

УДК 533

## **Зондовые измерения в потоке разреженной плазмы, истекающей из магнитоплазгодинамического движителя**

**В.А. Котельников, М.В. Котельников**

Предложена методика обработки зондового эксперимента в потоке разреженной плазмы с помощью плоского зонда, ориентированного на встречу вектору скорости потока.

Приведены результаты обработки зондовой характеристики, полученной в потоке, истекающем из магнитоплазгодинамического движителя.

Ключевые слова: зондовая диагностика плазмы, плоские электрические зонды, магнитоплазгодинамический двигатель, зондовая характеристика.

Ориентированные плоские зонды, как и ориентированные цилиндрические зонды, позволяют расширить возможности зондового метода: наряду с классическим набором определяющих параметров плазмы они позволяют дополнительно получить локальные значения направленной скорости ионов в потоке. Это позволяет рассматривать зондовый метод, как один из основных методов диагностики плазменных потоков, истекающих из различных типов плазменных движителей. Вольтамперные характеристики цилиндрических ориентированных зондов получены методами математического моделирования и опубликованы в достаточном для практики объеме [1,2].

Характеристики плоских ориентированных зондов в настоящее время отсутствуют. Это связано с тем, что задача нахождения плотности тока на плоский ориентированный зонд в потоке разреженной плазмы осложняется наличием таких нелинейных эффектов, как концевой и краевой, которые зависят от ряда характерных безразмерных параметров задачи: радиуса зонда  $r_0$ , его потенциала  $\varphi_0$ , скорости потока  $U_0$  и отношения температур ионов и электронов  $\varepsilon = T_i/T_e$ , где  $r_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $U_0$  – определяются, как отношение размерных значений  $r_p$ ,  $\varphi_p$ ,  $U_\infty$  к соответствующим масштабам [3]. Однако имеются такие интервалы изменения этих параметров, в которых концевые и краевые эффекты малы и ими можно пренебречь [4]. Это позволяет даже при отсутствии необходимого набора вольтамперных характеристик в некоторых случаях проводить зондовые измерения в потоках разреженной плазмы плоскими ориентированными зондами.

Эксперимент проводился в потоке, истекающем из магнитоплазодинамического движителя (МПД), предложенного в 1963 году Ю.В. Кубаревым. МПД до настоящего времени на постоянной основе не работал на космических орбитах, однако он имеет ряд достоинств и после незначительной доработки может использоваться в некоторых космических программах [5].

На рис. 1 приведен внешний вид МПД движителя и его принудительная схема.

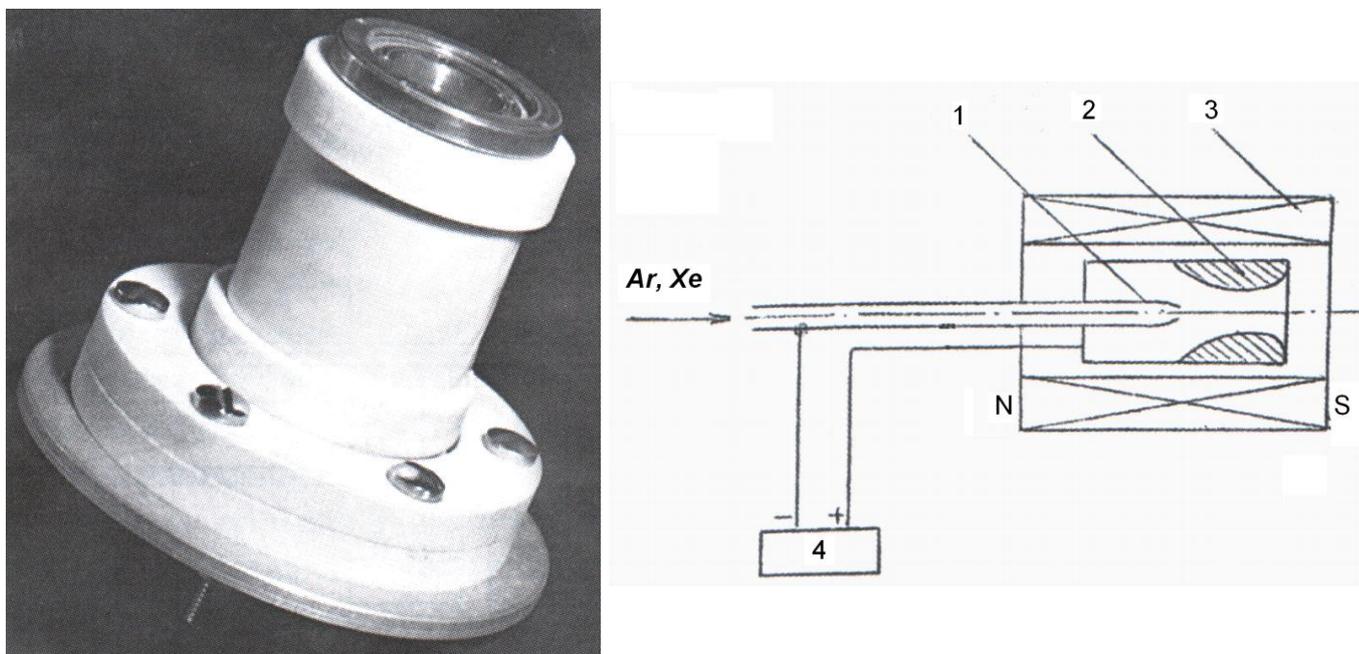


Рис.1. Внешний вид и принципиальная схема МПД

1- полый катод; 2- анод; 3- магнитная система; 4 – анодный источник питания

Разрядная камера источника представляет собой полый цилиндр (анод 2), охлаждаемый водой, и полый катод 1. Между катодом и анодом прикладывается напряжение в несколько десятков вольт (4 В). Разрядный ток может меняться от нескольких ампер до нескольких сотен ампер. Снаружи анода располагается магнитная система (3), создающая осесимметричное неоднородное магнитное поле. Механизмов ускорения плазмы несколько: основную роль играет тепловое ускорение и электромагнитное ускорение в скрещенных электрических и магнитных полях. В стендовых условиях струя плазмы истекает в рабочую камеру, в которой поддерживается давление  $10^{-3} \div 10^{-4}$  мм.рт.ст.

Существуют конструкции МПД движителя, в которых катодный блок представляет собой СВЧ-источник плазмы.

В эксперименте использовался плоский зонд, активная поверхность которого направлена навстречу вектору скорости потока. Схематичная конструкция зонда изображена на рис. 2.

Диаметр зонда составлял 4 мм при диаметре потока плазмы в 40 мм. Зонд устанавливался на оси потока на расстоянии 60 мм от среза сопла. Автоматизированная электронная измерительная

схема позволяла получить зондовую характеристику за несколько секунд. Охлаждения зонда не требовалось, поскольку тепловые потоки из плазмы не приводили к чрезмерному нагреванию его поверхности.

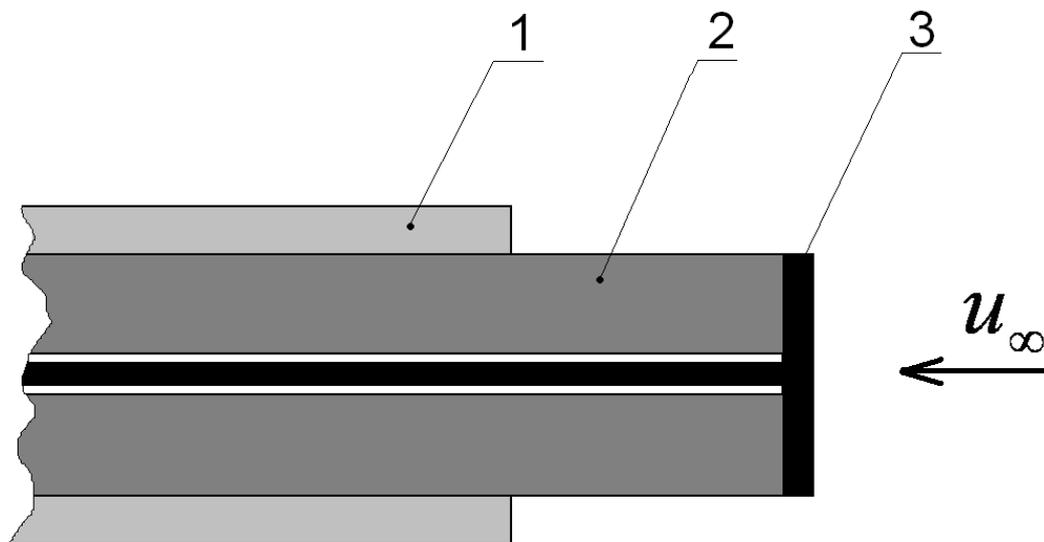


Рис.2. Схематичная конструкция зонда

1 – медная трубка-корпус; 2 – керамическая втулка-изолятор; 3 – активная поверхность зонда

Как показано в [6], если характерный размер зонда велик по сравнению с радиусом Дебая в плазме, то можно пренебречь краевыми эффектами, что существенно упрощает методику обработки зондовой характеристики, которая получена при следующих параметрах разряда: разрядный ток  $I = 1,5$  А; напряжение разряда  $U = 48$  В; плазмообразующий газ – воздух.

Обработка зондовых характеристик проводилась по следующему алгоритму:

1. Определяется потенциал плавающего тела  $\varphi_{пл}$ , как точка на характеристике с нулевым током.
2. Определяется потенциал пространства  $\varphi_{пр}$ . Для этого находится первая производная от электронного тока по потенциалу. Потенциал, соответствующий максимуму этой зависимости рассматривается как потенциал пространства.
3. Оценивается температура электронов  $T_e$  по разности потенциалов  $\varphi_{пр}-\varphi_{пл}$  [7]

$$T_e = (\varphi_{пр} - \varphi_{пл}) \frac{2e}{k} \left[ \text{Ln} \frac{m_i}{2,3m_e} \right]^{-1}$$

Более точное значение  $T_e$  определяется по второй производной от электронного тока по потенциалу по методу Дрювестейна [8]. Функция распределения электронов по энергиям

$$f(E) = \frac{4}{e^3 S} \left( \frac{m_e E}{2} \right)^{1/2} \frac{d^2 I_e}{d\varphi^2}, \text{ где } S - \text{площадь зонда.}$$

$$f_{\text{норм}}(E) = f(E) \left[ \int_0^{\infty} f(E) dE \right]^{-1}.$$

По нормированной функции  $f_{\text{норм}}(E)$  определяется средняя энергия электронов и их средняя температура

$$E_{\text{cp}}(E) = \int_0^{\infty} E f_{\text{норм}}(E) dE; \quad (T_e)_{\text{cp}} = \frac{2}{3} \frac{E_{\text{cp}}}{k}$$

4. Концентрацию электронов можно оценить по формуле Ленгмюра [8] для точки характеристики, соответствующей  $\varphi_{\text{пр}}$

$$n_e = \frac{I_e}{eS \left( \frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2}}$$

Направленная скорость ионов определяется по ионной ветви характеристики. Ионный ток зависит от концентрации ионов и их скорости вблизи поверхности зонда  $u_p$ . Если направленная скорость потока значительно больше тепловой скорости ионов, то

$$\frac{m_i u_p^2}{2} = \frac{m_i u_{\infty}^2}{2} + e\varphi_p, \text{ откуда}$$

$$u_p = \left( u_{\infty}^2 + \frac{2e\varphi_p}{m_i} \right)^{1/2}$$

и ионный ток на зонд

$$I_i = en_i u_p S = en_i u_{\infty} S \left( 1 + \frac{2e\varphi_p}{m_i u_{\infty}^2} \right)^{1/2}.$$

Следовательно,

$$u_{\infty} = \left[ \left( \frac{I_i}{en_i S} \right)^2 - \frac{2e\varphi_p}{m_i} \right]^{1/2}.$$

6. Используя результаты математического моделирования [2,3,4,6], можно также определить значения толщины слоя объемного заряда  $\Delta$  вблизи зонда и характерное время релаксации в плазме  $\tau$ .

В результате использования приведенной методики обработки зондовой характеристики получены следующие результаты:

$$\varphi_{\text{пл}} = 8 \text{ В};$$

$$\varphi_{\text{пр}} = 52 \text{ В};$$

$$T_e = 13,1 \text{ эВ};$$

$$n_i = n_e = 3,2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3};$$

$$u_{\infty} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ м/с};$$

$$\Delta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$$\tau = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

## Список литературы

1. Котельников М.В. Вольт-амперные характеристики цилиндрического зонда в потоке столкновительной и бесстолкновительной плазмы. ТВТ, 2008, т. 46, №5, с. 17-20;
2. Котельников М.В. Механика и электродинамика пристеночной плазмы. Дисс. на соиск. ученой степени д.ф.-м.н. Москва, МАИ, 2008г, 271 с.;
3. Алексеев Б.В., Котельников В.А. Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988, 239 с.;
4. Энциклопедия низкотемпературной плазмы под редакцией акад. Фортова В.Е., том V-1, Диагностика низкотемпературной плазмы, Глава 5, Котельников В.А., Зондовая диагностика плазменных потоков, с. 614-638;
5. Кубарев Ю.В., Коршаковский С.И., Черник В.Н. Магнитоплазодинамический ускоритель и его применение в наземных и космических условиях. Наука и технологии, №1, 2009, с. 12-26;
6. Котельников В.А., Гидаспов В.Ю., Котельников М.В. Математическое моделирование обтекания тел потоками бесстолкновительной и столкновительной плазмы. Изд-во Физматлит, 2010, 288 с. Поддержано РФФИ, грант № 08-08-13586 ОФИ-Ц;
7. Методы исследования плазмы. Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. М.: Мир, 1971;
8. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.

## Сведения об авторах

Котельников Вадим Алексеевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., профессор.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-19-70; e-mail: mvk\_home@mail.ru

Котельников Михаил Вадимович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.ф.-м.н., доцент.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-19-70; e-mail: mvk\_home@mail.ru

