

04

## „Эффект памяти“ в стационарных плазменных двигателях типа СПД

© А.И. Морозов, А.И. Бугрова, А.В. Десятков, В.К. Харчевников

РНЦ Курчатовский институт ИЯС, Москва

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) — МИРЭА

E-mail: bugrova@mirea.ru

Поступило в Редакцию 12 августа 2005 г.

Приводятся экспериментальные данные о характере восстановления режима работы стационарного плазменного двигателя типа СПД после временного перерыва в зависимости от длительности перерыва работы.

PACS: 85.30.Tv, 89.20.Bb

Космические стационарные плазменные двигатели (СПД), созданные в ИАЭ А.И. Морозовым [1], эксплуатируются уже более 30 лет в СССР (России), Франции и США [2]. В зависимости от конкретной конструкторской реализации они могут решать самые различные задачи: поддерживать ориентацию космического аппарата, корректировать его орбиту, обеспечивать межпланетные перелеты. Во всех этих случаях программа работы СПД содержит достаточно большое число включений и выключений. В ряде случаев число включений может превосходить миллион („пулеметный режим“).

В связи с этим встает вопрос о соотношении рабочих параметров двигателя перед выключением и после включения в зависимости от режима работы и продолжительности паузы  $\tau$  между рабочими импульсами. Этот круг вопросов — „эффект памяти“ — совершенно не изучен, но всестороннее его изучение требует большой работы. В данной заметке, носящей постановочный характер, мы приводим первые результаты экспериментального исследования „эффекта памяти“ у модели СПД МАГ-3, описанной в [3]. Двигатель рассчитан на мощность до  $W = 3 \text{ kW}$  и может работать в диапазоне расходов рабочего вещества ксенона через анод  $\dot{m}_a = (3.0 \div 6.0) \text{ mg/s}$  в интервале напряжений  $U_p = (300 \div 950) \text{ V}$ . Испытания проводились в МИРЭА в лаборатории А.И. Бугровой. Двигатель помещался в вакуумную камеру диаметром

$\Phi = 0.8$  м, длиной 2.2 м с диффузионной откачкой. Давление в камере при неработающем двигателе было  $2 \cdot 10^{-5}$  мм Hg, а при подаче ксенона (рабочее вещество) в двигатель  $2 \cdot 10^{-4}$  мм Hg.

Изучался „эффект памяти“ СПД, проявляющийся в характере восстановленного режима при относительно коротких перерывах.

В качестве контролирующих величин использовались: разрядный ток  $J_p$ , тяга  $F$ , уровень шумов разрядного тока  $\frac{J_p}{J_p}$ , кроме того, рассчитывался тяговый к.п.д.:

$$\eta = \frac{F^2}{2\dot{m}U_p J_p}.$$

Эксперимент проводился следующим образом.

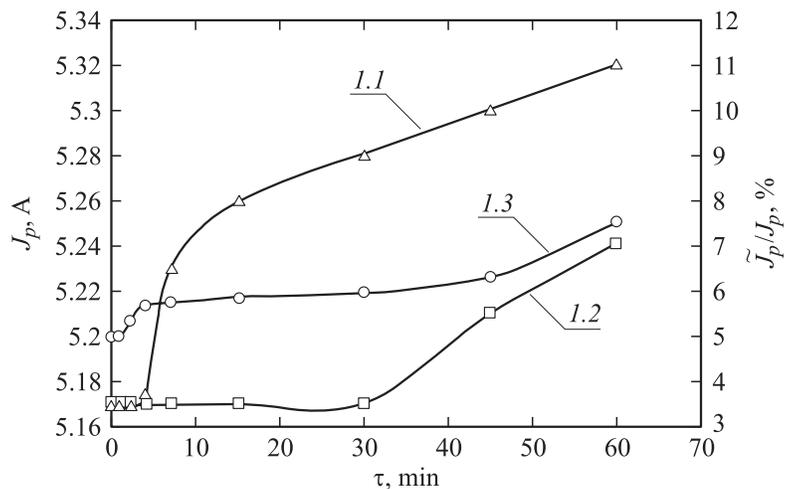
Были выбраны два режима работы двигателя: первый режим —  $\dot{m}_a = 3.0$  мг/с,  $U_p = 300$  В, второй режим —  $\dot{m}_a = 5.0$  мг/с,  $U_p = 400$  В, где  $\dot{m}_a$  — расход рабочего вещества Хе через анод,  $U_p$  — разрядное напряжение. Двигатель выводился на рабочий режим по стандартной схеме: после подачи Хе и разрядного напряжения магнитное поле варьировалось и обеспечивался минимум разрядного тока. При этом наблюдался одновременно и минимум колебаний разрядного тока. Двигатель обезгаживался и выводился на тепловой режим в течение 40–50 мин.

Затем, в момент времени, принятый за  $\tau = 0$ , измерялись интегральные параметры источника: разрядный ток  $J_p$ , колебания разрядного тока  $\dot{J}_p$  и тяга двигателя при заданном напряжении  $U_p$ .

Затем двигатель выключался и делалась пауза по времени. Величина паузы по времени изменялась от 15 с до одного часа.

После паузы двигатель включался, и проводились измерения интегральных параметров двигателя.

При работе источника в режиме  $\dot{m}_a = 3.0$  мг/с,  $U_p = 300$  В, с паузами во времени в пределах  $\tau = (0-60)$  мин изменения его интегральных параметров не наблюдалось, поэтому изменение интегральных параметров источника приведено при его работе в режиме  $\dot{m}_a = 5.0$  мг/с,  $U_p = 400$  В. На рис. 1 (кривая 1.1) приведена зависимость разрядного тока от длительности паузы между включениями при измерении тока сразу после включения. Как видно из рисунка, начальные параметры источника сохраняются при длительности паузы  $\tau \sim (3-5)$  мин. После этого наблюдается рост разрядного тока с длительностью паузы.

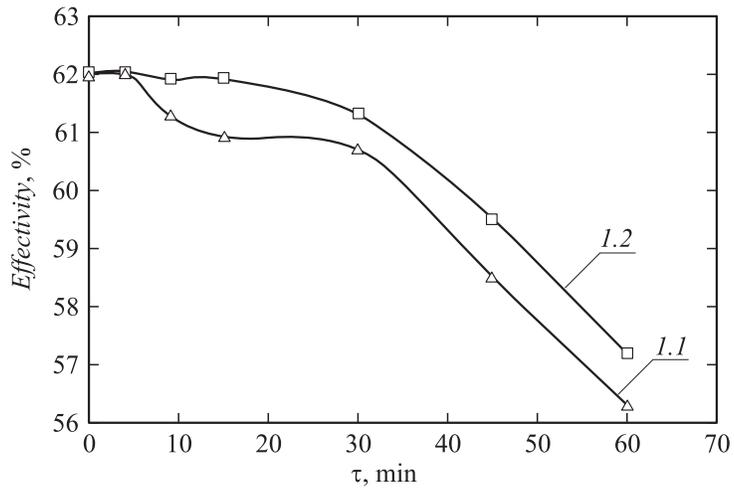


**Рис. 1.** Зависимость величины  $J_p$  и уровня колебаний разрядного тока от длительности паузы  $\tau$ : 1.1 — величина тока разряда  $J_p$ , измеренная сразу после запуска двигателя; 1.2 — величина тока разряда  $J_p$ , измеренная через время  $t$  после паузы; 1.3 — зависимость уровня колебаний разрядного тока  $\tilde{J}_p/J_p$  от длительности паузы  $\tau$ .

Зависимость разрядного тока от длительности паузы рис. 1 (кривая 1.2) также показывает рост разрядного тока от длительности паузы, однако в этом случае начальное значение разрядного тока для паузы любой длительности устанавливалось постоянным. Для этого источник включался между измеряемыми точками паузы и работал до установления начальных значений разрядного тока.

Как показал эксперимент, для установления начального разрядного тока модель должна отработать между измерениями в течение 10–30 min в зависимости от длительности  $\tau = (5–30)$  min. Режим по  $J_p$  не восстанавливается после паузы  $\tau \geq 30$  до 60 min.

Одновременно с измерением зависимости величины разрядного тока от времени паузы измерялся уровень колебаний разрядного тока  $\tilde{J}_p/J_p$  в зависимости от времени паузы (кривая 1.3, рис. 1). В исследуемом диапазоне  $\tilde{J}_p/J_p$  изменяется от 5% при  $\tau \sim 3$  min до 7.5% при  $\tau \sim 60$  min.



**Рис. 2.** Зависимость величины эффективности двигателя от длительности паузы  $\tau$ : *1.1* — эффективность двигателя, измеренная сразу после паузы (соответствует кривой разрядного тока — *1.1*, рис. 1); *1.2* — эффективность двигателя, измеренная через время  $t$  после запуска двигателя (соответствует кривой разрядного тока — *1.2*, рис. 1).

Полученная зависимость  $\frac{J_p}{J_p}$  от  $\tau$  в пределах погрешности коррелирует с изменением разрядного тока от времени паузы (см. кривая *1.2*, рис. 1): нарастание уровня колебаний начинается только с продолжительности паузы  $\tau = 30$  min.

Изменение тяги согласуется с изменением разрядного тока, т.е. увеличение разрядного тока приводит к падению тяги только при  $\tau \geq 45-60$  min, причем в этом диапазоне  $\tau$  значения тяги для кривых *1.1* и *1.2* (рис. 1) совпадают. При меньших временах паузы этот эффект не наблюдается.

Зависимость к.п.д. источника от паузы приведена на рис. 2. Из рисунка видно, что падение к.п.д. с ростом паузы более резкое для случая нарастания разрядного тока — *1.1* (рис. 1), чем для *1.2* (рис. 1).

Характер падения к.п.д. соответствует характеру нарастания тока разряда: монотонное падение к.п.д. при измерениях эффективности сразу после паузы (*1.1*, рис. 2) и постоянство к.п.д. при длительностях

паузы  $\tau \leq 30$  min, а затем монотонное падение к.п.д. при увеличении паузы от 30 до 60 min, при измерениях эффективности через время  $t$  после запуска двигателя (1.2, рис. 2).

При измерении эффективности после паузы и выхода источника на один и тот же разрядный ток эффективность коррелирует с изменением тока только при  $\tau > 30$  min.

Можно предположить, что обнаруженная корреляция эффективности и тока разряда происходит за счет фракции, которая не принимает участия в процессе образования тяги. Это может быть пристеночная доля газа, только переносящая ток, как компонента сквозного тока и связанная со свойством поверхности изолятора. Следовательно, эффект памяти обязан процессам на поверхности изолятора.

Выводы:

1. Изменение рабочих параметров источника после паузы зависит от начальных параметров разряда. При малых мощностях „забывание“ исследуемых режимов исчезает.

2. Характерный масштаб пауз, при котором сохраняются предшествующие рабочие параметры модели в исследованных условиях, составлял 3–5 min.

3. В работе изучались только интегральные параметры. Они указывают, что память связана с процессами на диэлектриках. Природа этих механизмов пока не ясна.

Работа выполнена при поддержке INTAS-03533358.

## Список литературы

- [1] Морозов А.И. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 85.
- [2] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.
- [3] Morozov A.I., Bugrova A.I., Desyatskov A.V., Kharchevnikov V.K., Priol M., Jolivet L. Study of Two-Stage Thruster on the Base of SPT-MAG. // Proceedings of 28<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. 17–21 March 2003. Toulouse, France, IEPS-290-03.