

04

Влияние соотношения долей ионов разной кратности на интегральные параметры стационарного плазменного двигателя (СПД) типа АТОН

© А.И. Бугрова, А.С. Липатов, А.И. Морозов, С.В. Баранов

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

E-mail: bgrova@mirea.ru

РНЦ „Курчатовский институт“

Поступило в Редакцию 9 июня 2005 г.

Приведены интегральные параметры моделей СПД типа АТОН, отличающихся размерами. Внешние диаметры каналов моделей равны 60 mm (модель А-3) и 100 mm (модель А-5). Были исследованы характеристики при расходах Хе 2 и 1 mg/s для А-3 и $\dot{m} = 4$ и 1.5 mg/s для А-5. Особое внимание уделялось работе моделей при больших напряжениях и малых расходах. Как показали эксперименты, с увеличением напряжения приходилось изменять топограмму магнитного поля и увеличивать магнитное поле на срезе канала. При этом снижался разрядный ток и уменьшались колебания. При увеличении напряжения до ≤ 1000 V при $\dot{m} = 1$ mg/s модель А-3 имела удельный импульс ~ 3400 s.

Проведено исследование влияния зарядового состояния плазмы на интегральные характеристики СПД. Было показано, что максимум эффективности работы плазменного источника достигается при равенстве концентрации ионов ксенона первой и второй кратности. Предложен метод определения предельного к.п.д., измерив лишь одну вольт-амперную и тяговую характеристику разряда.

В целом ряде работ детально описаны физические процессы в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов, получившем название СПД [1–3].

Контроль степени ионизации рабочего вещества (ксенона) на выходе из СПД представляет определенные технические трудности, поэтому разработка метода быстрого эффективного определения зарядового состояния плазмы является актуальной задачей. А.И. Морозовым в ранних публикациях [1,2] был предложен метод определения состава

плазмы по зарядовому состоянию на основе измеренных интегральных характеристик: расхода рабочего вещества (\dot{m}), разрядного тока (J_p) и тяги.

В МИРЭА изготовлен и испытан параметрический ряд моделей СПД второго поколения (типа АТОН), работающих на ксеноне. Эти модели отличаются размерами разрядной камеры и соответственно работают в разном диапазоне расходов.

Известно [3–5], что для моделей СПД разных размеров, но работающих на одном и том же рабочем веществе, существует свой диапазон входных параметров (\dot{m} , U_p), при которых ускоритель работает одинаково с точки зрения физических процессов. Здесь U_p — разрядное напряжение. В этом случае диапазон расходов для каждой модели определяется величиной $\alpha = \frac{\dot{m}}{S} b \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}$, где b — ширина канала, S — сечение канала.

В данной работе будут рассмотрены характерные параметры двух моделей А-3 и А-5, внешние диаметры каналов которых соответственно равны 60 и 100 мм.

Особое внимание уделялось работе моделей при больших напряжениях. Были сняты вольт-амперные характеристики при анодном напряжении от 200 до $\leq 1000 \text{ V}$. В каждой рабочей точке проводилась оптимизация модели по магнитному полю. Как показали эксперименты, с увеличением напряжения приходилось изменять топограмму магнитного поля в канале: величина напряженности магнитного поля на срезе увеличивалась. При этом снижался разрядный ток и уменьшались колебания. Для каждой модели вольт-амперные характеристики и тяги снимались в широком диапазоне расходов. В работе приведены параметры для двух характерных для каждой модели расходов. На рис. 1 и 2 приведены интегральные характеристики моделей А-3 и А-5 от разрядного напряжения для двух расходов ксенона. Из рис. 1, а видно, что во всем диапазоне напряжений вольт-амперные характеристики разряда практически горизонтальны, а тяга растет тем быстрее, чем больше расход. При увеличении напряжения при $\dot{m} = 1 \text{ mg/s}$ к.п.д. А-3 выходит на полку, начиная приблизительно с 700–900 V. Удельный импульс достигает величины $\sim 3400 \text{ s}$. Для модели А-5 поведение кривых в зависимости от приложенного напряжения аналогично. Однако к.п.д. при $\dot{m} = 1.5 \text{ mg/s}$ у нее несколько ниже, чем у модели А-3, так как для А-5 данный расход слишком мал.

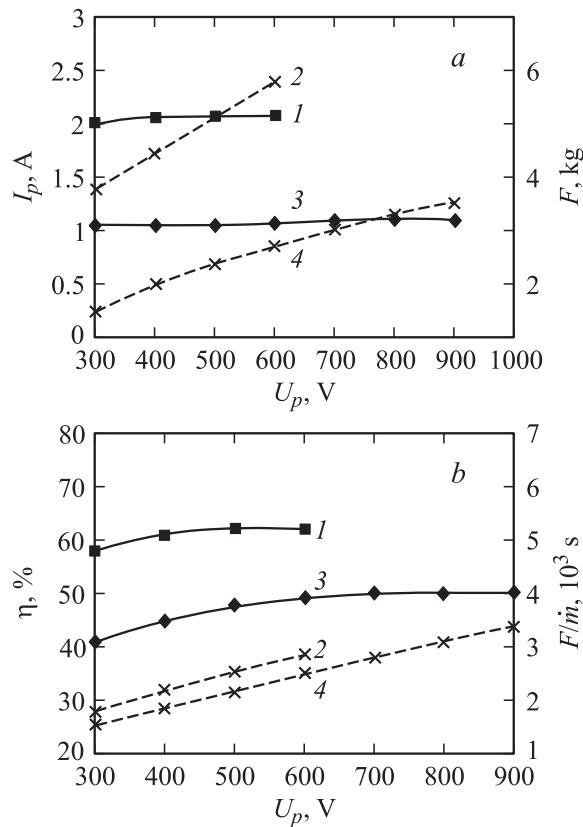


Рис. 1. Интегральные параметры А-3: *a* — вольт-амперные характеристики (—), тяга (---); *b* — зависимость к.п.д. (—) и удельного импульса (---) от U_p . 1, 2 — $\dot{m} = 2$ mg/s, 3, 4 — $\dot{m} = 1$ mg/s.

Согласно работе Морозова [1], плазменный поток, выходящий из СПД, рассматривается как полностью ионизованная среда, состоящая из ионов первой и второй кратности и частиц, выпавших из ускорения \dot{m}_* . Доля последних может быть связана с разными причинами: пролет без ионизации в ускорителе, гибель ионов на стенках и превращение их в нейтралы.

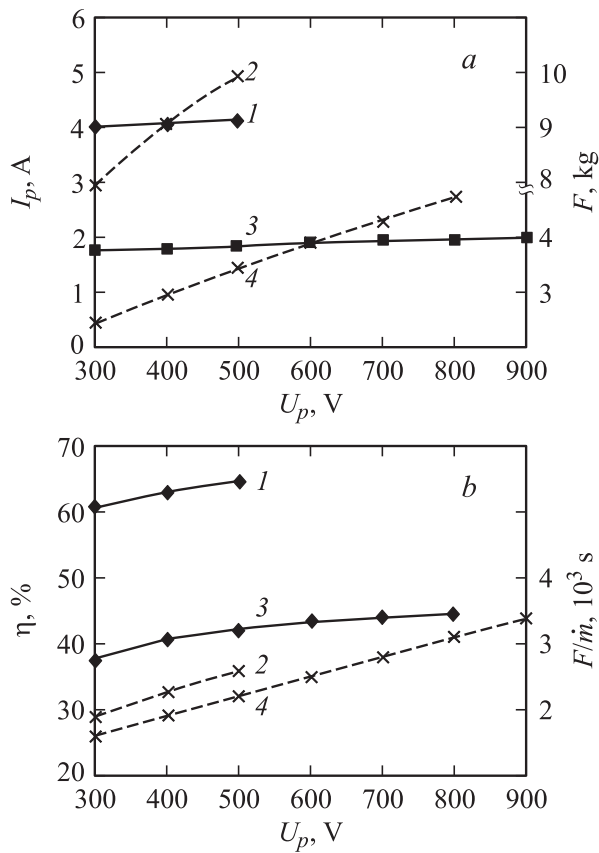


Рис. 2. Интегральные параметры А-5: *a* — вольт-амперные характеристики (—), тяга (---); *b* — зависимость к.п.д. (—) и удельного импульса (---) от U_p . 1, 2 — $\dot{m} = 4$ mg/s; 3, 4 — $\dot{m} = 1.5$ mg/s.

Данная работа посвящена исследованию влияния соотношения этих групп частиц на эффективность работы источника в широком диапазоне входных параметров.

Уравнения, связывающие потоки этих частиц, написаны в предположении, что вторая ионизация происходит там же, где и первая.

Очевидно, что в этом случае $\varepsilon_2 \geq 2\varepsilon_1$, где ε — цена иона. Следовательно, мы имеем три уравнения для трех потоков частиц:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_*, \\ F &= \sqrt{\frac{2e}{M}(U_p - \Delta U)} (\dot{m}_1 + \sqrt{2}\dot{m}_2), \\ J_p &= \frac{e}{M}(1+k)(\dot{m}_1 + 2\dot{m}_2 + \varepsilon\dot{m}_*), \end{aligned} \quad (1)$$

где \dot{m} — суммарный расход газа, \dot{m}_1 и \dot{m}_2 — однократно и двукратно ионизованные атомы, \dot{m}_* — поток частиц, гибнущих на стенках, e/M — отношение заряда электрона к массе атома ксенона, ΔU — потенциал, учитывающий потери, k — коэффициент, определяющий вклад сквозного тока в ток разряда ($k \approx 0.1$), $\varepsilon \approx 1$ — число актов ионизации. Из выражения (1) видно, что вклад в тягу дают только однократно и двукратно ионизованные атомы, в то время как разрядный ток образуют все частицы.

Из (1) следует, что:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \frac{-\sqrt{2}A + (2 - \varepsilon)B + \sqrt{2}\varepsilon \cdot C}{(\sqrt{2} - 1)(\sqrt{2} + \varepsilon)}, \\ \dot{m}_2 &= \frac{A + (\varepsilon - 1)B - \varepsilon \cdot C}{(\sqrt{2} - 1)(\sqrt{2} + \varepsilon)}, \\ \dot{m}_* &= \frac{(\sqrt{2} - 1)A - B + (2 - \sqrt{2})C}{(\sqrt{2} - 1)(\sqrt{2} + \varepsilon)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$A = \frac{J}{e/M(1+k)}, \quad B = \frac{F}{\sqrt{\frac{2e}{M}(U - \Delta U)}}, \quad C = \dot{m}.$$

Здесь J — разрядный ток, F — тяга, $U - \Delta U$ — эффективное напряжение, ускоряющее ионы.

На рис. 3 и 4 приведены рассчитанные по интегральным параметрам значения \dot{m}_1 , \dot{m}_2 и \dot{m}_* для исследуемых режимов. Из этих рисунков видно, что с ростом напряжения доля однократно ионизованных атомов падает, а поток двукратно ионизованных частиц возрастает. Для малых

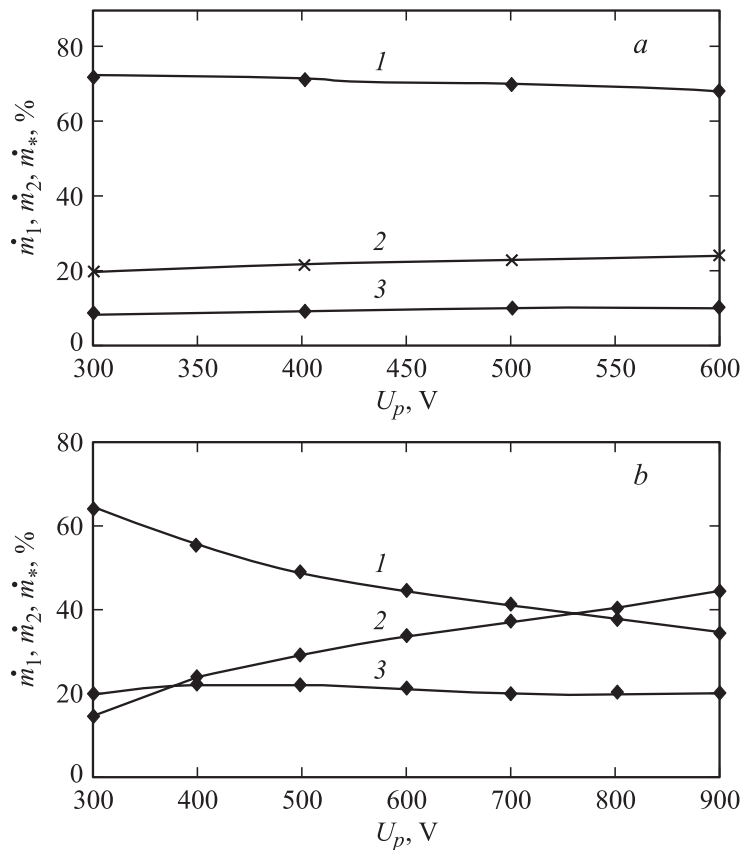


Рис. 3. Модель А-3. Зависимость \dot{m}_1 (1), \dot{m}_2 (2) и \dot{m}_* (3) от U_p : а — $\dot{m} = 2$ mg/s, б — $\dot{m} = 1$ mg/s. Поток даны в процентном отношении к расходу.

расходов ($\dot{m} = 1$ mg/s для А-3 и $\dot{m} = 1.5$ mg/s для А-5) при напряжениях $\sim 600 \div 700$ V эти потоки сравниваются. При больших общих расходах ксенона равенство потоков однократно и двукратно ионизованных частиц сравнивается при больших напряжениях (рис. 3, а и рис. 4, а).

Из сравнения динамики изменения долей ионов первой и второй кратности с динамикой к.п.д. (рис. 1, 2) можно увидеть, что, когда доли

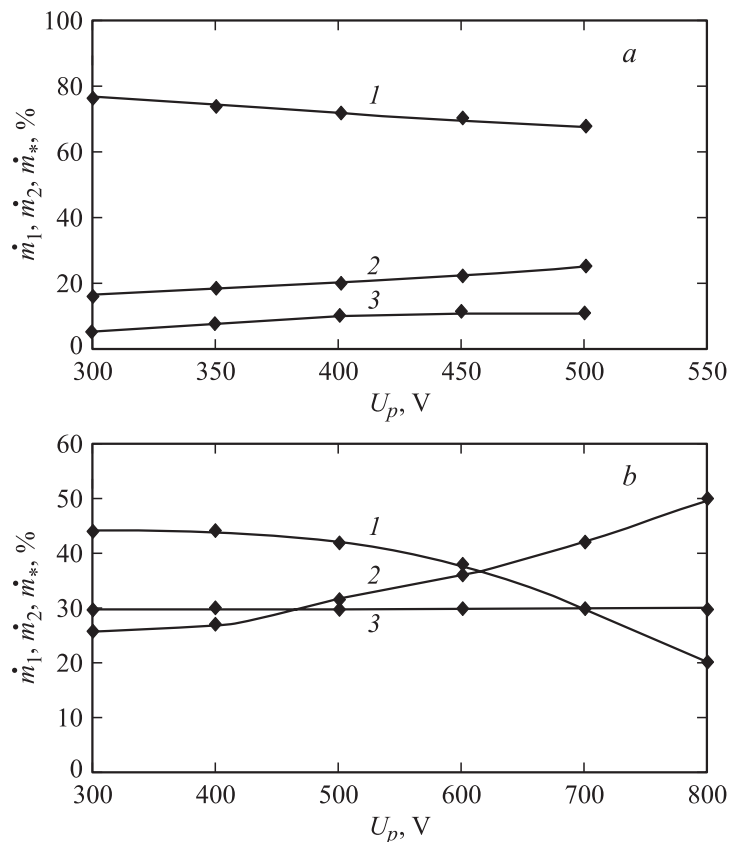


Рис. 4. Модель А-5. Зависимость \dot{m}_1 (1), \dot{m}_2 (2) и \dot{m}_* (3) от U_p : а — $\dot{m} = 4 \text{ mg/s}$, б — $\dot{m} = 1.5 \text{ mg/s}$. Поток даны в процентном отношении к расходу.

ионов первой и второй кратности сравниваются, а это происходит при напряжениях $\sim 600\text{--}700 \text{ V}$, к.п.д. принимает максимальное значение.

Отсюда следует, что, не проводя подробных, доскональных исследований источника, можно определить его к.п.д. в оптимальном режиме работы.

По экспериментально измеренным вольт-амперной и тяговой характеристикам найдем разрядное напряжение U_p^* , при котором

$$\dot{m}_1(U_p^*) = \dot{m}_2(U_p^*):$$

$$F(U_p^*) / \sqrt{\frac{2e}{M}(U_p^* - \Delta U)} = (1 + \sqrt{2}) \left(J(U_p^*) / \frac{e}{M}(1 + k) - \dot{m} \right). \quad (3)$$

Тогда максимальное к.п.д. можно оценить по формуле:

$$\eta_{\max} = \eta(U_{p0}) + \left[\frac{\partial \eta_p(\dot{m}, U_p)}{\partial U_p} \right]_{U_p=U_{p0}} (U_p^* - U_{p0}), \quad (4)$$

где $\eta(U_{p0})$ — значение к.п.д. при $U_{p0} < U_p^* \approx 600$ В.

Таким образом, на основании приведенных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально обнаружен важный факт, следующий из этой трехкомпонентной модели. Он состоит в том, что максимум эффективности работы плазменного источника типа СПД достигается при равенстве концентраций заряженных частиц первой и второй кратности.

2. Предельное к.п.д. классического СПД данной конструкции при небольших вкладываемых мощностях можно оценить по формуле (4), измерив лишь одну вольт-амперную и тяговую характеристику разряда.

Работа выполнена в рамках INTAS–0353–3358.

Список литературы

- [1] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.
- [2] Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Соломатина Л.В. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 12. С. 118–123.
- [3] Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Чурбанов Д.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 19. С. 56–61.
- [4] Бугрова А.И., Масленников Н.А., Морозов А.И. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. С. 45–51.
- [5] Меликов И.В. // ЖТФ. 1974. Т. XLIV. В. 3. С. 549–554.