

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ КОМПРЕССИОННОГО ПОТОКА В ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

С.И.АНАНИН, В.М.АСТАШИНСКИЙ

*Институт молекулярной и атомной физики  
Национальной академии наук Беларуси  
Пр. Ф.Скарыны, 70, 220072 Минск, Беларусь  
E-mail: lrpd@imaph.bas-net.by*

**Резюме.** Рассчитаны основные интегральные параметры эрозионных компрессионных плазменных потоков заданного состава, получаемых в воздухе при атмосферном давлении с помощью специально разработанных эрозионных плазмодинамических систем. Показано, что течение плазмы в таких системах описывается электродинамической теорией ускорения плазмы. Предложена постановка задачи расчета локальных параметров и излучательных характеристик таких потоков.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Получение направленных плазменных потоков в плотных газах (в том числе и в воздухе при атмосферном давлении, т.е. в условиях свободного доступа к плазме) с помощью плазменных ускорителей вызывает достаточно большие трудности, связанные с необходимостью тщательной симметризации разряда — равномерным распределением разрядного тока по рабочей поверхности коаксиальных электродов. Интерес к таким плазменным потокам вызван возможностью их использования для разработки новых технологий плазменной обработки материалов.

Компрессионные эрозионные плазменные потоки заданного состава, определяемого материалом внутреннего электрода, впервые были получены в воздухе при атмосферном давлении с помощью

специально разработанных эрозионных плазмодинамических систем, подробно описанных в (Асташинский, 2000).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивое существование компрессионных эрозионных плазменных потоков на квазистационарной стадии развития разряда в исследуемых плазмодинамических системах указывает на то, что газокинетическое давление плазмы в потоке уравнивается давлением азимутального магнитного поля тока, текущего вдоль потока.

При этом из соотношения Беннета  $2NkT = \frac{H^2}{8\pi}$  можно определить

значение удерживающего тока в соответствии с выражением:

$I = 41,6 \cdot 10^{-8} \cdot R \cdot \sqrt{NT}$ , где ток  $I$  выражен в [А], концентрация электронов  $N_e$  — в [см<sup>-3</sup>], температура плазмы  $T$  — в [К], а радиус потока  $R$  — в [см]. В торцевом эрозионном устройстве (ТЭУ) при  $U_0 = 5$  кВ для момента времени  $t = 50$  мкс концентрация электронов  $N_e$  равна  $4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а температура плазмы  $T_{pl} = 2 \cdot 10^4$  К (Асташинский, 2000). Радиус компрессионного плазменного потока  $r$  составляет при этом 1,5 см. При данных параметрах компрессионного потока значение удерживающего тока оказывается равным 56 кА. Значение же разрядного тока для указанного момента времени составляет 60 кА. В комбинированной эрозионной плазмодинамической системе (КЭПС) при  $U_0 = 5$  кВ для момента времени  $t = 65$  мкс  $N_e = 10^{18}$  см<sup>-3</sup>,  $T_{pl} = 4 \cdot 10^4$  К, а  $r = 1,2$  см. Тогда значения удерживающего и разрядного токов составляют соответственно 110 и 120 кА. Видно, что, с учетом погрешности экспериментов и расчетов, практически весь разрядный ток течет вдоль компрессионного потока.

Компрессионный характер течения плазмы в рассматриваемых эрозионных плазмодинамических системах позволяет, используя экспериментально полученные значения основных параметров плазмы, определить интегральные характеристики компрессионного потока, такие как массовый расход ионов  $\dot{m}_i$ , эквивалентный ион-

ный ток  $I_m$  и параметр обмена  $\xi$ , а также провести сравнение экспериментальных результатов с данными, следующими из теоретического описания процессов в плазменных ускорителях (Морозов, 1978).

Средний массовый расход ионов и эквивалентный ионный ток определим согласно выражениям:  $\dot{m}_i = N_i V_i S M_i$  и  $I_m = N_i V_i S e$ , где  $N_i$  — концентрация частиц;  $V_i \equiv V_{pl}$  — скорость плазмы;  $S$  — площадь поперечного сечения плазменного потока;  $M_i$  — масса протона;  $e$  — заряд электрона. В торцевом эрозионном устройстве при  $U_0 = 5$  кВ для квазистационарной стадии разряда  $\dot{m}_i$  составляет 70 г/с и 230 кА, а в комбинированной плазмодинамической системе соответственно — 130 г/с и 420 кА. Параметр обмена  $\xi = I_p / I_m$  в этом случае равен для ТЭУ 0,39, а для КЭПС — 0,35. Эти же величины ( $\dot{m}_i$ ,  $I_m$  и  $\xi$ ) определим исходя из теоретического описания электродинамического ускорения плазмы. Массовый расход ионов

определим из выражения  $\dot{m}_i = \Theta \cdot 10^{-2} \frac{I_p^2}{V_{pl}}$ .

При наблюдаемых в экспериментах значениях  $I_p$  и  $V_{pl}$  получим для торцевого устройства  $\dot{m}_i = 62$  г/с, а для комбинированной системы — 110 г/с. Эквивалентный ионный ток  $I_m = e \cdot \dot{m}_i / M_i$  в этом случае равен 200 кА в ТЭУ, а в КЭПС — 360 кА. Тогда параметр обмена  $\xi$  составит для ТЭУ 0,45 и для КЭПС — 0,42. Были также рассчитаны максимально возможная скорость течения плазменного потока  $V_{max}$  и температура плазмы  $T_{pl}$  в ТЭУ и КЭПС. Для торцевого устройства рассчитанные значения  $V_{max}$  и  $T_{pl}$  составили соответственно  $2,7 \cdot 10^6$  см/с и  $3,4 \cdot 10^4$  К, а для комбинированной системы —  $6,5 \cdot 10^6$  см/с и  $5,8 \cdot 10^4$  К. В то же время экспериментально измеренные значения скорости и температуры плазмы в ТЭУ равняются соответственно  $2 \cdot 10^6$  см/с и  $2,2 \cdot 10^4$  К, а в КЭПС —  $5 \cdot 10^6$  см/с и  $4 \cdot 10^4$  К. Таким образом, проведенный анализ показывает, что рассчитанные и

экспериментально измеренные значения сравниваемых интегральных параметров плазмы в эрозионных плазмодинамических системах не противоречат друг другу, т.е. поведение плазмы в рассматриваемых эрозионных плазмодинамических системах соответствует электродинамической теории ускорения плазмы, в том числе и теории компрессионных течений (Морозов, 1978).

Для того, чтобы иметь возможность рассчитывать не только интегральные, но и локальные параметры эрозионного потока, а также его излучательные характеристики, можно использовать двумерную одножидкостную модель, основанную на методе крупных частиц с введением магнитного поля и учетом переноса энергии излучением в двухпоточковом приближении по координатам  $z$  и  $r$  (Ананин С.И., 1986). Учет спектрального состава излучения при этом проводится в многогрупповом приближении. Внутри каждой группы – интервала частот коэффициент поглощения полагается не зависящим от частоты и равным усредненному по распределению Планка в границах данной группы. Эти коэффициенты так же, как и уравнение состояния меди и воздуха, используются в виде таблиц по методике, описанной в (Каськова С.И. и др., 1999). В расчетах проводимости меди используется методика, описанная в (Калиткин Н.Н. и др., 1972).

### Литература

- Асташинский В.М.: 2000, Журнал прикладной спектроскопии, **67**, 229.
- Морозов А.И.: 1978, Физические основы космических электрореактивных двигателей, Атомиздат, Москва.
- Ананин С.И.: 1986, Теплофизика высоких температур, **24**, 1182.
- Каськова С.И., Романов Г.С.: 1999, Инженерно-физический журнал, **72**, 1093.
- Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Рогов В.С.: 1972, Таблицы термодинамических функций и транспортные коэффициенты плазмы. Москва.