

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.525

**ПАРАМЕТРЫ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЯДА
В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА****А. Ф. Александров, А. П. Ершов, Е. Б. Колесников, А. А. Логунов,
В. А. Черников, В. М. Шибков***(кафедра физической электроники)*

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

Приводятся результаты экспериментальных исследований плазмы продольно-поперечного разряда постоянного тока в сверхзвуковом аэродинамическом канале с обратным уступом. Температура газа в разряде при вкладываемых мощностях $\approx 2-3$ кВт достигает величины 2000 ± 500 К. Полученные результаты указывают на перспективность использования плазмы разряда для инициации горения сверхзвукового потока топливно-воздушной смеси.

При разработке гиперзвуковых прямоточно-воздушных реактивных двигателей летательных аппаратов одной из главных проблем является необходимость резкого сокращения времени воспламенения сверхзвукового потока топливно-воздушной смеси. Наиболее перспективным для этого представляется создание того или иного типа электрического разряда в потоке. С физической точки зрения целесообразно использование классических электродных разрядов. Это обусловлено тем, что плазма разрядов в сверхзвуковых потоках сугубо неоднородна, нестационарна и неравновесна, поэтому достаточно корректное измерение параметров плазмы возможно в наиболее простых случаях, в частности, в разрядах постоянного тока.

Наличие двух выделенных направлений — электрического поля и газового потока — задает две предельные конфигурации разряда — продольную и поперечную. Поперечный разряд позволяет в принципе вложить очень высокую мощность в поток за счет образования протяженных каналов вдоль потока (до 70 кВт) [1–3]. Однако даже разряд постоянного тока, поперечный к потоку, принципиально нестационарен [3], поэтому вкладываемая мощность испытывает значительные колебания. От этого недостатка свободен продольный разряд [4], но такой разряд требует очень высоких напряжений пробоя при типичных давлениях в двигателе 3–4 атм.

Компромиссом может быть промежуточная конфигурация — так называемый продольно-поперечный разряд. Однако неясно, к какому типу разряда — поперечному или продольному — тяготеют его параметры. В настоящей работе приводятся первые результаты исследований параметров такого разряда.

Эксперименты проводились на аэродинамической установке, представляющей собой баллонно-вакуумную трубу кратковременного (3 с) действия. Компрессор позволял создавать давление до 16 атм в объеме 520 л, барокамера объемом 3 м³ могла откачиваться до давления ≈ 1 Торр. Аэродинамический канал со сверхзвуковым соплом, рассчитанным на число Маха $M = 2$, содержал рабочую секцию с внезапным расширением, размеры которого 25×40 мм, в ней зажигался разряд постоянного тока (рис. 1). Она была снабжена кварцевыми окнами, что позволяло проводить различные диагностические измерения. Контроль параметров сверхзвукового потока осуществлялся датчиками давления, размещенными во всех секциях рабочего канала.

Для создания разряда на постоянном токе использовался источник питания с выходным напряжением до 5 кВ и максимальным током до 20 А, величина тока регулировалась набором балластных сопротивлений.

Скоростная съемка картины разряда осуществлялась сверхскоростной цифровой ССД-камерой. На рис. 1 представлены два типичных фрагмента скоростной съемки разряда, полученные при различных временах экспозиции. Их сопоставление показывает, что интегральная картина разряда представляет собой суперпозицию отдельных каналов, положение и протяженность которых изменяются хаотически. Максимальная длина плазменной струи в потоке слабо зависит от начальных давлений в ресивере и камере и от разрядного тока, изменяясь в пределах 30–40 мм.

Обработка сигналов с датчиков давления показала, что при любых начальных условиях разряд практически не влияет на характер распространения сверхзвукового потока.

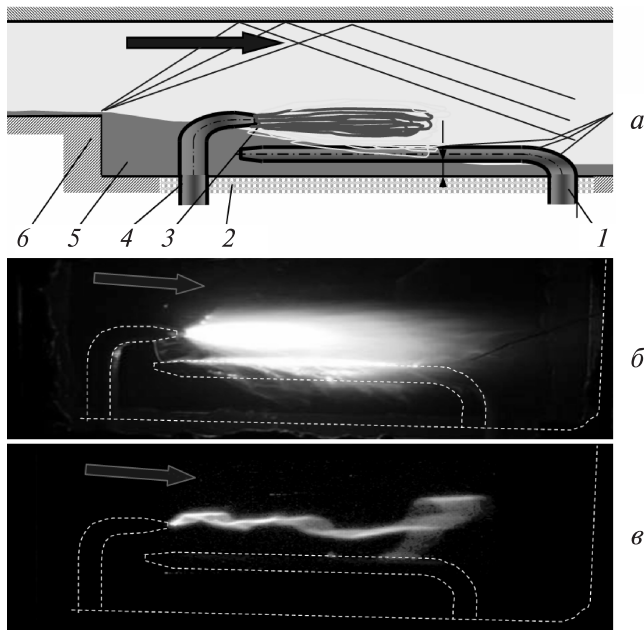


Рис. 1. (а) Схема расположения электродов: 1 — катод (длина горизонтальной части 40 мм), 2 — диэлектрическая подложка, 3 — разряд, 4 — анод, 5 — застойная зона, 6 — стенки канала. Фотографии разряда с экспозицией 800 (б) и 20 (в) мкс

Из обработки осциллограмм следует, что при практически постоянной величине разрядного тока наблюдаются заметные осцилляции напряжения при разряде в потоке. В отличие от строго поперечного разряда [3] осцилляции напряжения носят хаотический характер и обусловлены вариацией длины плазменного образования.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики разряда в потоке при различных давлениях в вакуумной камере (p) и в ресивере (P_0). Значения напряжения при данном токе получались путем усреднения численных данных, полученных из осциллограмм напряжения. В качестве сравнения здесь же представлены ВАХ без воздушного потока. Сопоставление ВАХ показывает, что независимо от наличия или отсутствия потока напряжение на разряде падает с ростом разрядного тока. Величина напряжения в неподвижном газе существенно ниже

падения напряжения на разряде в потоке. Это обусловлено прежде всего меньшей длиной разрядного канала по сравнению со случаем разряда в потоке.

Для проведения спектральных измерений использовался спектрограф AVASPEC, имеющий два рабочих канала: один панорамный со спектральным диапазоном 200–1000 нм и разрешением 20 нм, а второй с узким спектральным диапазоном в интервале 350–450 нм и разрешением 0.15 нм. Программное обеспечение позволяло изменять время экспозиции получения одного кадра спектра (время интеграции или же накопления данных) в пределах от 4 мс до 60 с.

По относительным интенсивностям спектральных линий меди определялась температура заселения некоторых пар энергетических уровней. В экспериментах использовались четыре пары спектральных линий. В пределах ошибки измерений наблюдается совпадение величин температур, полученных для всех пар линий, которые лежат в пределах 1.5 ± 0.5 эВ.

Температура газа определялась по относительным интенсивностям линий вращательной структуры полосы (0, 2) второй положительной системы азота (переход $C^3\pi_u - V^3\pi_g$) с длиной волны кванта $\lambda = 380.5$ нм.

На рис. 3, а приведены графики распределения температуры вдоль потока (x — расстояние от анода по потоку), а на рис. 3, б — по сечению плазменной струи (y — расстояние от катода перпендикулярно потоку). Из приведенных графиков видно, что в пределах ошибки измерений (25%) температура газа слабо меняется как по длине, так и по сечению плазменной струи и находится в пределах 2000 ± 500 К.

При этом средняя мощность, выделяемая в разряде, найденная из вольт-амперных характеристик, составляет 1.6–3.5 кВт. Из этого следует, что температура газа в продольно-поперечном разряде лежит в том же диапазоне значений температур, полученных при близких значениях мощности и давления в плазме поперечного разряда [2, 3].

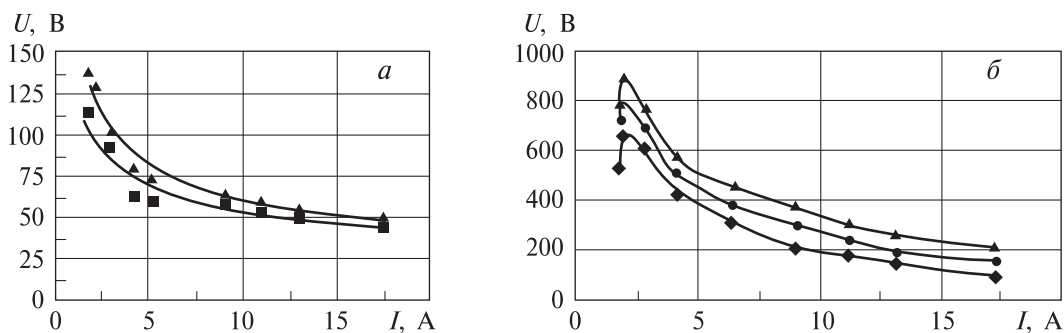


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда: (а) без потока, треугольники — $p = 0.14$ атм., квадраты — $p = 0.28$ атм; (б) с потоком, $p = 0.14$ атм., треугольники — $P_0 = 4$ атм, точки — $P_0 = 3$ атм, ромбы — $P_0 = 2$ атм

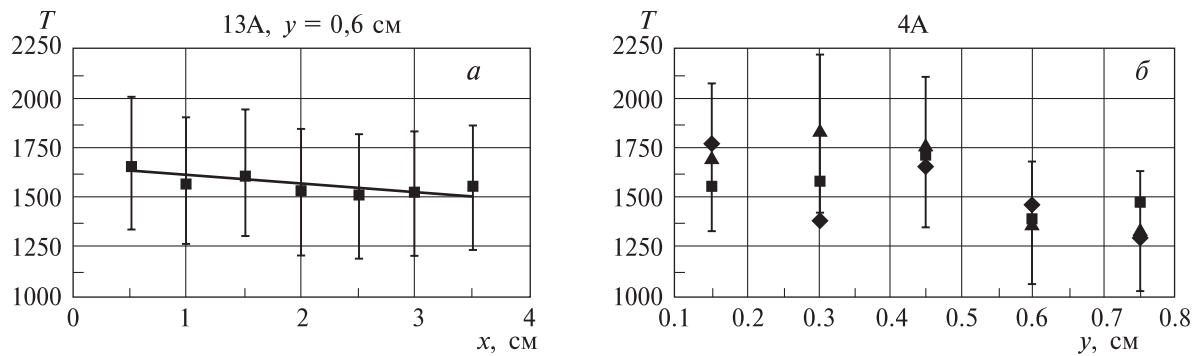


Рис. 3. Распределение температуры газа ($P_0 = 2$ атм, $p = 40$ Торр): (а) вдоль потока, (б) — по сечению плазменной струи: ромбы — $x = 1.5$ см, квадраты — $x = 2.5$ см, треугольники — $x = 3.5$ см

Сравнение двух температур (заселения и газовой) показывает, что плазма ППР в сверхзвуковом потоке имеет достаточно высокую температуру газа ≈ 2000 К и в то же время является сугубо неравновесной.

Таким образом, плазма, созданная продольно-поперечным разрядом, может быть эффективно использована для воспламенения сверхзвукового потока топливно-воздушной смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке комплексной программы научных исследований президиума РАН «Исследование вещества в экстремальных условиях», подпрограмма 2 «Фундамен-

тальные проблемы магнитоплазменной аэродинамики».

Литература

1. Алферов В.И. // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 6. С. 163.
2. Витковский В.В., Грачев Л.П., Грицов Н.Н. и др. // Тр. ЦАГИ. 1991. Вып. 2505. С. 3.
3. Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б. и др. // ТВТ. 2004. 42, № 4. С. 516.
4. Иванов В.В., Скворцов В.В., Кузнецов Ю.Е. и др. // Препринт ЦАГИ № 133, 2002.

Поступила в редакцию
21.02.07