

УДК 621.455.4

М. Ю. ТИТОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В КАНАЛЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Данная публикация входит в серию работ по исследованию распределения параметров плазмы в канале стационарного плазменного двигателя и посвящена описанию экспериментального стенда и оборудования, на котором проводились работы. Представлены конструкция двигателя, вакуумный стенд и характеристика его откачной системы, система электропитания двигателя, а также система подачи рабочего тела. Описана конструкция двухкоординатного механизма перемещения зонда в разрядном канале двигателя. Ввод и перемещение зонда осуществлялись через отверстие в аноде-газораспределителе двигателя.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, параметры плазмы, экспериментальный стенд.

Введение

Несмотря на более чем 50-летнюю историю исследования стационарных плазменных двигателей (СПД) до сих пор отсутствует полное понимание физических процессов протекающих в двигателе, а также влияние на них различных факторов [1, 2].

Существующие летные модели доведены до высокого уровня разработки, однако возникшие новые перспективные задачи [2, 3] требуют создания двигателей нового поколения и поэтому актуальным становится продолжение исследование физики процессов в плазме СПД.

Наиболее информативным с точки зрения анализа протекающих в двигателе процессов является исследование параметров плазмы в разрядном канале (РК) СПД.

Самым распространённым методом исследования параметров плазмы в РК СПД является зондовая диагностика. Прежде всего, обусловлено это простотой конструкции зондов и измерительной аппаратуры, а также многообразием измеряемых параметров.

В лаборатории электроракетных двигателей (ЭРД) ХАИ, а также в других украинских научно-исследовательских организациях, занимающихся тематикой ЭРД, уже проводились измерения параметров плазмы в канале СПД [4, 5], однако все измерения носили одномерный характер, проводились вдоль средней линии канала. Так как протекающие в канале двигателя процессы имеют двух и трехмерный характер, то полученные ранее данные имеют ограниченную информативность и не дают понимания полной картины происходящих процессов.

Коллектив лаборатории ЭРД ХАИ имеет богатый опыт использования зондовых методов диагностики плазмы применительно к ЭРД. В основном исследовались параметры катодной плазмы [4], а также струя СПД [5]. На базе двигателя малой мощности СПД-20М было исследовано распределение параметров плазмы вдоль средней линии РК [6].

Для исследования двухмерного распределения параметров плазмы, с возможностью проводить измерения, как по длине, так и по ширине РК, был разработан специальный механизм перемещения зондов. В качестве двигателя был выбран СПД большей мощности и размеров, чем СПД-20М.

В данной работе приведено описание экспериментальной установки и стендового оборудования задействованного при исследованиях параметров плазмы в канале СПД.

1. Двигатель

Исследование параметров плазмы в канале СПД проводились на базе разработанного в ХАИ СПД средней мощности типа М70, прошедшего испытания [8, 9] и продемонстрировавшего характеристики на уровне с мировыми аналогами. В таблице 1 приведено сравнение характеристик разработанного двигателя с характеристиками его аналогов.

Двигатель выполнен по классической схеме (рис. 1) с одной внутренней и четырьмя наружными катушками намагничивания. Стенки разрядной камеры изготовлены из керамики типа АБН.

В качестве катода нейтрализатора использовался безнакальный катод. Во время экспериментов катод располагался сбоку двигателя.

Таблица 1
Сравнение характеристик СПД средней мощности

	СПД-70 ОКБ «Факел» (РФ)	ВНТ-600 «Busek» (США)	СПД «ХАИ» (Украина)
Тяга	40 мН	39,1 мН	41 мН
Мощность	660 Вт	600 Вт	600 Вт
Удельный импульс	1470 с	1530 с	1700 с
Тяговый КПД	43%	49%	52%
Ресурс	3100ч		
Масса	2,0 кг		1,3 кг

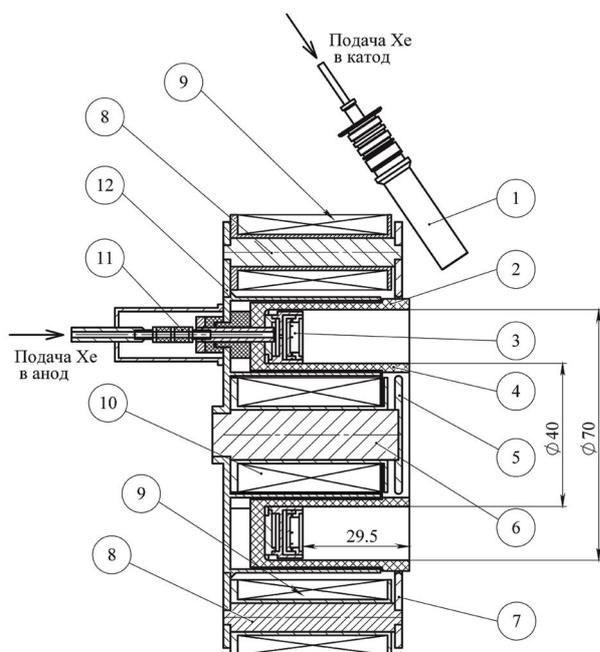


Рис. 1. Схема двигателя СПД-М70:

1 – катод; 2, 4 – наружная и внутренняя стенки разрядного канала; 3 – анод-газораспределитель; 5, 7 – внутренний и наружный магнитные полюсы; 6 – внутренний сердечник; 8 – наружные сердечники; 9 – наружные катушки; 10 – внутренняя катушка; 11 – потенциал-разделитель; 12 – магнитопровод

Для получения доступа в РК в конструкции анода-газораспределителя был предусмотрен специальный канал-отверстие, через который вводился зонд. С целью проверки конструкции анода на равномерность впрыска газа был проведен следующий эксперимент. В анод подавался водород, который затем на выходе из анода воспламенялся. При этом

визуально каких-либо неравномерностей в пламени водорода обнаружено не было.

Для снижения паразитных утечек газа, при работе двигателя, зазор между зондом и стенками канала ввода зонда был минимальным.

2. Вакуумный стенд

Исследования проводились в вакуумной камере (рис. 2) диаметром 1 метр и длиной 2,3 м3. Откачная система стенда оснащена 4 высоковакуумными турбомолекулярными насосами (ТМН) суммарной производительности 10000 л/с по воздуху.

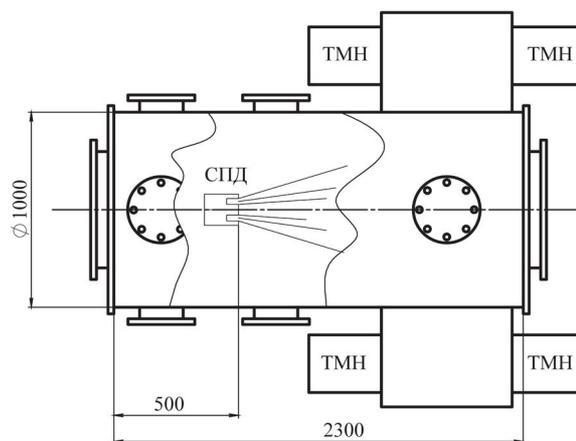


Рис. 2. Схема вакуумной камеры и расположения СПД

Предельно достижимое давление в камере составляет $5 \cdot 10^{-6}$ торр (по воздуху). График зависимости динамического давления в камере от расхода ксенона представлен на рис. 3. Давление при этом измерялось с помощью вакуумметра ВИТ-3 и лампы ПМИ-2, а расход ксенона регулировался сертифицированным расходомером MKS 2179A (0-20 sccm N_2).

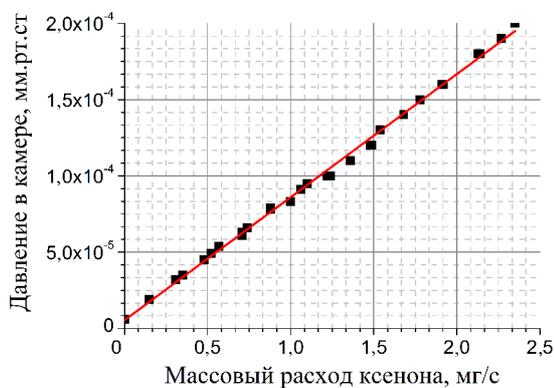


Рис. 3. Зависимость давления в вакуумной камере от расхода ксенона

3. Система электропитания двигателя

Схема системы электропитания двигателя (СЭП) представлена на рис. 4. Основной разряд запитывался от источника питания (ИПОР), представляющего собой трехфазный трансформатор с выпрямителем по схеме Ларионова. Регулировка напряжения основного разряда осуществляется путем изменения напряжения на входе в источник с помощью индукционного регулятора ИР-62 (22 кВт). Выходные параметры ИПОР $U_{\text{ВЫХ}} = 0 \div 600 \text{ В}$, $I_{\text{ВЫХ}} = 0 \div 10 \text{ А}$. Для запуска катода использовался блок поджига (БП) с $U_{\text{ХХ}} = 900 \text{ В}$. Для ограничения тока в поджигной цепи катода было установлено сопротивление $R_{\text{огр}} = 10 \text{ кОм}$. В качестве источников питания внутренней (ИПВС) и наружной катушек (ИПНС) использовались коммерческие источники питания LabTools от VVP Electronix со стабилизацией по току с параметрами $U_{\text{ВЫХ}} = 0 \div 30 \text{ В}$, $I_{\text{ВЫХ}} = 0 \div 15 \text{ А}$. Для снижения уровня колебаний разрядного тока и защиты от них ИПОР в разрядную цепь был включен LC фильтр нижних частот.

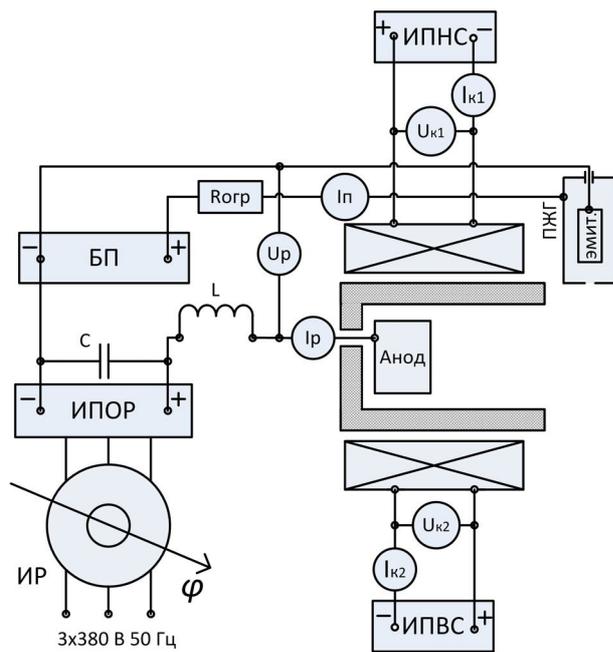


Рис. 4. Схема электропитания двигателя:
ИПОР – источник питания основного разряда;
БП – блок поджига; ИПВС – источник питания внутренней катушки, ИПНС – источник питания наружных катушек; ИР – индукционный регулятор; пжг – поджигной электрод катода; эмит. – эмиттер катода

Электрические параметры двигателя измерялись стрелочными вольт-амперметрами типа М253. Для контроля измеряемых данных, а также для исследования формы сигналов тока и напряжения, использовался двуканальный осциллограф Tektronix

DPO3052 вместе с дифференциальным пробником напряжения Pintek DP-25 и бесконтактным датчиком тока Tektronix TCP-312. Погрешность измерения напряжения 2%, тока 1%.

4. Система хранения и подачи рабочего тела

В качестве рабочего тела в двигателе использовался газ ксенон высокой чистоты (ГОСТ 10219-77, содержание ксенона 99.9997%). На рис. 5 представлена пневматическая схема подачи рабочего тела в двигатель. Регулировка расхода осуществляется с помощью двух коммерческих регуляторов расхода газа Bronkhorst F-200CV-002 0...1,5 sccm O_2 (катодный тракт) и MKS 2179A 0...20 sccm по N_2 (анодный тракт). Погрешность измерения расхода согласно паспортам расходомеров составляет 1% для MKS и 0,5 % для Bronkhorst.

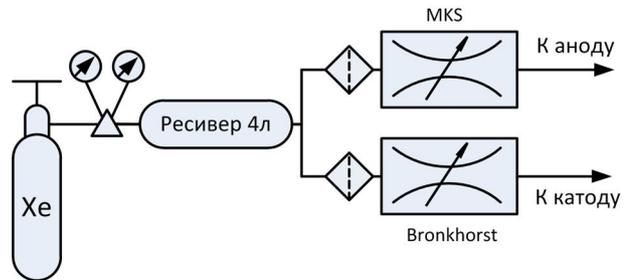


Рис. 5. Пневматическая схема подачи газа

5. Двухкоординатный механизм перемещения зондов

Для перемещения зонда вдоль канала и по его ширине был разработан и изготовлен двухкоординатный механизм (рис. 6), представляющий собой платформу (1), на которой расположены двигатель (2), передвижная каретка (5) и два шаговых двигателя (ШД). ШД №1 (7) зафиксирован на платформе и обеспечивает перемещение каретки вдоль оси СПД. ШД №2 (4) установлен на каретке и предназначен для вращения державки зонда (поз. 3). Механизм настроен так, что оси ШД №2 и прикрепленного к нему зонда совпадают с осью отверстия в аноде двигателя. Таким образом, ШД №1 обеспечивает передвижение зонда вдоль средней линии разрядного канала, а вторая координата положения зонда (по ширине канала) задается вращением вала ШД №2 и державки зонда, при этом державка имеет Г-образную форму (рис. 7).

ШД №1 обеспечивает перемещение зонда с дискретностью в 0,03 мм. ШД №2 осуществляет 48 шагов за один полный оборот. При ширине канала двигателя 15 мм интервал изменения координаты по радиусу двигателя имеет нелинейный вид и состав-

ляет минимум $\approx 0,3$ мм у стенок канала и максимум ≈ 3 мм по центру разрядного канала. Схема получения координаты R по ширине канала представлена на рис. 8.

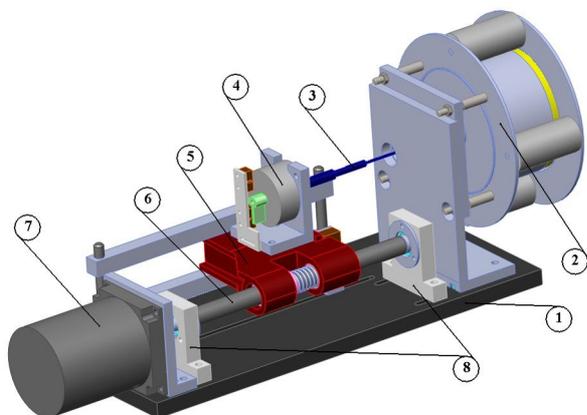


Рис. 6. механизм перемещения:
1 – платформа; 2 – двигатель; 3 – державка зонда;
4 – шаговый двигатель №2; 5 – каретка; 6 – винт;
7 – шаговый двигатель №1; 8 – опоры винта

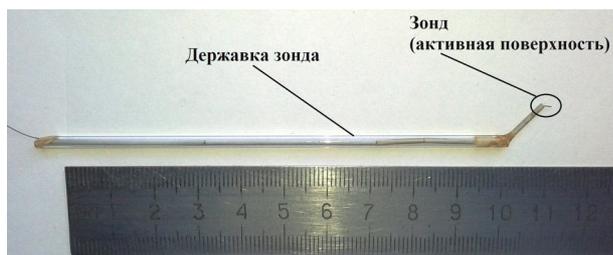


Рис. 7. Фотография одиночного зонда с Г-образной формой державки



Рис. 8. Схема получения 2й координаты R

Для отслеживания текущего положения зонда в канале двигателя использовались датчики перемещения. Точность позиционирования зонда вдоль канала $\pm 0,2$ мм, по радиусу $\pm 0,2$ мм.

Управление драйверами шаговых двигателей

осуществлялось с помощью блока управления на базе аппаратной платформы Arduino.

Максимально развиваемая скорость перемещения зонда вдоль канала двигателя составила 40 мм/с. Таким образом, зонд от крайнего положения возле анода доходил до среза канала и возвращался обратно за время меньше 1,4 с.

Заключение

Экспериментальный стенд и оборудование лаборатории ЭРД в ХАИ позволяют запускать, поддерживать стационарную работу и менять режимы стационарного плазменного двигателя средней мощности. С помощью разработанного координатного механизма и специальной формы державки зондов можно проводить исследование двухмерного распределения параметров плазмы в канале двигателя с хорошим пространственным распределением.

Измерять и регулировать электрические параметры двигателя можно в широком диапазоне и с высокой точностью. Используемые сертифицированные расходомеры обеспечивают стабильную с низкой погрешностью (менее 1%) подачу рабочего тела в двигатель.

Используемый в экспериментах двигатель СПД-М70 выполнен по классической схеме. Близость его основных интегральных характеристик (тяга, к.п.д., удельный импульс) характеристикам мировых аналогов свидетельствует о том, что и внутренние физические процессы близки. Поэтому полученные данные будут интересны и другим разработчикам. Кроме того, физические процессы, протекающие в двигателе, слабо зависят от типоразмера двигателя, и результаты могут быть перенесены на целый модельный ряд СПД в широком диапазоне мощностей.

Литература

1. Архипов, А. С. Стационарные плазменные двигатели Морозова [Текст] / А. С. Архипов, В. П. Ким, Е. К. Сидоренко. – М. : МАИ, 2012. – 290 с.
2. Ким, В. П. Стационарные плазменные двигатели в России: проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / В. П. Ким // МАИ. – 2013. – № 60. – С. 1–12. – Режим доступа: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35374>. – 1.04.2015.
3. Гусев, Ю. Г. Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе [Электронный ресурс] / Ю. Г. Гусев, А. В. Пильников // МАИ. – 2013. – № 60. – С. 1–20. – Режим доступа: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35385>. – 1.04.2015.
4. Алиева, М. Т. Зондовые измерения параметров катодной плазмы и плазмы СПД малой мощно-

сти [Текст] / М. Т. Алиева, Т. А. Максименко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 7 (94). – С. 98-101.

5. Loyan, A. V. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Thruster [Electronic resources] / A. V. Loyan, T. A. Maksymenko // *30th International Electric Propulsion Conference – 2007*. – IEPC-2007-100. – P. 1-14. – Access: <http://erps.spacegrant.org/index.php?page=2007-file-directory>. – 1.04.2015.

6. Лоян, А. В. Исследование параметров плазмы в канале МСПД при повышенных параметрах разряда [Текст] / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, Н. Н. Кошелев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 4 (81). – С. 53-57.

7. Кулагин, С. Н. Локальные характеристики плазмы и уровень колебаний электромагнитного

поля в холловском двигателе при изменении проводимости стенок разрядной камеры [Текст] / С. Н. Кулагин, А. В. Дробот, Л. Г. Дубовик // *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 1. – С. 28-31.

8. Loyan, A. V. Middle power Hall Effect Thruster with centrally located cathode [Electronic resources] / A. V. Loyan, M. Y. Titov, O. P. Rybalov, T. A. Maksymenko // *33rd International Electric Propulsion Conference – 2013*. – IEPC-2013-410. – P. 1-8. – Access: <http://erps.spacegrant.org/index.php?page=2013-directory>. – 1.04.2015.

9. Loyan, A. Results of the study of the Hall Thruster type SPT-70 with centrally located cathode [Text] / A. Loyan, M. Titov, E. Ischenko // *XVII Міжнар. конгрес дізубудівників : тез. доп. / Нац. аерокосмічний ун-т ім. М. С. Жуковського «ХАІ»*. – X., 2012. – С. 66.

Поступила в редакцию 1.06.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А. Н. Петренко, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ У КАНАЛІ СПД

М. Ю. Титов

Дана публікація входить в серію робіт з дослідження розподілу параметрів плазми в каналі стаціонарного плазмового двигуна і присвячена опису експериментального стенду і устаткування, на якому проводилися роботи. Представлено конструкцію двигуна, вакуумний стенд та характеристику його відкачної системи, систему електроживлення двигуна, а так само систему подачі робочого тіла. Описано конструкцію двокоординатного механізму переміщення зонда в розрядному каналі двигуна. Введення і переміщення зонда здійснювалися через отвір в аноді-газорозподільнику двигуна.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, параметри плазми, експериментальний стенд.

EXPERIMENTAL STAND AND EQUIPMENT FOR INVESTIGATION OF PLASMA PARAMETERS INSIDE SPT CHANNEL

M. Y. Titov

This paper is a part of studies on the distribution of the plasma parameters in the channel of the stationary plasma thruster and is devoted to describing experimental stand and equipment enabled during the experiments. Author presents design of the thruster, vacuum stand and its pumping characteristics, power supply system, and gas supply system. Two-dimensional mechanism for moving of the probe in a discharge channel of the thruster is described. Moving of the probe is made through a hole in the anode of the thruster.

Keywords: stationary plasma thruster, plasma parameters, experimental stand.

Титов Максим Юрьевич – аспирант каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@khai.edu.