только одна более интенсивная зона реакций, расположенная перед интерцептором. Методами эмиссионной спектроскопии получены пространственные профили излучения продуктов плазмохимических реакций в различных зонах течения. Установлено, что, как и в продольном разряде, здесь возникают свободные радикалы, включая ОН, атомарные кислород и водород, которые сами активны в химическом отношении и развитии окислительных процессов.

Авторы благодарят Б.Г. Ефимова, Б.В. Ларина, П.А. Доброва за помощь в выполнении данной работы.

Работа выполнена в рамках Государственной программы поддержки ведущих научных школ (грант РФ НШ-1984.2003.1) и программы № 20 Президиума РАН.

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 // *Combust. and Flame*. 1981. V. 42. № 3. P. 297–305.
2. Takita K., Uemoto T., Sato T., Ju Y., Masuya G., Ohwaki K. Ignition characteristics of plasma torch for hydrogen jet in an airstream // *J. Propulsion and Power*. 2000. V. 16. № 2. P. 227–233.
3. Sato Y., Sayama M., Katsura O., Masuya G., Komuro T., Kudou K., Murakami A., Tani K., Wakamatsu Y., Kanda T., Chinzei N. Effectiveness of plasma torches for ignition and flameholding in scramjet // *J. Propulsion and Power*. 1992. V. 8. № 4. P. 883–889.
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. 548–554.
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. 170–182.
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. 183–189.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
8. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
9. Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. М.: Наука, 1974. 558 с.
10. Витковский В.В., Грачев Л.П., Грицов Н.Н., Кузнецов Ю.Е., Лебедеко В.В., Скворцов В.В., Ходатаев К.В., Янков В.П. Исследование нестационарного обтекания тел сверхзвуковым потоком воздуха, подогретым продольным электрическим разрядом // *Теплофизика высоких температур*. 1990. Т. 28. № 6. С. 1156–1163.
11. Гейдон А.Г. Спектроскопия пламен. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 382 с.
12. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М. Таблицы спектральных линий. М.; Л.: Гостехиздат, 1952. 560 с.