

04;12

Влияние вкладываемой ВЧ-мощности на характеристики стационарного плазменного двигателя

© А.И. Бугрова, Г.Э. Бугров, В.К. Харчевников, М.И. Шапошников, S. Mazouffre

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики МГТУ МИРЭА, Россия

E-mail: bugrova@mirea.ru

ICARE CNRS, Франция

Поступило в Редакцию 14 ноября 2011 г.

Изучались возможности осуществления дополнительного ВЧ-нагрева плазмы в стационарном плазменном двигателе (СПД) с целью повышения его характеристик. Была разработана модифицированная модель стационарного плазменного источника АТОН для введения в буферную зону канала СПД ВЧ-мощности. Проведены детальное изучение интегральных и локальных характеристик модифицированной модели АТОН с вводом ВЧ-мощности и сравнение их с характеристиками источника АТОН без ввода ВЧ-мощности, а также анализ полученных результатов.

На первом этапе работ по вводу ВЧ-мощности в источник необходимо было выбрать модель СПД оптимальных размеров и конструкции. На базе ранее проведенных экспериментальных исследований источников СПД различных конструкций в качестве такой лабораторной модели был выбран классический вариант источника СПД АТОН, рассчитанный на вкладываемую мощность $W = 600-900 \text{ W}$ [1,2]. Данный источник наиболее подходит для решения поставленной задачи, так как имеет оптимальные габаритные размеры и геометрические размеры отдельных конструктивных элементов; кроме того, в его конструкции имеется буферная область, которую можно использовать для ввода ВЧ-мощности.

Конструктивная схема источника АТОН показана на рис. 1. Габариты модели: $\varnothing = 100 \text{ mm}$, ее длина 98 mm . Внутренний диаметр внешнего канала составляет 70 mm , длина канала (расстояние от края анода до

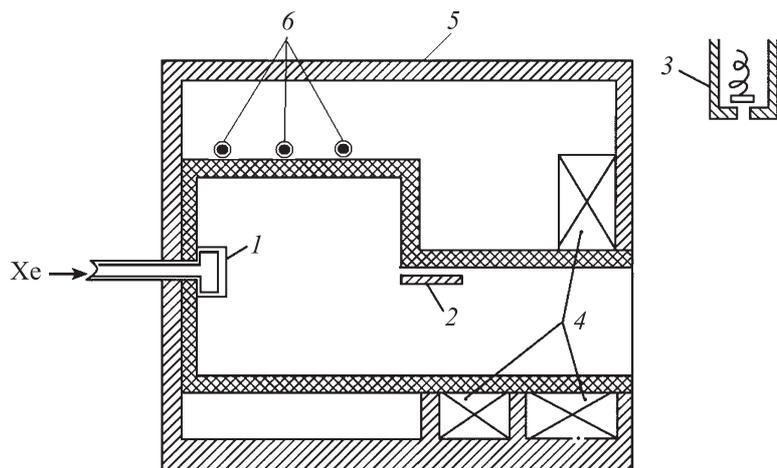


Рис. 1. Конструктивная схема источника АТОН: 1 — газораспределитель, 2 — анод, 3 — катод, 4 — магнитные катушки, 5 — магнитопровод, 6 — антенна для ввода ВЧ-мощности.

среза) равна 24 mm, ширина канала равна 14 mm, ширина буферной области 55 mm.

Магнитная система источника позволяет получить фокусирующую геометрию магнитных силовых линий в канале модели. Максимальная величина радиальной составляющей магнитного поля соответствует срезу канала ($z = 0$) и монотонно спадает к аноду. Градиент магнитного поля dH_r/dz ($0 \leq r \leq 10$ mm) равен 10 Oe/mm.

Поскольку планировалось вводить ВЧ-мощность в источник через буферную зону посредством наружной антенны, то для данной модели АТОНА буферный объем был увеличен для более эффективного процесса ВЧ-накачки.

Эксперименты проводились на вакуумном стенде объемом 2 m^3 с диффузионной откачкой, скорость откачки $28 \cdot 10^3$ l/s. Остаточное давление в камере составляло величину $P_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ Торр по воздуху. Тяга (усилие) измерялась крутильными весами с лазерной „стрелкой“. Погрешность измерений тяги не превышала 3%. Измерение расхода осуществлялось с помощью натекателей, изготовленных фирмой

Bronkhorst HI-TEC с точностью 1%. В качестве рабочего вещества использовался ксенон. Катодный массовый расход составлял $\sim 10\%$ от анодного.

Ввод ВЧ-мощности в источник осуществлялся индукционным методом [3]. Использовался ВЧ-генератор на частоте 13.56 МГц, тракт согласования и антенна в виде нескольких витков, намотанных на буферную область АТОНА. Все эксперименты были проведены при ВЧ-мощности, равной 100 W, отраженная мощность не превышала 10%.

Экспериментальные исследования вводимой в источник ВЧ-мощности на его характеристики проводились в два этапа. На первом этапе измерялись интегральные (вольт-амперные характеристики разряда, усилие F и удельный импульс P) и локальные (радиальные распределения плотности направленного ионного тока) параметры модели АТОН с установленным трактом подачи ВЧ-мощности, но без ее ввода. Целью первого этапа работ было:

— определение диапазонов надежной и устойчивой (без тепловых перегрузок) работы модернизированного источника АТОН с ВЧ-трактом по разрядному напряжению U_d и расходу рабочего вещества $\dot{m}_a(\text{Xe})$;

— измерение зависимостей разрядного тока, усилия и удельного импульса от U_d и \dot{m}_a ;

— определение суммарного направленного ионного тока в плазменном потоке при работе модели без ввода ВЧ-мощности;

— выбор возможных оптимальных рабочих режимов работы источника для введения в дальнейшем ВЧ-мощности.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) источника АТОН измерялись для трех анодных расходов ксенона: $\dot{m}_a = 1.5$, $\dot{m}_a = 2.0$ и $\dot{m}_a = 2.5$ mg/s, и разрядных напряжений, изменяющихся в диапазоне от 200 до 400 V. Результаты измерения ВАХ источника без ввода ВЧ-мощности представлены на рис. 2, а.

Из данных зависимостей видно, что ВАХ разряда при незначительной коррекции магнитного поля практически вертикальны, что свидетельствует о хорошей ионизации рабочего вещества. Представленные режимы устойчивы во всем диапазоне разрядных напряжений с низким уровнем колебаний разрядного тока. Колебания разрядного тока при испытаниях лежали в диапазоне 15–25% при основной частоте ~ 30 kHz. Таким образом, данные режимы являются оптимальными

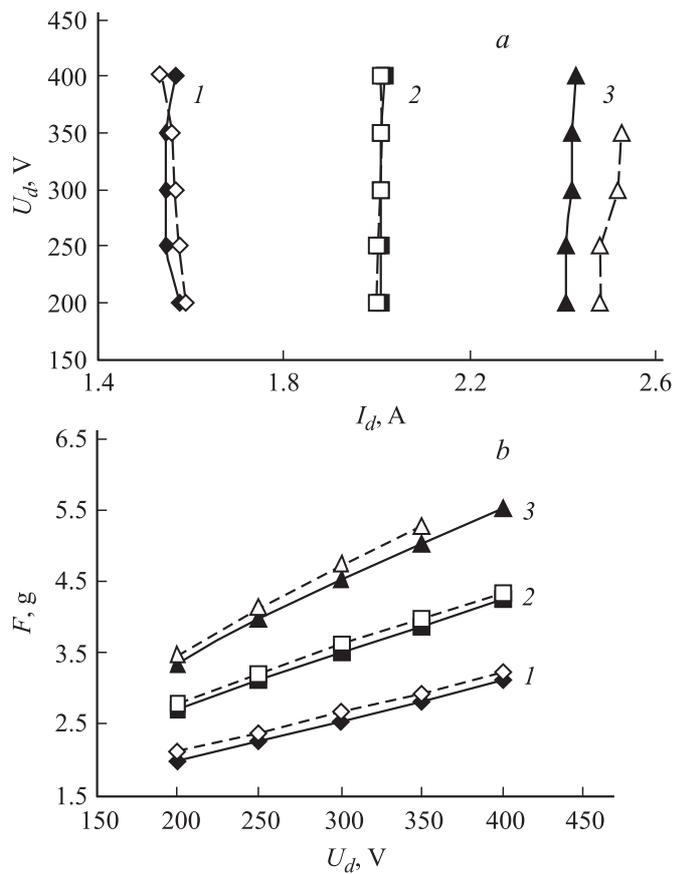


Рис. 2. ВАХ разряда источника АТОН (*a*), зависимость усилия от величины разрядного напряжения (*b*) и зависимость удельного импульса от величины разрядного напряжения (*c*). Для кривых 1, 2, 3 \dot{m}_a составляет 1.5, 2.0 и 2.5 mg/s соответственно. Черные/белые значки соответствуют отсутствию/наличию ВЧ-мощности.

для дальнейшего изучения влияния ввода ВЧ-мощности на работу источника АТОН.

На рис. 2, *b* представлены зависимости усилия, развиваемого источником АТОН без ввода ВЧ-мощности, от разрядного напряжения при

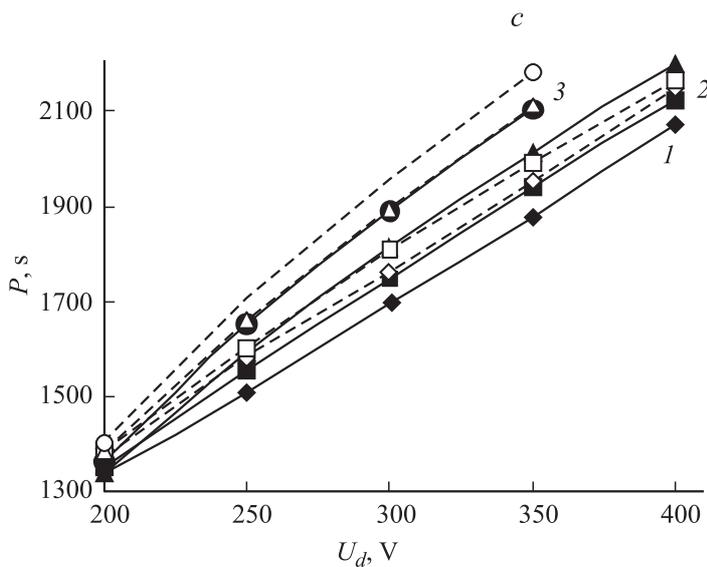


Рис. 2 (продолжение).

$\dot{m}_a = 1.5\text{--}2.5\text{ mg/s}$ (Xe). Из рисунка видно, что величина усилия линейно нарастает с увеличением расхода рабочего вещества и разрядного напряжения. При разрядном напряжении $U_d = 350\text{ V}$ и $\dot{m}_a = 2.5\text{ mg/s}$ величина усилия достигает значений $F = 5.0\text{ g}$.

По результатам измерения усилия был рассчитан удельный импульс источника АТОН без ввода ВЧ-мощности при различных величинах разрядного напряжения в диапазоне расходов $\dot{m}_a = 1.5\text{--}2.5\text{ mg/s}$ (Xe). Зависимость величины удельного импульса от величины разрядного напряжения показана на рис. 2, с. Величина удельного импульса также линейно возрастает с увеличением расхода рабочего вещества и разрядного напряжения. При разрядном напряжении $U_d = 350\text{ V}$ и $\dot{m}_a = 2.5\text{ mg/s}$ величина удельного импульса достигает значений $P = 2000\text{ s}$.

Таким образом, были получены диапазоны надежной и устойчивой работы источника АТОН и его интегральные параметры (ВАХ, F , P) с установленным трактом подачи ВЧ-мощности, но без ее ввода.

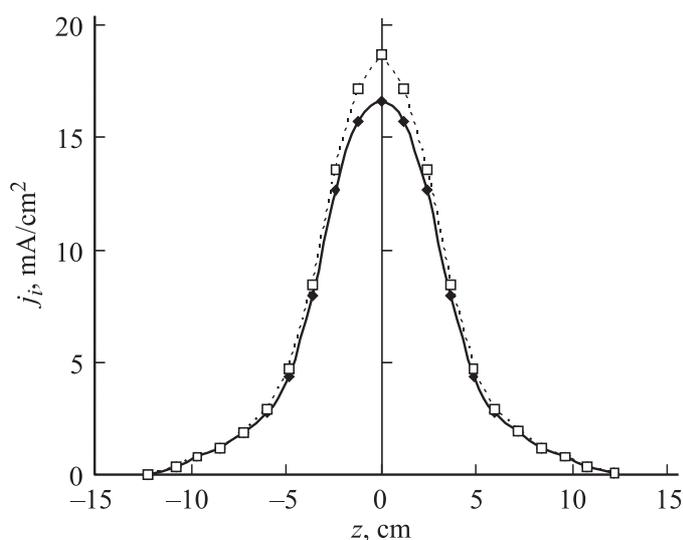


Рис. 3. Радиальные распределения плотности направленного ионного тока в плазменном потоке. $U_d = 300$ V, $\dot{m}_a = 2.0$ mg/s, $z = 28$ см. Черные/белые значки соответствуют отсутствию/наличию ВЧ-мощности.

В дальнейшем были измерены локальные параметры модели АТОН с установленным трактом подачи ВЧ-мощности, но без ее ввода. При работе источника АТОН без ввода ВЧ-мощности были измерены радиальные распределения плотности направленного ионного тока в плазменном потоке, вытекающем из модели. Для измерения плотности направленного ионного тока в плазменном потоке источника использовался двойной направленный зонд. Радиальное распределение плотности направленного ионного тока $j_i(r)$ в струе на расстоянии $z = 28$ см от среза источника ($U_d = 300$ V, $\dot{m}_a = 2.0$ mg/s) показано на рис. 3. Видно, что кривая $j_i(r)$ имеет колоколообразный вид с максимальным значением $j_i = 16.6$ m/cm² на оси системы. Полученное распределение $j_i(r)$ позволило рассчитать абсолютную (суммарную) величину ионного тока, вытекающего из канала источника. Так, для режима работы источника $\dot{m}_a = 2.0$ mg/s $U_d = 300$ V абсолютная величина ионного тока принимает значение $I_i = 1.43$ А и таким обра-

зом отношение полного ионного тока к величине разрядного тока ($I_d = 1.98$ А) составляет величину $I_i = 0.72$, что говорит о хорошей ионизации рабочего вещества.

На втором этапе работ были измерены аналогичные интегральные и локальные характеристики источника АТОН с вводом ВЧ-мощности в тех же диапазонах по расходу рабочего вещества (X_e) и разрядному напряжению. Все эксперименты были проведены при ВЧ-мощности, равной 100 W, отраженная мощность не превышала 10%.

Результаты измерений ВАХ, усилия и удельного импульса показаны на рис. 2 (кривые с белыми значками), радиальные распределения направленного ионного тока в плазменном потоке представлены на рис. 3 (кривые с белыми значками).

Сравнение ВАХ разряда (рис. 2, а) показывает, что при расходах ксенона более $\dot{m}_a = 2.0$ mg/s происходит увеличение разрядного тока на величину 0.1–0.15 А при вводе ВЧ-мощности во всем рассматриваемом интервале напряжений. При этом вертикальность ВАХ сохраняется.

Результаты измерений усилия и удельного импульса показали, что при вводе ВЧ-мощности в источник величины F и P также увеличиваются в данном интервале U_d и \dot{m}_a . Так, при $U_d = 350$ V и $\dot{m}_a = 2.5$ mg/s усилие увеличивается от $F = 5.0$ g до $F = 5.3$ g и соответственно удельный импульс повышается от $P = 2000$ до $P = 2120$ s.

Из результатов измерений радиальных распределений плотности направленного ионного тока в плазменном потоке (рис. 3) следует, что с вводом ВЧ-мощности увеличивается максимальное значение плотности ионного тока на оси системы до $j_i = 19.0$ mA/cm² и возрастает величина суммарного ионного тока, вытекающего из источника, $I_i = 1.52$ А ($U_d = 300$ V и $\dot{m}_a = 2.0$ mg/s). Отношение полного ионного тока к величине разрядного тока ($I_d = 1.98$ А) в этом случае составляет величину $I_i/I_d = 0.77$, что характеризует улучшение ионизации рабочего вещества при вводе ВЧ-мощности в источник.

Таким образом, полученные результаты показывают не только возможность ввода ВЧ-мощности в источник АТОН, но и более хорошую ионизацию рабочего вещества и увеличение его интегральных и локальных параметров.

Данная работа выполнена в рамках программы INTAS — 06-1000024-8851.

Список литературы

- [1] *Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Баранов С.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 21. С. 87–94.
- [2] *Бугров Г.Э., Десятков А.В., Козинцева М.В., Липатов А.С.* // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 3 (52). С. 69–74.
- [3] *Александров А.Ф., Бугров Г.Э., Вавилин К.В.* и др. // Научно-технические технологии. 2005. № 1. Т. 6. С. 9–16.