

УДК 537.525

## О ВЛИЯНИИ ЧИСЛА МАХА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

А. Ф. Александров, А. П. Ершов, Б. И. Тимофеев, И. Б. Тимофеев

(кафедра физической электроники)

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

**Проведено сравнение результатов измерений параметров поперечных электрических разрядов в сверхзвуковых потоках с числами Маха  $M = 2$  и  $M = 6$ . Показано, что зависимости напряженности электрического поля и диаметра разрядного канала от тока для двух чисел Маха близки.**

Электрические разряды в сверхзвуковых потоках представляют интерес для решения таких задач сверхзвуковой аэродинамики, как снижение лобового сопротивления сверхзвуковых летательных аппаратов или воспламенение горючего в прямоточных воздушно-реактивных двигателях. При переходе к гиперзвуковым скоростям полета с числами Маха  $M \geq 6$  у плазменных технологий, по-видимому, просто нет альтернативы.

Однако из-за весьма ограниченного числа гиперзвуковых аэродинамических труб и высокой стоимости их эксплуатации большинство экспериментов проведено и проводится в сверхзвуковых потоках с числами Маха  $M \sim 2$ . Поэтому несомненный интерес представляет сравнение свойств разрядов в сверх- и гиперзвуковых потоках воздуха.

В настоящей работе экспериментально исследованы разряды постоянного тока в потоках воздуха с числами Маха  $M = 2$  и  $M = 6$  при близких внешних условиях. Проведено сравнение важных как с физической, так и с практической (определяющих характеристики энерговыклада в поток) точек зрения параметров разряда — напряженности электрического поля в плазме и диаметра разрядного канала.

Одна серия экспериментов проведена на баллонно-вакуумной аэродинамической трубе кратковременного действия с числом Маха  $M = 2$ . Для создания разряда постоянного тока (РПТ) использовался стабилизированный источник питания с регулируемым напряжением до 5 кВ и максимальным током до 4 А.

Другие эксперименты были проведены на гиперзвуковой аэродинамической трубе баллонного типа с числом Маха потока  $M = 6$  Института механики МГУ. Питание разряда осуществлялось высоковольтным регулируемым источником с напряжением до 11 кВ и током до 10 А. В обоих случаях разряды стабилизировались балластными сопротивлениями величиной от 1 до 5 кОм.

Сравнение внешнего вида поперечных к потоку разрядов для двух чисел Маха при близких значениях давления затопленного пространства  $p$ , разрядных токов  $I$ , одинаковой температуре тор-

можения  $T_0 = 300$  К и сопоставимых значениях межэлектродного расстояния  $D_0$  показано на рис. 1. Несмотря на значительное различие чисел Маха, структура свечения обоих разрядов чрезвычайно похожа. Каждый из них представляет собой два узких протяженных канала вдоль потока. Яркость каналов существенно превышает яркость зоны перемыкания между ними (при фоторегистрации с экспозицией в десятые и сотые доли секунды), причем граница зоны перемыкания всегда смещена от электродов вниз по потоку.

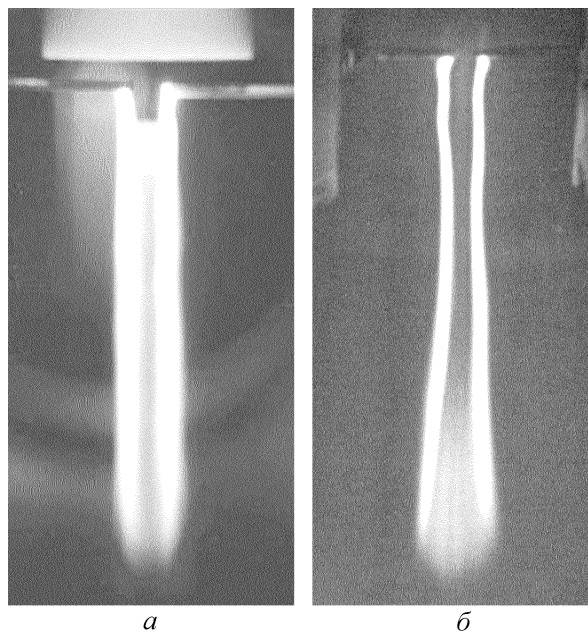


Рис. 1. Фотографии поперечных разрядов постоянного тока в сверхзвуковом потоке (поток направлен сверху вниз, время экспозиции 1/60 с): а  $M = 2$ ,  $P_0 = 1$  атм,  $P = 60$  торр,  $I = 1.3$  А,  $D_0 = 10$  мм, б  $M = 6$ ,  $P_0 = 60$  атм,  $P = 30$  торр,  $I = 1.3$  А,  $D_0 = 3$  мм

Образование параллельных потоку протяженных разрядных каналов за электродами следует рассматривать с точки зрения механизма распространения разряда в пространстве [1]. Скорость распространения разряда задается суперпозицией двух скоростей: скорости потока и скорости ионизации. Последняя,

определяемая процессами переноса, при токах в единицы ампер и давлениях в десятки тор существенно меньше скорости сверхзвукового потока с  $M = 2$ . Поэтому влияние потока является определяющим, задавая конфигурацию протекания электрического тока между электродами. Очевидно, сказанное еще в большей степени применимо к гиперзвуковому потоку с  $M = 6$ .

Именно поэтому внешний вид разрядов в потоках с различными числами Маха подобен и объясняется выносом разрядного канала потоком, который прерывается механизмом повторных пробоев [2].

Одной из важнейших характеристик разряда является напряженность электрического поля в плазме и ее зависимость от разрядного тока. Результаты экспериментальных исследований разряда в потоке с числом  $M = 2$  [3] показали, что, несмотря на нестационарный характер и сложную пространственную структуру разряда, можно оперировать средней (как во времени, так и по длине разрядного канала) величиной напряженности продольного электрического поля  $E$ . Значения усредненного поля находились из экспериментальных данных о протяженности разряда вдоль потока и величине падения напряжения на разряде. Сравнение полученных зависимостей  $E(I)$  для двух чисел Маха показано на рис. 2.

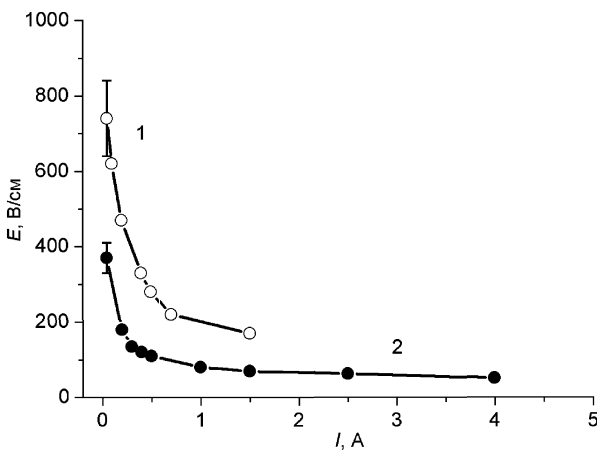


Рис. 2. Зависимость электрического поля в плазме поперечного разряда в потоке воздуха от разрядного тока для различных чисел Маха: (1)  $M = 6$ , (2) —  $M = 2$

Видно, что изменение поля с током подобно для различных значений числа Маха. В области относительно малых токов  $I < 1$  А напряженность электрического поля может достигать значений порядка одного киловольта на сантиметр, однако уже небольшой рост тока приводит к падению  $E$  до значений в десятки вольт на сантиметр. По сути характер ВАХ разряда в потоке близок к поведению ВАХ разрядов в отсутствие потока и соответствует сильноконтрагированному тлеющему или дуговому режиму. Это подтверждает сделанный в [4] вывод о том, что поперечно обтекаемый разряд по своим свойствам мало отличается от продольно обтекаемого и от разряда, стабилизированного стенками.

Характер зависимости  $E(I)$  может быть связан с изменением не только проводимости плазмы, но и

размеров токопроводящей зоны. Результаты измерений диаметра светящегося разрядного канала  $d$  в направлении, перпендикулярном плоскости расположения электродов, для двух чисел Маха показаны на рис. 3. Видно, что диаметр канала определяется прежде всего величиной давления затопленного пространства. При этом в исследованном диапазоне параметров диаметр канала при различных значениях  $M$  растет с ростом тока, качественно соответствуя зависимости  $d(I)$  для дуг в отсутствие потока [5].

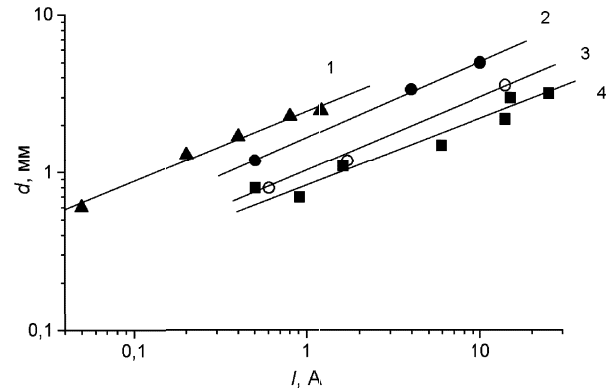


Рис. 3. Зависимость диаметра свечения разрядного канала от разрядного тока при различных давлениях затопленного пространства: (1) —  $M = 6$ ,  $p = 30$  торр,  $P_0 = 60$  атм, (2) —  $M = 2$ ,  $p = 40$  торр,  $P_0 = 1$  атм, (3) —  $M = 2$ ,  $p = 100$  торр,  $P_0 = 2$  атм, 4 —  $M = 2$ ,  $p = 200$  торр,  $P_0 = 4$  атм

Таким образом, при проведении газоразрядных экспериментов в аэродинамических трубах многие важные свойства и характеристики разрядов, полученные при относительно небольших числах Маха, по-видимому, могут быть перенесены на большие числа Маха. Однако возможность переноса данных, полученных в аэродинамических трубах на условия натуральных полномасштабных плазменных аэродинамических экспериментов [6], требует отдельного исследования.

#### Литература

1. Двинин С.А., Ершов А.П., Тимофеев И.Б. и др. // Теплофизика высоких температур. 2004. **42**, № 2. С. 181.
2. Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б. и др. // Теплофизика высоких температур. 2004. **42**, № 4. С. 516.
3. Ershov A.P., Bychkov V.L., Chernikov V.A. et al. Proc. of the 4th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow, 9–11 April 2002. P. 240.
4. Синкевич О.А., Стаханов И.П. Физика плазмы. Стационарные процессы в частично ионизованном газе. Высшая школа. М., 1991.
5. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма / Под ред. В.А. Фабриканта. М., 1961.
6. Ершов А.П., Зорина И.Г., Тимофеев Б.И., Чувашев С.Н. Прикладная физика. 1999. № 5. С. 112.

Поступила в редакцию  
21.05.04