

УДК 621.455.4

М. Ю. ТИТОВ, А. В. ЛОЯН

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

## ИЗМЕРЕНИЕ ЗОНДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Данная работа выходит в рамках продолжения публикаций по исследованию распределения параметров плазмы в разрядном канале стационарного плазменного двигателя и посвящена описанию методики измерения зондовых характеристик. В работе рассмотрены проблемы зондовых измерений в разрядном канале двигателя и способы их решений. Приведены конструкции применяемых одиночных и нагревных зондов, а так же электрические схемы измерений. Представлены вольт-амперные характеристики одиночного зонда, а так же характеристики нагревного зонда, измеренные в канале СПД типа М70. Показано влияние ввода зонда в канал на разрядный ток двигателя. Дана оценка точности измерения зондовых характеристик.*

**Ключевые слова:** электрический зонд, плазма, стационарный плазменный двигатель.

### Введение

Исследование параметров плазмы в разрядном канале (РК) стационарного плазменного двигателя (СПД) является важнейшим способом изучения физических процессов происходящих в двигателе.

Практически все методы диагностики нашли свое применение при исследовании плазмы СПД. Однако наибольшее распространение получили оптические (например, метод лазером-индуцированной флуоресценции или ЛИФ) и зондовые методы.

ЛИФ по сравнению с зондовым методом является невозмущающим. Однако сложность и высокая стоимость оборудования привели к тому, что метод используется в основном в зарубежных научно-исследовательских организациях. Кроме того, для исследования плазмы внутри РК СПД методом ЛИФ требуются оптически прозрачные окна в стенках канала, что накладывает определённые технические сложности [1]. Поэтому ЛИФ практически не используется при исследованиях плазмы внутри двигателя. Второй способ – зондовые методы, получил наибольшее распространение.

Зондовая диагностика не требует сложной измерительной аппаратуры, конструкция зондов проста, а измеряемые параметры отличаются многообразием. Кроме того, зондовая диагностика позволяет измерять локальные параметры плазмы, в то время как другие методы дают параметры осредненные по большому объему. Недостатком зондовой диагностики является внесение возмущений в исследуемую область. Возмущения вносятся так же и в работу двигателя, что может приводить к изменению исследуемого режима работы двигателя и пере-

стройке разряда [2]. Особенно сильны возмущения, когда зонд вводится в РК и попадает в зону ускорения, при этом увеличивается разрядный ток, плазменная струя двигателя меняет форму, возникают интенсивные колебания, «моргания» разряда, вплоть до полного его срыва и выключения двигателя.

Еще одним фактором, существенно осложняющим зондовые измерения в РК двигателя, является то, что зонд в зоне ускорения подвергается интенсивной бомбардировке заряженными частицами – на зонд выделяется значительная тепловая мощность, происходит его оплавление и разрушение [2].

Существует несколько способов направленных на снижение влияния нахождения зонда в РК на работу двигателя и сохранение его ресурса:

1. Применение пристеночных плоских зондов. В этом случае зонд устанавливается стационарно, заподлицо со стенкой РК (рис. 1). В таком варианте ни возмущений в разряде, ни изменений интегральных характеристик двигателя не наблюдается. Ресурс зонда так же не является критичным. Главный недостаток – неподвижность зонда и поэтому отсутствие возможности измерять параметры плазмы во всем объеме канала. Тем не менее, существует концепция, согласно которой, по известному распределению параметров плазмы вдоль опорной линии, как, например, вдоль наружной стенки канала при использовании пристеночных зондов, можно рассчитать параметры плазмы по всему объему канала двигателя, – при помощи гипотезы о «термолизированном потенциале» [3].

Гипотеза о «термолизированном потенциале» применима в случае постоянства температуры электронов вдоль силовых магнитных линий и однород-

ного магнитного поля, что может наблюдаться не во всех областях разрядного канала [4]. Кроме того, открытыми являются вопросы влияния пристеночного слоя и перепада потенциала в нем на характеристики пристеночных зондов. Поэтому применение пристеночных зондов не всегда решает задачу измерения параметров плазмы во всем объеме РК двигателя. Кроме того, пристеночные зонды не применимы в случае выполнения стенок РК металлическими.

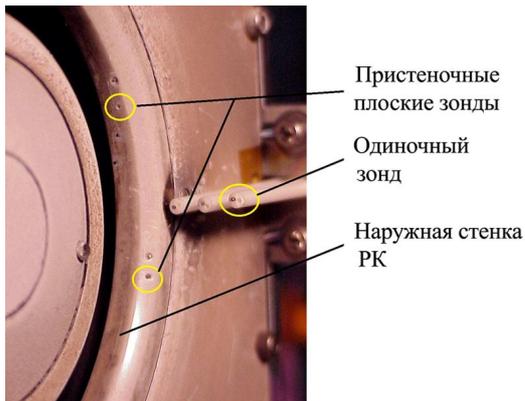


Рис. 1. Фотография пристеночных плоских зондов, установленных в наружной стенке РК (6 шт. справа), и одиночных зондов (3 шт. слева), установленных на выходе из РК [5]

2. Применение «стреляющих» зондов. Это способ направлен на максимальное сокращение времени пребывания зонда в исследуемой области. Время пребывания зонда РК должно быть малым для перегрева и разрушения зонда, но достаточным для проведения измерений. Так, например, в работе [6] зонд вводили в РК со стороны выхода из двигателя с помощью линейного высокоскоростного механизма перемещения со скоростью 0,75 м/с. При таких скоростях перемещения накладываются высокие требования к жесткости связки зонд-механизм перемещения и к позиционированию. Так же применяемый способ ввода зонда со стороны выхода двигателя не является наилучшим, т.к. зонд попадает в РК через зону ускорения, где подвергается наибольшему разрушению от потоков заряженных частиц. Более удачным является введение зонда через боковой паз в стенке РК [7, 8] или через отверстие в аноде [9, 10]. В таких случаях измерения в прианодной зоне РК, даже при постоянном нахождении там зонда, не вносят возмущений в работу двигателя. Поэтому использование «стреляющего» зонда при введении его со стороны анода должно позволить проводить измерения во всем объеме канала двигателя с минимальными возмущениями и высоким ресурсом зонда, что и предлагается в данной работе.

## 1. Электростатические зонды

Использовались два разных по принципу работы зонда: одиночный зонд Ленгмюра и нагревный (эмиссионный).

Для одиночного зонда в РК двигателя измерялась вольт-амперная характеристика (ВАХ), из анализа которой определяется температура электронов  $T_E$ , концентрация заряженных частиц  $N_{ION}$  и потенциал плазмы  $U_{PLASM}$ .

Принцип работы нагревного зонда основан на том, что плавающий потенциал нагретого до высоких температур зонда равен  $U_{PLASM}$ . Тем же зондом в «холодном» состоянии, используя его как одиночный, определяются  $N_{ION}$  и  $T_E$ .

Необходимость использования нескольких типов зондов обусловлена различными условиями их работы, в которых каждый зонд дает более или менее точное определение разных параметров плазмы. Поэтому результаты измерений одиночным и нагревными зондами дополняют друг друга и, таким образом, повышают точность измерений.

## 2. Конструкция зондов

Для измерения параметров плазмы, как по ширине, так и по длине РК, державка зондов имела Г-образную форму (рис. 2) и изготавливалась составной: из горизонтальной части, ориентированной вдоль срединной линии РК, и наклонной части (рис. 3 и 4). С такой формой державки, координата по длине РК задавалась движением державки вдоль центральной линии РК, а вторая координата по ширине РК задавалась вращением державки (см. рис. 2). Между собой две части державки соединялись с помощью высокотемпературного алюмосиликатного клея НС-1.



Рис. 2. Одиночный зонд с Г-образной державкой внутри РК СПД типа М70

## 2.1. Одиночный зонд

Фотография одиночного зонда показана на рис. 3. Активная собирающая поверхность зонда представлена вольфрам-рениевой проволокой  $\varnothing 0,1$  мм, выдвинутой из державки на  $1...1,1$  мм. Данное соотношение длина/диаметр выбрано из рекомендаций [11] для снижения влияния концевых эффектов.



Рис. 3. Одиночный зонд



Рис. 4. Нагревный зонд

## 2.2. Нагревный зонд

Активная поверхность нагревного зонда выполнена в форме петли (рис. 5). Дополнительно внутри кварцевой державки зонда проходит двухканальная корундовая соломка, изолирующая два токоподвода.

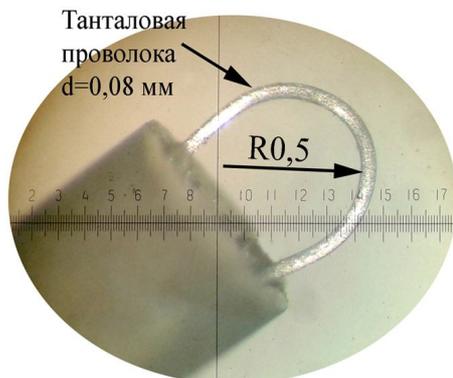


Рис. 5. Активная поверхность нагревного зонда

Для обеспечения нагрева до температур термоэлектронной эмиссии только петли зонда, она изготавливается из проволоки диаметром  $0,08$  мм, в то время как токоведущие провода – из проволоки большего диаметра. Соединение проволок внутри державки зонда осуществлено механическим способом.

## 3. Электрическая схема измерения зондовых характеристик

### 3.1 Одиночный зонд

Для измерений ВАХ одиночного зонда использовалась стандартная электрическая схема, включающая источник постоянного напряжения и приборы измерения напряжения и тока на зонд. Электрическая схема приведена на рис. 6.

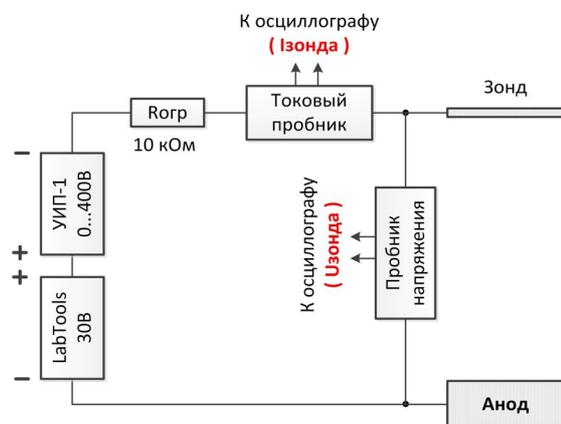


Рис. 6. Электрическая схема измерений одиночным зондом

Напряжение на зонд подавалось с помощью источников питания УИП-1 и 30В15А. Источники подключены встречно для возможности подачи  $-400\text{В}...+30\text{В}$  относительно плавающего потенциала зонда  $U_{\text{FLOAT}}$  и измерения, соответственно, ионной и электронной ветвей вольт-амперной характеристики зонда. Для предотвращения перегрева зонда электронным током в цепь был включен  $10$  кОм резистор. Контроль «холодного» состояния зонда осуществлялся с помощью зеркала установленного сбросу от двигателя.

В качестве противозонда при измерениях использовался анод двигателя.

Напряжение зонда измерялось с помощью дифференциального пробника напряжения Pintek DP-25. Ток на зонд измерялся с помощью бесконтактного токового пробника Tektronix TCP-312. Для повышения чувствительности токового пробника через датчик пропускалось несколько витков проводника с током. Сигнал с пробников выводился на двухканальный осциллограф Tektronix DPO3052.

### 3.2. Нагревный зонд

Электрическая схема измерений нагревным зондом представлена на рис. 7. В качестве источника питания нагрева зонда использовался 12 В аккумулятор с регулятором напряжения на базе транзистора КТ827А.

На рис. 8 показан график зависимости плавающего потенциала зонда от тока нагрева, измеренного возле анода двигателя. По графику видно, что потенциал зонда начинается резко изменяться при токе нагрева  $I_{HEAT} = 1$  А, что соответствует началу заметной термоэмиссии с зонда. При  $I_{HEAT} = 1,3$  А потенциал зонда достигает насыщения – в этой точке плавающий потенциал зонда равен потенциалу плазмы.

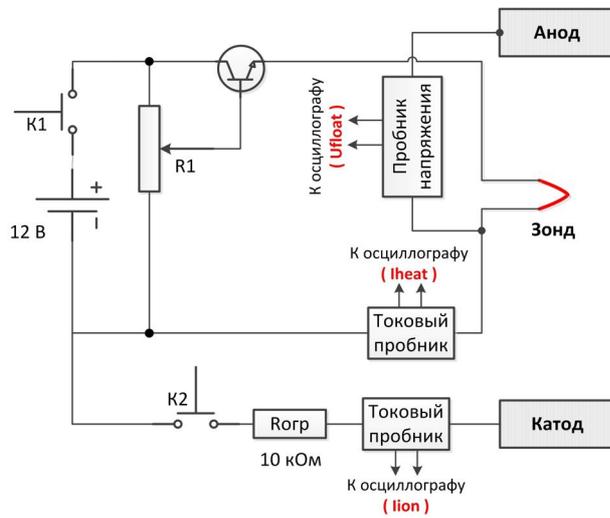


Рис. 7. Электрическая схема измерений нагревным зондом

Для уменьшения методической погрешности определения потенциала плазмы на разных режимах работы двигателя, а так же при использовании разных зондов, необходимо было использовать количественный критерий при выборе тока нагрева зонда. В качестве такого критерия выступил минимальный ток нагрева зонда, увеличение которого на 0,1А не приводило к изменению плавающего потенциала зонда более чем на 2 В (точка 20В/А на рис. 8). Схема определения  $I_{HEAT}$  и  $U_{PLASMA}$  показана линией на рис. 8.

### 4. Измерение зондовых характеристик

Зондовые характеристики в канале двигателя измерялись после выхода двигателя на стационарный тепловой режим, что занимало 1...1,5 часа времени. Во время прогрева двигателя зонд выдвигался вперед по каналу двигателя для обезгаживания и очистки поверхностей державки. Очистка активной

поверхности зонда проводилась в течение 10 минут при подаче на зонд потенциала катода.

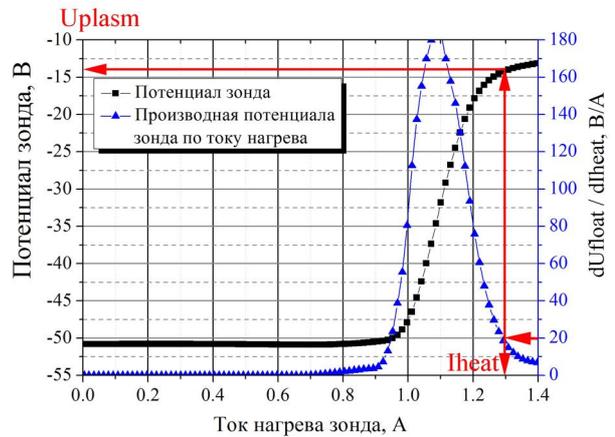


Рис. 8. Зависимость  $U_{FLOAT}$  от тока нагрева зонда, и схема определения  $I_{HEAT}$  и  $U_{PLASMA}$

### 4.1. Одиночный зонд

На рис. 9 представлены ВАХ одиночного зонда, измеренные вдоль внутренней стенки РК двигателя. ВАХ регистрировались осциллографом в режиме высокого разрешения. Каждая осциллограмма записывалась в среднем в течение 8 секунд, а ВАХ состояла из 400 точек.

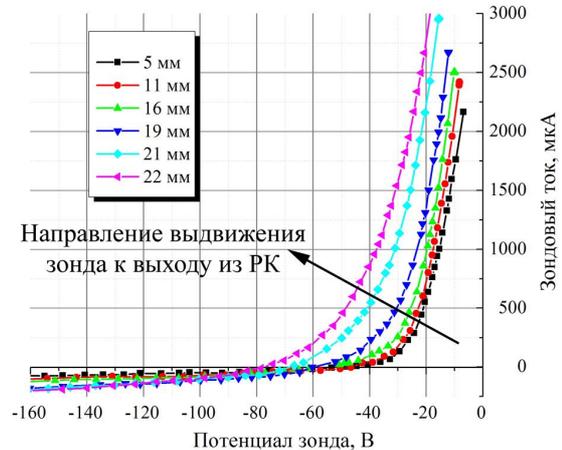


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики одиночного зонда, измеренные на разных расстояниях от анода двигателя при разрядном напряжении  $U_D=200$  В, разрядном токе  $I_D=1,6$  А, расходе ксенона  $\dot{M}_A=1,3$  мг/с)

### 4.2 Нагревный зонд

На рис. 10 представлено изменение потенциала зонда по длине канала при различных токах нагрева эмиссионного зонда. По графикам отчетливо видно, что по мере нагрева зонда плавающий потенциал достигает насыщения, как возле анода, так и по всей

длине разрядного канала. Это свидетельствует о том, что выбор тока нагрева зонда осуществляется верно, и  $U_{PLASM}$  по длине канала определяется одинаково.

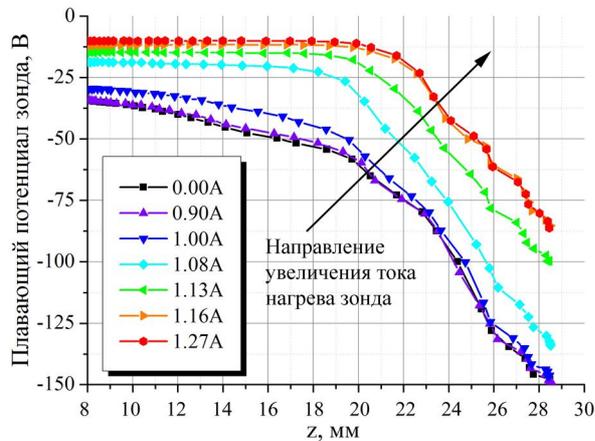


Рис. 10. Изменение  $U_{FLOAT}$  зонда вдоль внутренней стенки РК в зависимости от тока нагрева зонда при  $U_D=200$  В,  $I_D=1,6$  А,  $M_A=1,3$  мг/с (здесь и далее 0 мм по оси z соответствует положению анода, 29,5 – срез РК)

### 5. Возмущения, вносимые зондом в работу двигателя

Введенный в РК зонд со стороны анода двигателя позволил проводить измерения в области близ анода без возмущений в работе двигателя, об этом свидетельствовало отсутствие изменений в величине и форме колебаний разрядного тока, отсутствие видимых локальных возмущений разряда. Протяженность этой области в РК двигателя на всех режимах работы двигателя варьировалась в диапазоне 10-20 мм (при длине канала 29,5 мм), при этом, чем выше разрядное напряжение, тем короче область.

При дальнейшем выдвигании зонда увеличивался разрядный ток, державка зонда начинала греться токами заряженных частиц. Если при низких разрядных напряжениях (менее 200 В) удавалось вывести зонд и проводить измерения даже за срезом двигателя, то при номинальном разрядном напряжении 300 В, далее чем на 15 мм от анода, зонд вывезти не удавалось – происходил мгновенный разогрев, оплавление и разрушение державки зонда (рис. 11).

На рис. 12 представлен график зависимости разрядного тока и  $U_{FLOAT}$  нагретого зонда измеренные при движении зонда в канале двигателя. По графику видно, что влияние внесения зонда в РК начинается на 21,5 мм от анода и сопровождается увеличением разрядного тока. На плавающем потенциале это сказывается в виде колебаний значений. При возвращении зонда обратно к аноду, возмущения исчезают.

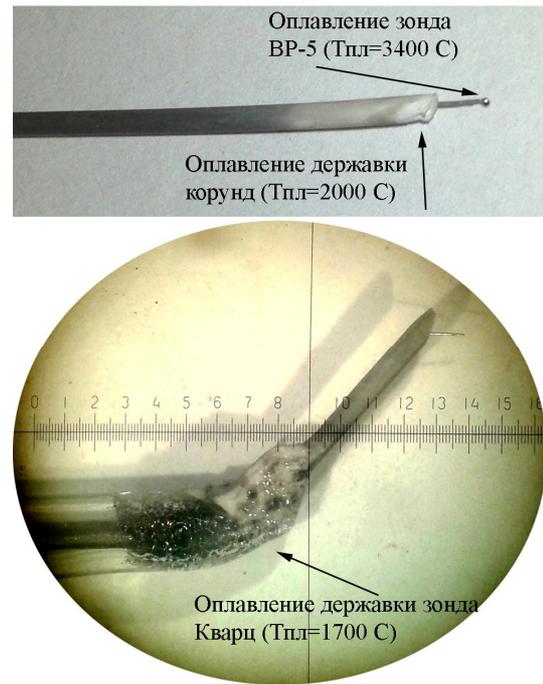


Рис. 11. Разрушение зондов при их попадании в зону ускорения

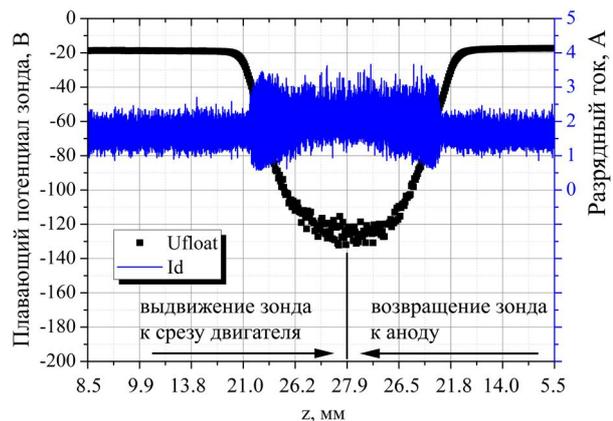


Рис. 12. Осциллограммы разрядного тока и плавающего потенциала зонда при движении зонда в РК

### 6. Оценка точности измерений зондовых характеристик

Относительная погрешность регистрации зондовых характеристик с учетом точности использованных приборов и индивидуальной тарировки измерительного комплекса с помощью универсального вольтметра В7-34 не превосходила 0,1%.

Дополнительно была проведена статистическая оценка погрешности измерений. Для плавающего потенциала и ионного тока на зонд были сделаны выборки из 1000 значений и построены гистограммы распределений (рис. 13, 14). Проверка законов распределения величин была выполнена аналогично [12]. По критерию Пирсона при уровне значимости

$\alpha=0,01$  закон распределения величин  $U_{\text{FLOAT}}$  и  $I_{\text{ION}}$  является нормальным. При доверительной вероятности 0,95 были получены следующие значения доверительных интервалов: для  $U_{\text{FLOAT}}=-45,84\pm 0,29$  В, для  $I_{\text{ION}}=-2030\pm 32$  мкА.

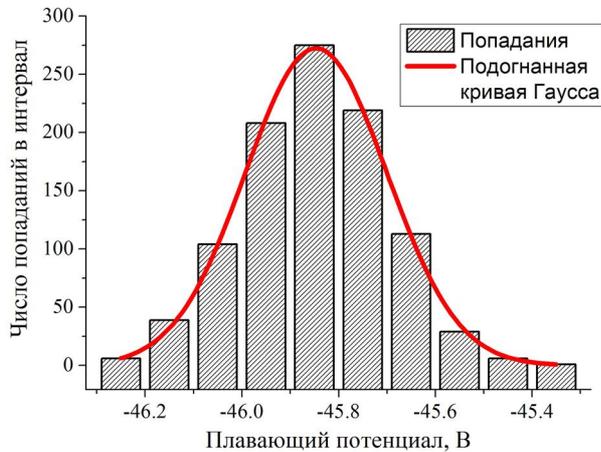


Рис. 13. Гистограмма распределения плавающего потенциала

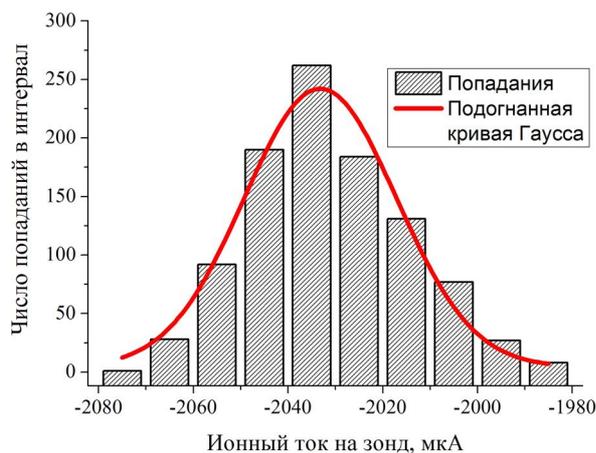


Рис. 14. Гистограмма распределения ионного тока

### Выводы

Измерение параметров плазмы с помощью электрических зондов в разрядном канале СПД является трудной задачей. Главной проблемой является разрушение зондов потоками заряженных частиц и изменение режима работы двигателя при введении зонда в РК.

Введение зонда в РК со стороны анода позволяет проводить измерения без возмущений в работе двигателя в прианодной области, протяженность которой зависит от режима работы двигателя и составляет от 10 до 20 мм (при длине канала  $\approx 30$  мм). При попадании в зону ускорения, локализованную возле выхода РК, происходит разогрев, оплавление

и разрушение зонда с одновременным изменением режима работы двигателя. Применение стреляющего зонда полностью не решает проблемы «живучести» зонда и возмущений в работе двигателя, однако расширяет область измерений и снижает влияние указанных выше эффектов.

В разрядном канале СПД типа М70 были измерены характеристики электрических зондов (одиночного и эмиссионного). Характеристики имеют типичный вид.

Индивидуальная тарировка измерительного комплекса позволила снизить погрешность измерений, регламентируемую паспортами приборов, с 2 % до 0,1 %. Статистический анализ показал, что измеряемые плавающий потенциал зонда и ионный ток на зонд подчинены нормальному закону распределения.

### Литература

1. Hargus, W. A. *Laser-Induced Fluorescence Measurements within a Laboratory Hall Thruster* [Electronic resource] / W. A. Hargus, M. A. Cappelli // 30th *Plasmadynamics and Lasers Conference*. – 1996. – AIAA-99-3436. – P. 1-13. – Access mode: <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA471791>. – 1.04.2015.
2. *An Investigation of Electrostatic Probe Perturbations on the Operational Characteristics of a Hall Thruster and on the Measurement of Local Plasma parameters* [Electronic resource] / J. M. Haas, G. G. Spanjers, K. McFall, R. A. Spores // 34th *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. – 1998. – AIAA-98-3656. – P. 1-10. – Access mode: [http://www.pepl.engin.umich.edu/pdf/AIAA-98-3656\\_harp.pdf](http://www.pepl.engin.umich.edu/pdf/AIAA-98-3656_harp.pdf). – 1.04.2015.
3. Морозов, А. И. *Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков в ЭРД* [Текст] / А. И. Морозов. – М. : Атомиздат, 1978. – 326 с.
4. *On the Applicability of thermalized potential solver in simulations of the plasma flow in Hall Thrusters* [Electronic resource] / J. Geng, L. Brieda, L. Rose, M. Keidar // *J. Appl. Phys.* – 2013. – № 114. – 10305. – P. 1-7. – Access mode: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/114/10/10.1063/1.4821018>. – 1.04.2015.
5. Warner, N. Z. *Characterization of a high specific impulse hall thruster using electrostatic probes* [Electronic resource] / N. Z. Warner, J. J. Szabo, M. Martinez-Sanchez // 28th *International Electric Propulsion Conference*. – 2003. – IEPC-2003-82. – P. 1-9. – Access mode: <http://erps.spacegrant.org/index.php?page=2003-file-directory>. – 1.04.2015.
6. Linnell J. A., *Langmuir Probe Mapping of a Hall Thruster with Xenon and Krypton Propellant* [Electronic resource] / J. A. Linnell, A. D. Gallimore // 42nd *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. – 2006. – AIAA-2006-4470. – P. 1-18.

– Access mode: <http://pepl.engin.umich.edu/pdf/AIAA-2006-4470.pdf>. – 1.04.2015.

7. Бишаев, А. М. Исследование локальных параметров плазмы в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения [Текст] / А. М. Бишаев, В. Ким // Журн. технич. физики. – 1978. – Т. 48, № 9. – С. 1853–1867.

8. Dorf, L. Electrostatic probe apparatus for measurements in the near-anode region of Hall thrusters [Text] / L. Dorf, Y. Raitses, N. J. Fisch // Rev. Sci. Instrum. – 2004. – Vol. 75. – P. 1255–1260.

9. Characterization of plasma inside the Spt-50 channel by electrostatic probes [Electronic resource] / G. Guerrini, C. Michaut, M. Dudeck, A. N. Veselovzorov, M. Bacal // 25th International Electric Propulsion Conference – 1997. – IEPC-97-053. – P. 1-7. – Access mode: <http://erps.spacegrant.org/>

<index.php?page=1997-file-directory>. – 1.04.2015.

10. 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.

11. Алексеев, Б. В. Зондовый метод диагностики плазмы [Текст] / Б. В. Алексеев, В. А. Котельников. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 239 с.

12. Исследование параметров плазмы в канале МСПД при повышенных параметрах разряда [Текст] / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, П. С. Приходько, Е. П. Солонинко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 9(76). – С. 164-171.

Поступила в редакцию 01.06.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А. Н. Петренко, Днепрпетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепрпетровск.

#### ВИМІРЮВАННЯ ЗОНДОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РОЗРЯДНОМУ КАНАЛІ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА

*М. Ю. Тітов, А. В. Лоян*

Дана робота виходить у рамках продовження публікацій з дослідження розподілу параметрів плазми в розрядному каналі стаціонарного плазмового двигуна і присвячена опису методики вимірювання зондових характеристик. В роботі розглянуто проблеми зондових вимірювань в розрядному каналі двигуна і способи їх рішень. Наведено конструкції застосовуваних одиночних і нагрівних зондів, а так само електричні схеми вимірів. Представлено вольт-амперні характеристики одиночного зонда та характеристики нагрівного зонда вимірянні в каналі СПД типу М70. Показано вплив введення зонда в канал на розрядний струм двигуна. Приведена оцінка точності вимірювання зондових характеристик.

**Ключові слова:** електричний зонд, плазма, стаціонарний плазмовий двигун.

#### MEASUREMENTS OF PROBE CHARACTERISTICS IN THE DISCHARGE CHANNEL OF STATIONARY PLASMA THRUSTER

*M. Y. Titov, A. V. Loyan*

This publication continues coverage study on plasma parameters distribution in the discharge channel of the stationary plasma thruster and is devoted to the description of probe characteristics measuring. Problems of probe measurements in the discharge channel are shown and the ways of their solving is presented. Designs of used single and emissive probes are presented, as well as electrical circuits. Voltage-current characteristics of a single probe, as well as the characteristics of the emissive probe, measured inside the channel of M70 type SPT are presented. The influence of a probe introduction into the channel on the discharge current of the thruster is shown. The estimation of accuracy of the measurement probe characteristics is given.

**Key words:** electric probe, plasma, stationary plasma thruster.

**Тітов Максим Юрьевич** – аспірант каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [titov@khai.edu](mailto:titov@khai.edu).

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).