

© Т. А. Максименко, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев

Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського (ХАІ)

## ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА СТРУИ ПЛАЗМЫ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

За допомогою методу електростатичного зонду досліджено параметри струменя плазми кількох систем, що складаються із стаціонарного плазмового двигуна малої потужності та катода-компенсатора. Визначено вплив конструкції магнітної системи і типу катода на характеристики двигуна.

### ВВЕДЕНИЕ

Еще в 1970-х гг. было показано, что для коррекции и поддержания орбиты космических аппаратов (КА) преимуществами обладают двигательные установки (ДУ) на базе электрореактивных двигателей (ЭРД), в частности стационарные плазменные двигатели (СПД) [2]. В настоящее время актуальной является проблема разработки СПД малой мощности с параметрами, приемлемыми для микроспутников. Основными требованиями для проектирования является очень малая мощность двигателя — менее 100 Вт. Это накладывает существенные ограничения на геометрические размеры, что серьезно усложняет задачу разработки магнитной системы и двигателя в целом.

Ведущие мировые разработчики ракетно-космической техники проводят активные работы в области разработки и исследования холловских двигателей (ХД) малой мощности [6–8]. Однако имеющиеся на сегодняшний день ХД малой мощности не полностью удовлетворяют поставленным требованиям. Одной из основных проблем ввиду малых размеров ХД малой мощности является разработка магнитной системы, а также катода-компенсатора. Широко используемым методом исследования параметров ХД является метод диагностики струи плазмы при помощи электростатического зонда. Данный метод, как показывают работы [1, 3–5] при относительной простоте и малых затратах может дать значительную информацию о локальных и интегральных параметрах плазмы и соответственно возможность определения путей улучшения характеристик малых стационарных плазменных двигателей.

Целью данной работы являлось определение параметров струи плазмы стационарных плазменных

двигателей (распределение ионного тока, распределение температуры электронов, потенциал плазмы, интегральный ионный ток) с помощью зондовых измерений и определение влияния конструкции магнитопровода плазменного двигателя и типа используемого катода-компенсатора на измеряемые параметры.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проводилось экспериментальное исследование двух типов движителей: СПД-20 и его модификации с усовершенствованной магнитной системой СПД-20M. Благодаря внесенным изменениям в конструкцию магнитопровода СПД-20M было качественно и количественно улучшено распределение магнитного поля (рис. 1). При одинаковых энергозатратах было получено большее значение магнитной индукции, увеличен градиент магнитного поля вдоль разрядного канала, максимум распределения смешен ближе к срезу разрядной камеры.

Использовались два типа катодов: безнакальный

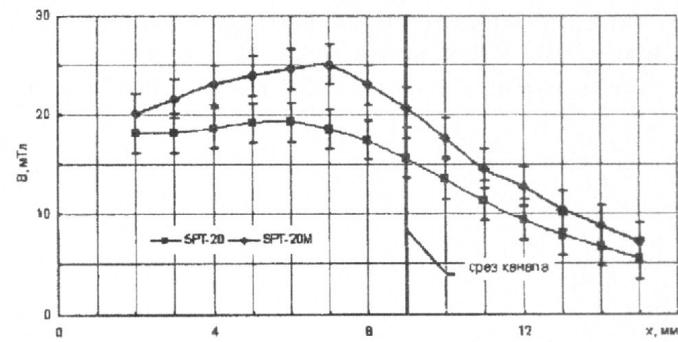


Рис. 1. Распределение индукции магнитного поля вдоль разрядной камеры ( $I_{\text{кат}} = 3 \text{ A}$ )

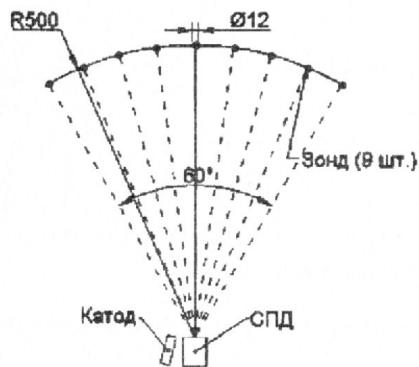


Рис. 2. Схема устройства для зондовых измерений

катод М1.03 производства ХАИ и накальный катод совместного изготовления ДНУ/ХАИ. Они комбинировались с двигателем в следующие системы: СПД-20+М1.03, СПД-20+накальный (ДНУ/ХАИ), СПД-20М+М1.03.

Для проведения зондовой диагностики струи плазмы было изготовлено устройство, состоящее из девяти плоских зондов  $\varnothing 12$ , закрепленных на специальном кронштейне, обеспечивающем расстояние  $R = 50$  см от среза плазменного двигателя с максимальным углом раскрытия  $60^\circ$  (рис. 2).

Зондовые вольтамперные характеристики (ВАХ) получались путем непрерывных измерений в стационарном разряде, при изменении напряжения на зонде. Обработка зондовых ВАХ проводилась в бомбовском приближении. Формула Бома в размерном виде [5] записывается так:

$$j_i = \alpha e n_i (2kT_e/m_i)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $j_i$  — плотность ионного тока насыщения,  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий геометрию зонда,  $e$  — заряд электрона,  $n_i$  — концентрация ионов,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_e$  — температура электронов,  $m_i$  — масса иона.

Из этой зависимости определялась концентрация ионной составляющей плазмы  $n_i$ . Для этого предварительно измерялась плотность ионного тока насыщения  $j_i$  и определялась температура электронов  $T_e$  по наклону возрастающего участка зондовой ВАХ в полулогарифмическом масштабе. Для зонда плоской геометрии принималось, что  $\alpha = 0.8$ .

Потенциал плазмы определялся по формуле [5]

$$U_{pl} = U_f + T_e \ln [(e/4\pi)\sqrt{m_i/m_e}], \quad (2)$$

где  $U_f$  — плавающий потенциал плазмы (при котором поток электронов на зонд равен потоку ионов, так что результирующий ток на зонд равен нулю).

В качестве рабочего тела использовался ксенон

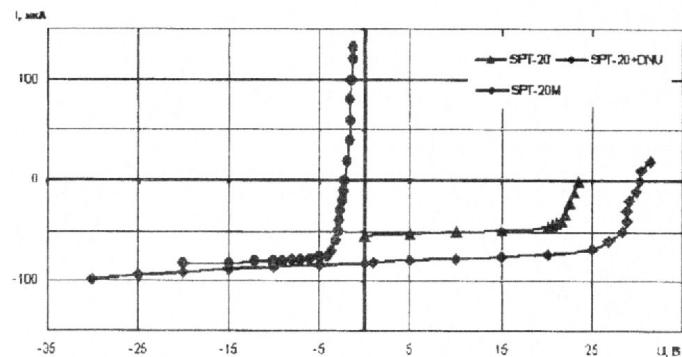


Рис. 3 Зондовые ВАХ на 5-м зонде

(Xe). Давление в вакуумной камере составляло 0.01—0.02 Па.

В ходе эксперимента измерялись зондовые ВАХ на 9 зондах, а затем строилось угловое распределение плотности ионного тока, в третьем случае ВАХ снималась только на центральном зонде и угловое распределение плотности ионного тока при напряжении на зондах  $U_z = -15$  В.

Интегральный ионный ток определялся численно интегрированием углового распределения плотности ионного тока по поверхности сегмента.

Ниже приводится сравнительный анализ результатов, полученных в ходе всего эксперимента для трех систем СПД+катод.

Для сравнения в качестве параметра фокусировки струи было взято отношение интегрального тока  $I_{45}$ , приходящегося на сегмент  $\varphi_1 = 45^\circ$  к интегральному току  $I_{60}$  на сегмент  $\varphi = 60^\circ$  (между 1-м и 9-м зондами):

$$\psi = I_{45}/I_{60}. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены зондовые ВАХ, полученные на пятом зонде для трех вариантов систем СПД+катод.

На рис. 4 представлены сравнительные характеристики углового распределения ионного тока ( $U_z = -15$  В) для всех трех вариантов.

Исходя из данных рис. 4, можно судить о равномерности углового распределения плотности ионного тока. Видно, что для СПД-20 распределение явно несимметрично относительно центральной оси и смещено для обоих случаев в одну сторону, как с М1.03, так и с катодом ДНУ/ХАИ. Такая несимметричность объясняется неравномерностью распределения газа при выходе из анода-газораспределителя, а также азимутальной неравномерностью магнитного поля, что является следствием несовершенства конструкции двигателя. В тоже время для СПД-20М угловое распределение ионного тока практически симметрично. Этот результат был до-

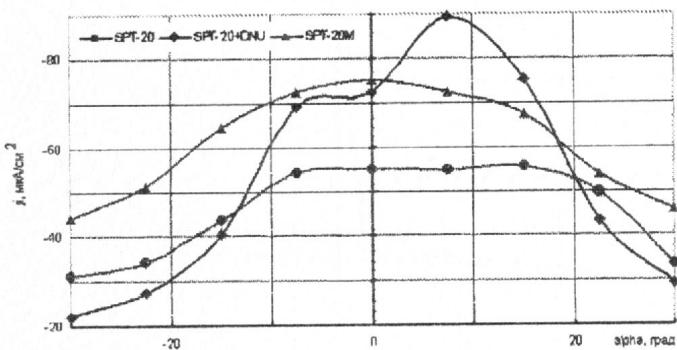


Рис. 4. Угловое распределение плотности ионного тока ( $U_3 = -15$  В)

#### Основные характеристики двигателей

Тип двигателя	$I_{\text{кат}}$ , А	$\dot{m}_a$ , мг/с	$U_p$ , В	$I_p$ , А	$I_{\text{ии}}$ , А	$I_{\text{ии}}/I_p$	$\psi$
СПД-20+М1.03	3	0.3	238	0.58	0.108	0.186	0.62
СПД-20+(ДНУ/ХАИ)	3	0.3	238	0.56	0.09	0.161	0.71
СПД-20М+М1.03	3	0.35	232	0.6	0.121	0.202	0.63

стигнут путем усовершенствования конструкции магнитопровода и анодной части.

В таблице приведены измеренные значения основных характеристик двигателей. Как можно судить по параметру  $\psi$ , фокусировка струи плазмы для системы СПД-20+ДНУ/ХАИ имеет наилучший характер, для двух других — почти одинаковый. В то же время интегральный ионный ток  $I_{\text{ии}}$ , и его отношение к разрядному  $I_{\text{ии}}/I_p$  принимают наибольшие значения для системы СПД-20М+М1.03 с улучшенной конструкцией магнитопровода.

На рис. 5 представлены сравнительные характеристики углового распределения температуры электронов, концентрации ионов и потенциала плазмы для всех трех вариантов.

Распределение электронной температуры для СПД-20+ДНУ/ХАИ имеет более равномерный характер, чем для СПД-20+М1.03. Среднее значение  $T_e$  для СПД-20+ДНУ/ХАИ несколько больше чем для СПД-20+М1.03. В то же время  $T_e$  на пятом зонде принимает минимальное значение для системы СПД-20М+М1.03. Для понимания причин, объясняющих такие результаты, необходимо проводить дополнительные исследования. Значения концентрации ионов для всех трех случаев имеют одинаковый порядок, однако для СПД-20+БНК они наименьшие, а для СПД-20М на 5-м зонде — наибольшие, что является следствием некоторого большего массового расхода. Также следует отметить схожесть характера распределения концентрации ионов с распределением плотности ионного тока, что подтверждает адекватность проведенных измерений.

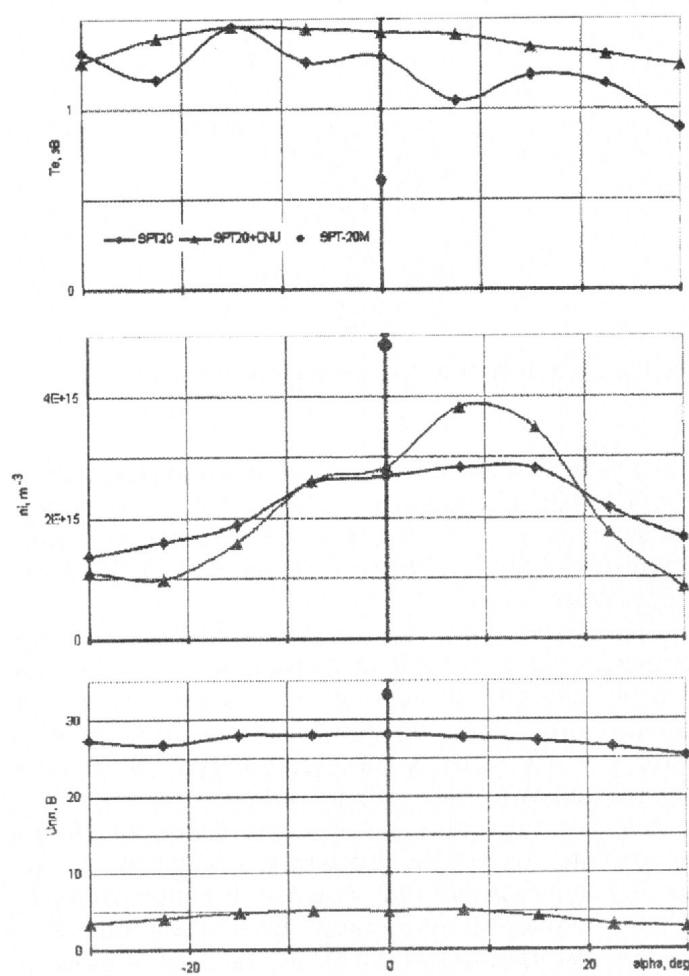


Рис. 5. Угловые распределения температуры электронов, концентрации ионов и потенциала плазмы

ции ионов с распределением плотности ионного тока, что подтверждает адекватность проведенных измерений.

Полученные значения концентрации ионов для всех трех случаев имеют одинаковый порядок, однако для СПД-20+М1.03 они наименьшие, а для СПД-20М на 5-м зонде — наибольшие, что является следствием некоторого большего массового расхода. Также следует отметить схожесть характера распределения концентрации ионов с распределением плотности ионного тока, что подтверждает адекватность проведенных измерений.

Потенциалы плазмы для СПД-20+М1.03 и СПД-20М+М1.03 имеют близкие значения, в то время как для СПД-20+ДНУ/ХАИ он намного меньше, т. к. для катода ДНУ/ХАИ прикатодное падение потенциала имеет наименьшее значение. Из этих данных особенно хорошо видно влияние катодакомпенсатора.

## ВЫВОДЫ

Зондовые измерения позволили определить основные параметры струи плазмы стационарных плазменных двигателей, и сделать качественный и количественный анализ режимов работы движителей, а также сравнительный анализ характеристик трех вариантов систем СПД+катод.

Очевидно, что благодаря изменениям, внесенным в конструкцию магнитопровода, модель СПД-20М по сравнению с СПД-20 имеет лучшие характеристики с точки зрения равномерности углового распределения ионного тока, а также по величине отношения интегрального ионного тока к разрядному. Применение накального катода ДНУ/ХАИ приводит к улучшению фокусировки струи, однако интегральный ионный ток несколько уменьшается (приблизительно на 15 %); также наблюдается перекомпенсация струи плазмы (в частности, отрицательный плавающий потенциал).

Из полученных результатов видно, что изменение параметров магнитной системы и характеристик катода значительно влияют на основные параметры стационарных плазменных двигателей малой мощности. Это позволит в дальнейшем получить плазменные двигатели малой мощности с необходимыми характеристиками.

1. Алексеев Б. В., Котельников В. А. Зондовый метод диагностики плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Белан Н. В., Ким В. П., Оранский А. И. и др. Стационарные плазменные двигатели. — Харьков: Харьков. авиационный ин-т, 1989.
3. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. — М.: Мир, 1967.
4. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
5. Подгорный И. М. Лекции по диагностике плазмы. — М.: Атомиздат, 1968.
6. Ahedo E., Gallardo J. M. Scaling Down Hall Thrusters // IEPC-2003-104 28th Internat. Electric Propulsion Conf. — Toulouse, France, 2003.—17—21 March.
7. Hruby V., Monheiser J., Pote B. Low Power Hall Thruster Propulsion System // IEPC-99-092 26th Internat. Electric Propulsion Conf. — Kitakyushu, Japan, 1999.—Vol. 1.—P. 544—551.
8. Belikov M. B., Gorshkov O. A., Rizakhanov R. N. The Output Parameters and Angular Plume Characteristics of Low Power Hall Thruster // IEPC-99-094 26th Internat. Electric Propulsion Conf. — Kitakyushu, Japan, 1999.—Vol. 1.—P. 552—558.

## PROBE DIAGNOSTICS OF LOW-POWER STATIONARY PLASMA THRUSTER PLUME

Т. А. Максименко, А. В. Лоян, Н. Н. Кошев

Plume parameters of several thruster systems consisting of low-power stationary plasma thruster and cathode are investigated using electrostatic probe method. Influence of magnetic circuit and cathode type on thruster characteristics is determined.

УДК 533.662.013

© Д. А. Редчиц, А. А. Приходько

Дніпропетровський національний університет

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ И АЭРОДИНАМИКИ РОТОРА ВЕТРОАГРЕГАТОВ

Для розв'язування задачі динаміки та аеродинаміки горизонтально- і вертикально-осьового вітроагрегатів розроблено наближена інженерна методика і числовий алгоритм на основі рівнянь Нав'є — Стокса. Реалізовано алгоритми розв'язування нестационарних рівнянь Нав'є — Стокса нестискою рідини в криволінійних координатах на основі явних, неявних, неявних з LU-факторизацією і скінченно-об'ємних схем. Проведено тестування числових алгоритмів. Аналізуються результати розрахунку динаміки ротора вітротурбіни.

Первые теоретические разработки в области исследования ветроколес основаны на импульсной теории [20, 23]. Эта теория базируется на определении суммарных сил и моментов, действующих на ротор, на основе уравнений сохранения массы, количества движения и энергии. Следующим шагом в разработке и анализе ветроагрегатов было создание теории идеального ветродвигателя, осно-

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития энергетического рынка особое внимание уделяется ветроэнергетике как одному из возобновляемых источников энергии. В ближайшее время ветроэнергетика может стать источником наиболее дешевой электроэнергии, вырабатываемой в промышленных масштабах.