

04

Зондовые измерения в затопленной разреженной струе плазмы

© В.А. Котельников, В.П. Ким, М.В. Котельников

Московский авиационный институт, Москва
НИИ прикладной механики и электродинамики, Москва
E-mail: mvk_home@mail.ru

Поступило в Редакцию 30 марта 2010 г.

Предложена методика обработки зондового эксперимента в случае, когда поток разреженной плазмы движется сквозь разреженную фоновую плазму, причем концентрации заряженных частиц в потоке и фоновой плазме могут быть сравнимы.

Представлены результаты обработки зондового эксперимента в затопленном потоке разреженной плазмы, истекающей из стационарного плазменного двигателя (СПД).

Зондовые измерения в потоках разреженной плазмы с помощью ориентированных зондов проводились еще в 70-х годах прошлого столетия в связи с работой по созданию плазменных двигателей для космических полетов. Эксперименты проводились первоначально в лабораторных условиях [1], а затем и в условиях ионосферы [2]. Ввиду недостаточного развития зондовой теории указанные в [1,2] измерения носили скорее качественный, чем количественный характер. Достаточно строгая зондовая теория цилиндрических ориентированных зондов и необходимый для практики набор возможных вольт-амперных характеристик (ВАХ) появились лишь в последние десятилетия [3,4]. Однако эти работы были ориентированы на случай, когда концентрация заряженных частиц в потоке плазмы была значительно выше концентрации в фоновой плазме. Это условие заведомо выполнялось для зондовых измерений в ионосферной плазме, когда электрические зонды расположены на борту спутника, а также в лабораторных условиях при работе с сильноточными плазменными двигателями и двигателями холлового типа [1].

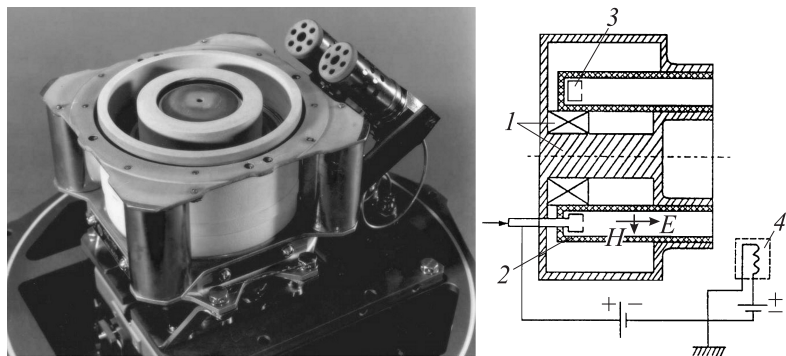


Рис. 1. Общий вид (а) и принципиальная схема двигателя СПД-100 (b).

Совершенно иные условия возникли в струях стационарных плазменных двигателей, относящихся к классу двигателей с замкнутым дрейфом электронов.

Схема такого двигателя была предложена А.И. Морозовым, и в 1972 г. он впервые прошел успешные летные испытания на борту спутника „Метеор“ [5]. В настоящее время усовершенствованные СПД серийно производятся в ОКБ „Факел“ (г. Калининград) и применяются для коррекции орбит ряда российских и зарубежных геостационарных спутников.

На рис. 1 приведен общий вид серийного двигателя СПД-100 и его принципиальная схема.

Из кольцевой разрядной камеры двигателя истекает поток плазмы со скоростями в диапазоне 10–30 km/s. При работе на ксеноне разрядное напряжение составляет 200–1000 V, а плотность тока в ускорительном канале двигателя достигает порядка 10^3 A/m².

Двигатель работает следующим образом. Рабочий газ (ксенон) подается в ускорительный кольцевой канал двигателя 2 через анод-газораспределитель 3. Разрядное напряжение прикладывается между анодом и расположенным вне разрядной камеры катодом [4]. Магнитная система 1 создает практически радиальное магнитное поле, а электрическая система — осевое электрическое поле. Таким образом, возникает разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Замагниченные электроны совершают в среднем азимутальные дрейфовые

движения и осуществляют ионизацию рабочего газа, а немагнитные ионы ускоряются в осевом направлении, создавая реактивную тягу двигателя. Особенностью двигателя является то, что ускорение ионов происходит в квазинейтральной плазме, концентрация которой может превосходить концентрацию в потоке. У электронов фона и потока могут отличаться не только концентрации, но и температуры.

В описанных условиях определению подлежат параметры как потока, так и фона. Если цилиндрический зонд расположить вдоль потока, то по ионному току насыщения можно определить суммарную концентрацию заряженных частиц в потоке и фоне, а по электронной ветви ВАХ — температуры электронов для фона и для потока в отдельности [6]. При этом необходимо сделать зонд достаточно длинным, чтобы можно было пренебречь краевым и концевым эффектами.

Возможные ВАХ цилиндрического зонда, расположенного поперек потока плазмы, получены в [4,7] с использованием методов математического моделирования в достаточных для практики интервалах изменения характерных параметров задачи. В [4,7] показано, что зондовый ток зависит от направленной скорости u , потенциала зонда φ и его радиуса r . С увеличением u ВАХ при различных r сближаются и постепенно сливаются в одну линию. Физически это означает, что влияние направленной скорости на зондовый ток становится существенно больше, чем влияние потенциала зонда. Ток ионов на зонд определяется при этом очевидным выражением

$$I_i = (2rl)n_iue, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, n_i — концентрация ионов, $(2rl)$ — сечение зонда, обращенное перпендикулярно вектору скорости потока плазмы. Данную ситуацию предвидел еще Ленгмюр [8], который совместно с Мотт-Смитом в 1926 г. предложил следующее выражение для ионного тока в режиме орбитального движения:

$$I_i = (2rl)n_iue \sqrt{1 - \frac{2e\varphi}{m_i u^2}}. \quad (2)$$

В [4,7] показано, что при достаточно больших скоростях формула (2) с хорошей точностью определяет зависимость тока от параметров задачи. В области относительно небольших скоростей формула (2) неверна и

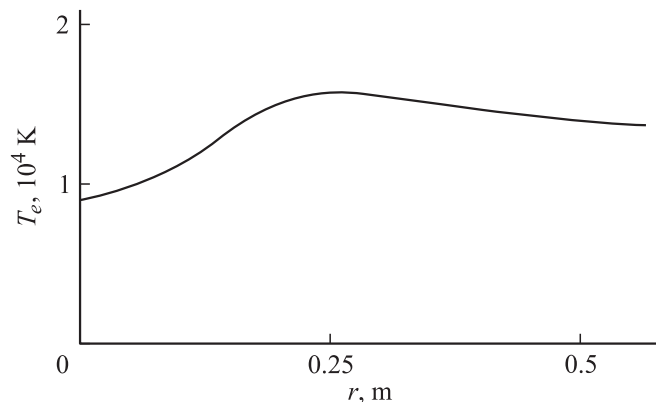


Рис. 2. Распределение температуры электронов вдоль радиуса струи ($U_{discharge} = 800$ V; $u = 20$ km/s; $T_i = 5 \cdot 10^3$ K).

следует использовать ВАХ, полученные в [4,7]. В предельном случае $u \rightarrow 0$ справедливы ВАХ, впервые полученные Лафрамбуазом [6] для случая покоящейся бесстолкновительной плазмы.

В условие (2) входят две неизвестные величины, подлежащие определению: концентрация ионов в потоке плазмы и скорость потока. Для замыкания задачи направленную скорость потока приходится определять независимыми методами. Кроме того, как показано в [9], если ток на зонд, перпендикулярный потоку, много больше тока на зонд, параллельный потоку, в левую часть формулы (2) следует ставить разность токов ΔI между токами на зонды, расположенные перпендикулярно и параллельно потоку. Это позволяет избавиться от вклада в ток на зонд, расположенный перпендикулярно потоку, составляющей, связанной с фоновой плазмой. Тогда формула (2) приобретает вид

$$\Delta I = (2rl)n_1ue \sqrt{1 - \frac{2e\phi}{m_i u^2}}, \quad (3)$$

где n_1 — концентрация ионов в потоке.

Зондовый эксперимент проводился в струе СПД, конструкция которого приведена на рис. 1 [9].

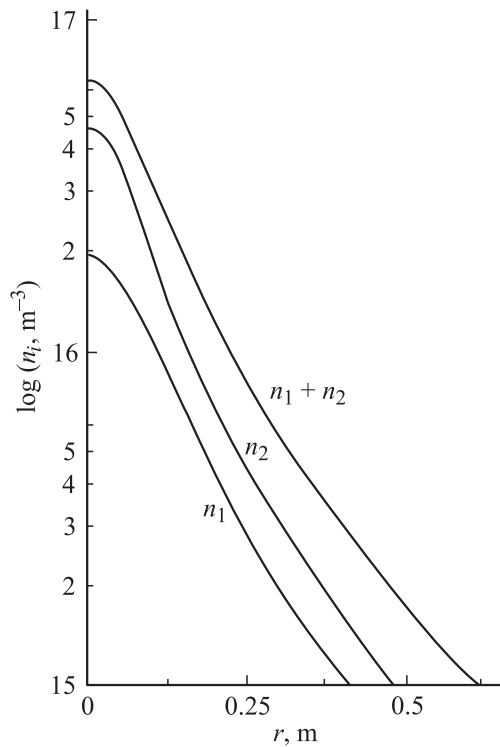


Рис. 3. Распределение концентрации ионов в потоке n_1 , в фоновой плазме n_2 и суммарной концентрации ($n_1 + n_2$) вдоль радиуса струи ($U_{\text{discharge}} = 800 \text{ V}$; $u = 20 \text{ km/s}$; $T_i = 5 \cdot 10^3 \text{ K}$).

Зондовый блок состоял из двух скрещенных под углом 90° цилиндрических зондов радиусом $r_p = 0.75 \text{ mm}$ и длиной $l_p = 15 \text{ mm}$. Один из зондов располагался параллельно вектору скорости, другой — перпендикулярно. Расстояние от струи сопла составляло 0.7 m . Блок мог перемещаться вдоль радиуса струи. С электронной схемы на зонды подавался пилообразный потенциал с амплитудой 100 V . Соответственно каждому значению потенциала измерялся зондовый ток.

На рис. 2 и 3 приведено распределение температуры электронов, а также концентрации ионов в потоке n_1 , в фоновой плазме n_2 и

суммарной концентрации ($n_1 + n_2$) в зависимости от радиуса. При этом направленная скорость потока была измерена независимым методом с помощью анализа распределения ионов по энергиям и составляла порядка 20 km/s.

Как следует из рис. 2, температура электронов в несколько раз выше, чем температура ионов.

Концентрация заряженных частиц в струе n_1 оказалась ниже, чем в фоновой плазме n_2 . Отношение n_2/n_1 в условиях эксперимента колебалось в интервале 1.3–2.5. При этом самое большое отношение оказалось на оси струи.

Список литературы

- [1] *Котельников В.А.* Зондовые измерения в движущейся плазме: Дис. . . канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МАИ, 1965. 115 с.
- [2] *Кубарев Ю.В., Котельников В.А.* // Материалы IV Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М., 1978. С. 209–211.
- [3] *Котельников В.А.* Зондовая диагностика плазменных потоков // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. V-1. Ч. I. / Гл. ред. акад. В.Е. Фортов. М., 2006. С. 614–638.
- [4] *Котельников М.В.* Механика и электродинамика пристеночной плазмы: Дис. . . докт. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МАИ, 2008. 271 с.
- [5] *Ким В.П., Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П.* и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277–292.
- [6] *Алексеев Б.В., Котельников В.А.* Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 239 с.
- [7] *Котельников М.В.* // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 17–20.
- [8] *Langmuir I.* // Phys. review. 1926. V. 26. P. 727.
- [9] *Котельников В.А., Ким В.П., Котельников М.В.* Взаимодействие тел с потоками разреженной плазмы. М.: Изд-во МАИ, 2010. 186 с.