

01;04;12

## Мембранные колебания в канале стационарного плазменного двигателя

© А.И. Бугрова, А.С. Липатов, А.И. Морозов, В.К. Харчевников

Московский государственный институт радиотехники, электроники и  
автоматики

Поступило в Редакцию 11 февраля 1999 г.

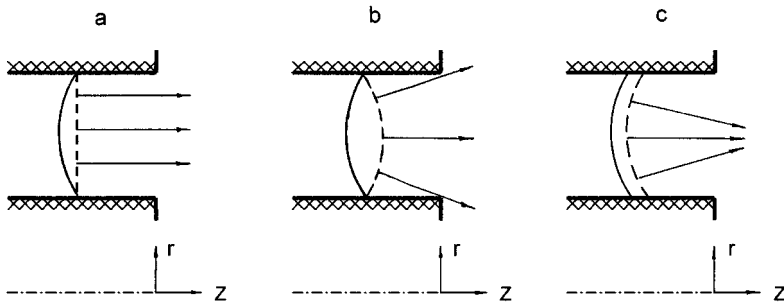
В канале стационарного плазменного двигателя экспериментально обнаружены предсказанные ранее очень сильные низкочастотные колебания ( $\sim 35$  kHz), обусловленные главным образом колебаниями электронной температуры и влияющие на расходимость ионного потока.

Низкочастотные ( $f \leq 1$  MHz) колебания в канале стационарного плазменного двигателя (СПД) обладают осевой симметрией [1,2]. Поэтому эквипотенциали (а не магнитодрейфовые поверхности) при колебаниях могут либо перемещаться вдоль канала (по оси  $z$ ), либо изменять свою кривизну вдоль радиуса  $r$ . Обычно рассматриваются колебания первого типа — "продольные". На большое влияние второго типа обратил внимание в 1995 г. А.И. Морозов и назвал их "мембранными". Мембранные колебания (МК) существенно влияют на расходимость выходящей плазменной струи и эрозию выходной части изоляторов канала [3]. Появление МК принципиально связано с колебаниями электронной температуры и наличием поперечного градиента плотности потока. Это утверждение следует из формулы для электрического потенциала [1]

$$\Phi(\bar{x}, t) = \Phi^*(\psi) - \frac{1}{e} \int \frac{dP_e}{n}. \quad (1)$$

Здесь  $\psi(r, z)$  — функция магнитного потока,  $P_e = P_e(n, \psi)$ , остальные обозначения общепринятые. Для наглядности выпишем (1) для максвелловского распределения электронов:

$$\Phi(\bar{x}, t) = \Phi^*(\psi) - \frac{kT_e(t, \psi)}{e} \ln \frac{n(\bar{x}, t)}{n_0}. \quad (2)$$



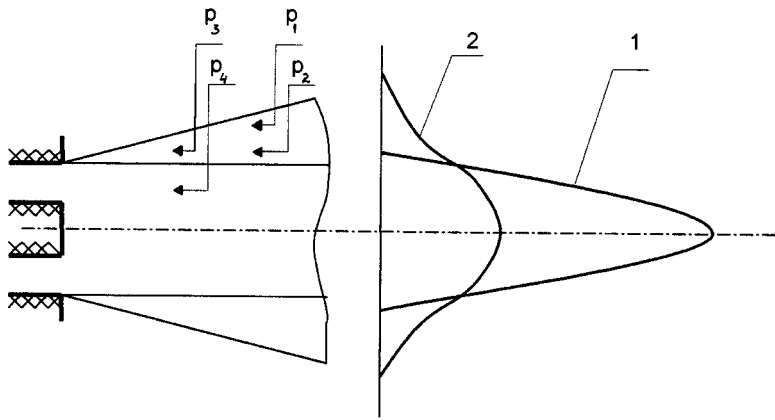
**Рис. 1.** Различные формы эквипотенциалей и магнитных силовых линий в канале СПД при различных значениях электронной температуры: *a* —  $T_e \sim T_{e0} \sim \varepsilon^*/e$  ( $\sigma = 1$ ), где  $\varepsilon^*$  — значение энергии электронов, при которой коэффициент вторичной эмиссии изолятора равен 1; *b* —  $T_e \sim T_{e\max} > \varepsilon^*/e$  ( $\sigma = 1$ ); *c* —  $T_e \sim T_{e\min} < \varepsilon^*/e$  ( $\sigma = 1$ ). Сплошные линии — магнитные силовые линии; пунктирные линии — эквипотенциали.

Хотя изменение кривизны эквипотенциалей может быть связано и с возмущением плотности, но, как показывают эксперименты по измерению колебаний ионного тока и электронной температуры [4], роль колебаний  $T_e$  является определяющей.

На рис. 1 изображены формы эквипотенциалей при трех значениях  $T_e$ : оптимальной  $T_{e0}$  (рис. 1, *a*), максимальной  $T_{e\max}$  (рис. 1, *b*) и минимальной  $T_{e\min}$  (рис. 1, *c*). В случае расходящегося потока (рис. 1, *b*) на оси системы возникает зона кроссовера, которая характеризуется сложным наложением потоков, сильно зависящих от индивидуальных особенностей СПД и режима его работы.

На рис. 2 показаны распределения плотности потока, вышедшего из СПД при  $r \geq r_1$ , где  $r_1$  — радиус внутреннего изолятора канала, соответствующие рис. 1, *a* и *b*.

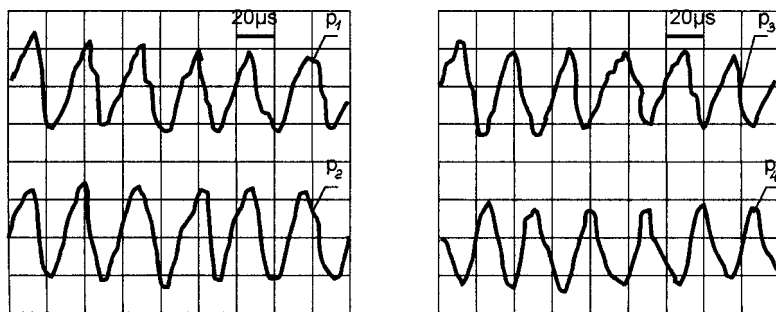
Если в системе появляются мембранные колебания, то распределение плотности потока будет меняться во времени в соответствии с рис. 2. Тогда, если взять две пары зондов  $p_1, p_2$  и  $p_3, p_4$ , положения которых указаны на рис. 2, то, очевидно, следует ожидать при наличии МК, что ионные сигналы на зонды  $p_1, p_2$  будут в фазе, а на зонды  $p_3, p_4$  — в противофазе. При этом сигналы должны сопровождаться колебаниями электронной температуры в канале СПД.



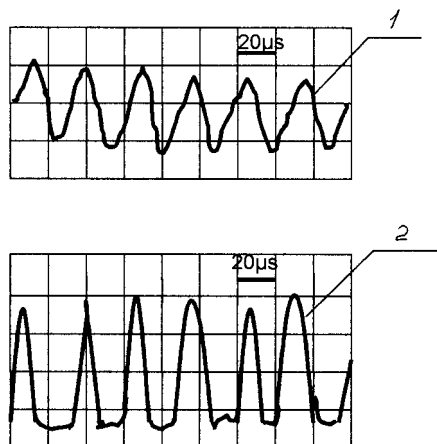
**Рис. 2.** Распределение плотности ионного потока и положение зондов относительно среза двигателя;  $p_1, p_2$  — первая пара зондов;  $p_3, p_4$  — вторая пара зондов. 1 — распределение плотности ионного потока для момента времени  $t_1$ . 2 — распределение плотности ионного потока для момента времени  $t_2$ .

Исследования, проведенные на СПД–Атон [5] в режиме  $\dot{m} = 2 \text{ mg/s}$ ,  $U_p = 250 \text{ V}$  с использованием зондов, полностью подтвердили эти ожидания. Эксперимент проводился с использованием двух плоских зондов с собирающей поверхностью  $S = 60 \text{ mm}^2$  при фиксированном расстоянии между ними  $d = 4 \text{ cm}$ . С помощью координатного устройства зонды перемещались как вдоль (ось  $z$ ), так и поперек (ось  $r$ ) плазменного потока. На зонды подавался отрицательный относительно земли потенциал  $\varphi = -21 \text{ V}$ , что позволило выделить ионную компоненту зондового тока и получить осциллограмму колебаний  $J_1$  на экране запоминающего осциллографа. Частота низкочастотных колебаний составила  $\sim 35 \text{ kHz}$ . Эксперимент показал, что при перемещении зондов вдоль  $r$  сигналы с зондов находятся либо в фазе, либо в противофазе (рис. 3, а). Чем больше  $z$ , т.е. чем дальше мы уходим от среза двигателя, тем дальше от оси симметрии плазменной струи смещаются эти положения. Таким образом, было подтверждено, что за срезом двигателя существуют области, в каждой из которых колебания синхронны: а между ними расположена зона, в которой колебания находятся в противофазе.

a



b



**Рис. 3.** *a* — колебания ионного тока на две пары зондов —  $p_1, p_2$  и  $p_3, p_4$ .  
*b* — колебания ионного тока (1) и электронной температуры (2).

На рис. 3, *b* приведены осциллограммы колебаний ионного тока на пристеночный зонд, установленный в канале двигателя, и электронной температуры, которая получена из обработки зондовых вольт-амперных характеристик. Из осциллограмм видно, что наличие колебаний ионного

тока на пристеночные зонды сопровождается колебаниями электронной температуры.

Таким образом, экспериментально подтверждено существование мембранных колебаний в стационарном плазменном двигателе.

Настоящая работа выполнена при поддержке INTAS 96 2276.

## Список литературы

- [1] *Морозов А.И.* Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.: Атомиздат, 1978.
- [2] *Morozov A.I.* // 24th International Electric Propulsion conference. Moscow, 1995.
- [3] *Архипов Б.А., Гниздор Р.Ю., Масленников Н.А., Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 9. С. 1241–1244.
- [4] *Bugrova A.I., Morozov A.I.* // XXIII rd International Conference on Phenomena in Ionized Gases. 17–22 July 1997y. Toulouse–France.
- [5] *Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1997. Т. 23. В. 7. С. 635–645.