

УДК 621.455.32

**М. Ю. ТИТОВ, А. В. ЛОЯН, Н. Б. ЧУПРЫНА***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В работе представлены результаты измерений локальных параметров плазмы в газоразрядном канале стационарного плазменного двигателя типа М70. Представлено описание области измерений; на примере записанной осциллограммы плавающего потенциала зонда объяснена логика сканирования области измерений. С помощью эмиссионного зонда измерены распределения плавающего потенциала зонда, потенциала плазмы, плотности ионного тока. В предположении максвелловского распределения электронов сделаны расчеты электронной температуры и концентрации заряженных частиц в канале двигателя. Представленные результаты имеют хорошее пространственное распределение.*

**Ключевые слова:** *плазменный двигатель, параметры плазмы, эмиссионный зонд.*

### Введение

Стационарный плазменный двигатель (СПД) - электрореактивный двигатель, в котором тяга создается потоком ионов, образованных и ускоренных в скрещенном электрическом и магнитном полях. Качество работы двигателя определяется эффективностью организации процессов ионизации и ускорения рабочего тела. Эти процессы имеют сложный характер и определяются многими факторами [1].

Несмотря на 50-летний опыт исследования и разработки СПД, до сих пор есть пробелы в полном понимании физических процессов и влиянии на них различных факторов [2]. Кроме того, сейчас предъявляются новые требования к СПД, и, соответственно, открываются новые области для исследований, которые ранее не рассматривались и не изучались [3]. Необходимо отметить, что большая часть исследований СПД была проведена в 70 – 80-х гг. С тех пор, наряду с бурным развитием науки и техники, повысилась точность измерительного и диагностического оборудования, усовершенствовались автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы. Таким образом, даже повтор исследований должен повысить качество исследований, открыть новые особенности протекания физических процессов.

Наиболее информативным с точки зрения анализа протекающих в двигателе физических процессов является исследование локальных параметров плазмы в газоразрядной камере (ГРК) двигателя. Подобные исследования дают богатый материал для анализа физических процессов и поиска путей их оптимизации.

Первые исследования параметров плазмы датируются началом 70-х годов [4] и, что необ-

ходимо отметить, продолжаются до сих пор [5]. Однако систематизация результатов, полученных различными авторами, является сложной задачей. Это можно объяснить следующими причинами:

- основные сведения периода СССР были получены на лабораторных макетах СПД, конструкция которых существенно отличается от современных двигателей. Так, например, в работе [6] исследовался двигатель без магнитных экранов, установка которых, как впоследствии было обнаружено, приводит к улучшению характеристик двигателя. Поэтому практически все современные двигатели комплектуются магнитными экранами;

- полная информация о конструкции исследуемых двигателей не раскрывается с целью защиты коммерческой тайны, поэтому учет влияния «скрытых» факторов не представляется возможным. Часто, в публикуемых по данной тематике работах, не приводится информация о магнитном поле в ГРК, о материале стенок ГРК. При этом известно, что они в значительной степени определяют процессы в двигателе.

- нередко результаты исследований являются «нефизичными»; низкое пространственное разрешение измерений, а также их одномерность [5, 7], при явно двухмерном распределении параметров плазмы в ГРК двигателя, позволяет лишь качественно судить об изменениях в двигателе при изменении того или иного фактора;

- противоречия результатов полученных различными исследовательскими группами. Например, в [8] при использовании рабочего газа криптон вместо ксенон, было обнаружено

смещение зоны ионизации и ускорения в сторону среза ГРК, что противоречит результатам работы [9].

В связи с вышесказанным, актуальным является продолжение изучения физических процессов СПД с помощью исследования параметров плазмы в ГРК двигателя.

Авторами проводится серия экспериментальных работ по исследованию параметров плазмы в ГРК СПД зондовыми методами. В [10] приведено описание экспериментального стенда, оборудования, двигателя, механизма перемещения зондов, в [11] - конструкции зондов и методики измерения их характеристик. В данной публикации представлены первые результаты измерений параметров плазмы в ГРК СПД с помощью эмиссионных зондов.

### 1. Область измерений

Область измерений параметров плазмы в ГРК двигателя схематически показана на рис. 1. По ширине область ограничена наружной и внутренней стенками. Крайняя левая граница области (со стороны анода) определяется размерами наклонной части державки зонда [11], крайняя правая - приемлемым тепловым состоянием зонда, при котором не происходит его оплавления и разрушения.

Данные измерялись в 14 сечениях по ширине канала от R20 мм до R35. Ход зонда вдоль оси двигателя, для представленных в работе результатов, составляет 16 мм - [-13,7; +2,3] мм относительно среза ГРК.



Рис. 1. Схема области измерений

### 2. Сканирование области

Измерения в ГРК проводились в режиме непрерывного сканирования. Процедура сканирования ГРК показана на примере записанной осциллограммы плавающего потенциала зонда (рис.2). После перемещения на  $i$ -ое сечение по ширине ГРК (I) зонд движется в направлении среза ГРК (интервал II - III) и возвращается обратно в направлении анода (III - IV); далее зонд перемещается на  $i+1$  сечение по ширине

канала (V) и повторяет движение вдоль канала двигателя. В такой последовательности происходит сканирование всей ГРК.

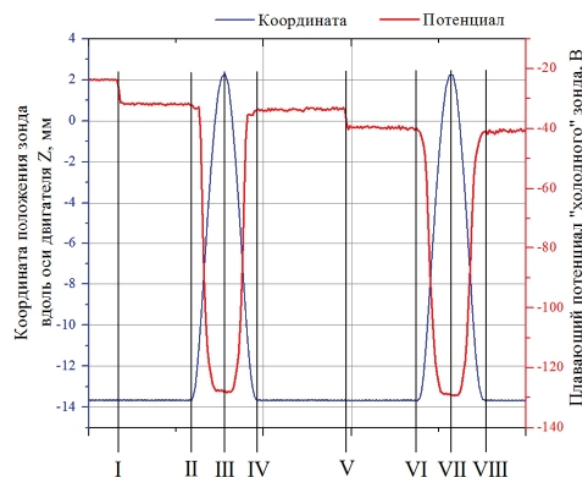


Рис. 2. Часть осциллограммы плавающего потенциала зонда в «холодном» состоянии

### 3. Результаты измерений

Измерения проводились на следующем режиме работы двигателя:

- расход газа через анод 1,3 мг/с;
- разрядное напряжение 150 В;
- разрядный ток 1,2 А;
- токи катушек выбраны из условия минимума разрядного тока.

Представление результатов измерений и расчетов параметров плазмы сделано в виде контурных графиков, построенных в пакете анализа численных данных OriginPro 8.5. Сглаживание данных выполнено встроенным средством - сплайном типа «плоская пластина» с параметром сглаживания 0,01.

На рис.3 приведено распределение плавающего потенциала эмиссионного зонда в «холодном» состоянии  $U_{\text{плав}}$ , на рис.4 - распределение потенциала плазмы  $U_{\text{плазмы}}$  (плавающий потенциал зонда в «горячем» состоянии [12]).

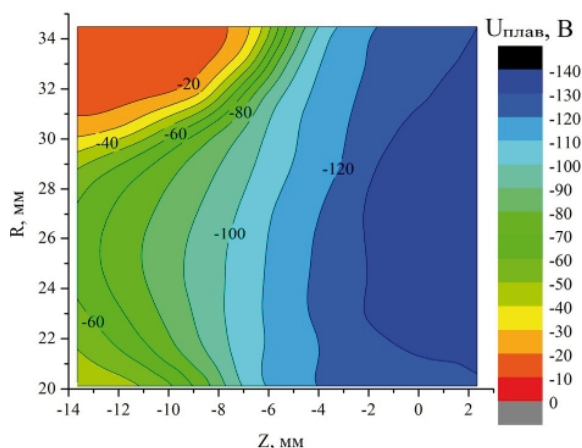


Рис. 3. Распределение плавающего потенциала зонда

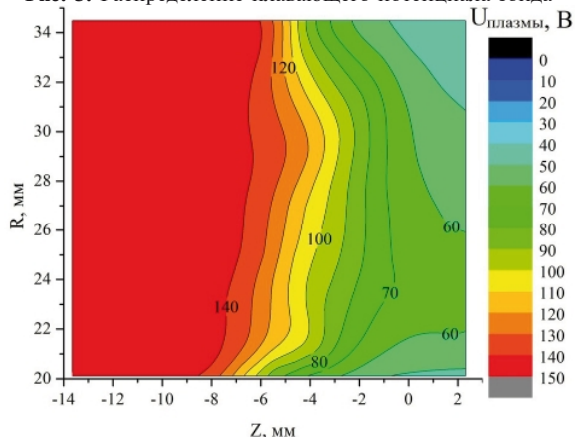


Рис. 4. Распределение потенциала плазмы (пересчитано по отношению к потенциалу катода)

На рис. 5. представлено распределение плотности ионного тока на зонд  $J_i$ .

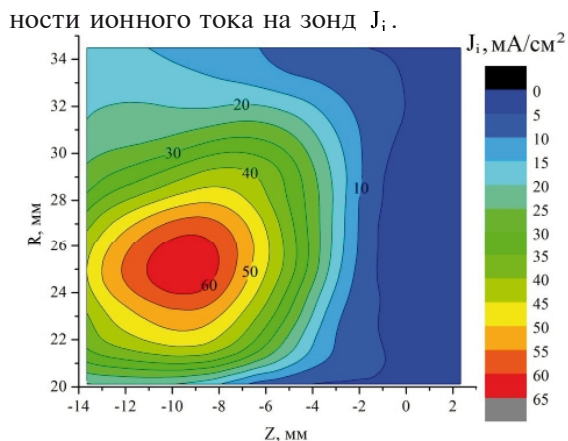


Рис. 5. Распределение плотности ионного тока

#### 4. Результаты расчетов

##### 4.1 Температура электронов

Расчет температуры электронов  $T_e$  сделан в предположении максвелловского распределения электронов по формуле связывающей потенциал плазмы и плавающий потенциал зонда [13]:

$$U_{\text{плав}} - U_{\text{плазмы}} = -\frac{k \cdot T_e}{e} \cdot \ln \left( \frac{\bar{e}}{\sqrt{4 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right), \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;

$e$  – заряд электрона, Кл;

$\bar{e}$  – число  $e$ ;

$m_i$  – масса иона, кг;

$m_e$  – масса электрона, кг.

Для ксеноновой плазмы, подставив известные значения, получим следующее выражение:

$$T_e = \frac{U_{\text{плазмы}} - U_{\text{плав}}}{5,93}. \quad (2)$$

Распределение  $T_e$  представлено на рис.6.

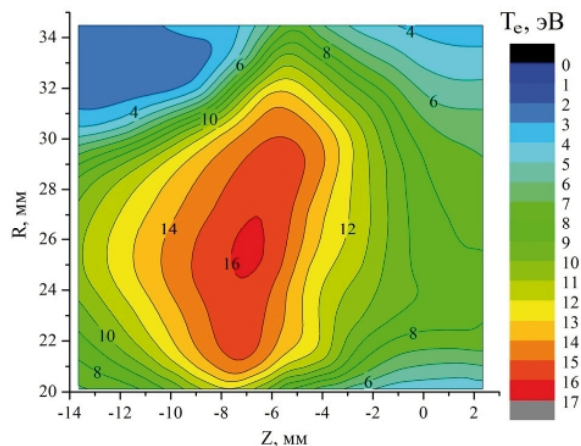


Рис. 6. Распределение температуры электронов

##### 4.2 Концентрация заряженных частиц

Расчет концентрации заряженных частиц осуществлялся по измеренной плотности ионного тока на зонд в Бомовском приближении [14]:

$$n_i = \frac{J_i}{a \cdot e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T_e}{m_i}}}, \quad (3)$$

где  $J_i$  – плотность ионного тока на зонд, А/м<sup>2</sup>;

$a = 0,4$  – безразмерный параметр;

Расчитанное распределение концентрации  $n_i$  представлено на рис.7.

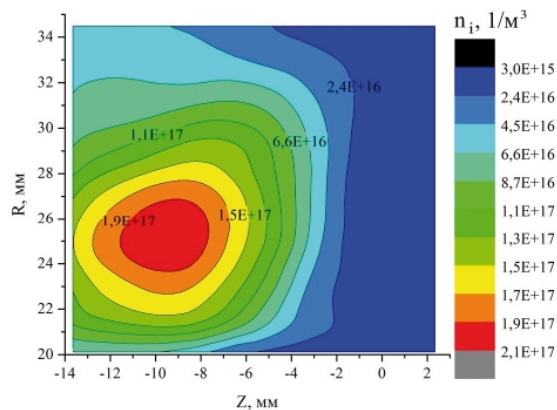


Рис. 7. Распределение концентрации электронов

##### Выводы и планы дальнейших работ

По приведенным результатам измерений и расчетов параметров плазмы можно сделать следующие выводы:

1. Примененный способ введения зонда со стороны анода позволяет получить каче-

ственные и количественные, с хорошим пространственным разрешением, распределения параметров плазмы;

2. Распределение параметров плазмы в ГРК имеет явно двухмерный вид. Наблюдается наличие области с максимальными значениями

$T_e$  и  $n_i$ .

В дальнейшем планируется исследование влияния различных параметров (разрядное напряжение, расход газа, магнитного поля) на распределение параметров плазмы в канале двигателя.

### Литература

1. Ким В. П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова [Текст] / В. П. Ким // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 3. – С. 45–59.

2. Архипов А. С. Стационарные плазменные двигатели Морозова [Текст] / А. С. Архипов, В.П. Ким, Е. К. Сидоренко. – М. : МАИ, 2012. – 290 с.

3. Ким В. П. Стационарные плазменные двигатели в России : проблемы и перспективы [Электронный ресурс] / В. П. Ким. – М.: МАИ – 2013. – № 60. – С. 1–12. Режим доступа : <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35374>. – 1.04.2016 г.

4. Экспериментальное исследование плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения [Текст] / А. И. Морозов, Ю. В. Есипчук, Г. И. Тилинин [и др.] / Журнал технической физики. – 1972. – Т. 42, № 1. – С. 54–63.

5. Shastry R. Experimental Investigation of the Near-Wall Region in the NASA HiVNAc EDU2 Hall Thruster [Электронный ресурс] // R. Shastry, H. Kamhawi, W. Huang, T. W. Haag // 34th IEPSC. – 2015. – IEPSC-2015-246. – С. 1-11, Режим доступа : [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/2015Presentations/IEPSC-2015-246\\_ISTS-2015-b-246.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/2015Presentations/IEPSC-2015-246_ISTS-2015-b-246.pdf). – 1.04.2016 г.

6. Бишаев А. М. Исследование локальных параметров плазмы в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения [Текст] / А.М. Бишаев, В. Ким / Журнал технической физики. – 1978. – Т. 48, № 9. – С. 1853–1857.

7. Shastry R. Experimental Characterization of the Near-Wall Plasma in a 6-kW Hall Thruster and Comparison to Simulation [Text] / R. Shastry, A. D. Gallimore, R. R. Hofer // 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 2011. – AIAA 2011-5589. – С. 1-22.

8. Yim J. T. Computational Modeling of Hall Thruster Channel Wall Erosion [Электронный ресурс] : diss. doctor of philosophy : защищена 2008 / John Tamin Yim. – The University of Michigan, USA. – 160 с. Режим доступа : <http://www.ngpdlab.engin.umich.edu/files/papers/Yim.pdf>. – 1.04.2016 г.

9. Local plasma parameter measurements by nearwall probes inside the SPT accelerating channel under thruster operation with Kr [Электронный ресурс] / Kim, D. Grdlichko, V. Kozlov [at all] // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 2002. – AIAA 2002-4108. С. 1-5. Режим доступа : <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2002-4108>. – 1.04.2016 г.

10. Титов М. Ю. Экспериментальный стенд и оборудование для исследования параметров плазмы в канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 7(124). – С. 121-125.

11. Титов М. Ю. Измерение зондовых характеристик в разрядном канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 8(125). – С. 82-88.

12. A comparison of emissive probe techniques for potential measurements in a complex plasma [Электронный ресурс] // J. P. Sheehan, Y. Raitses, N. Hershkowitz [и др.] / Phys. Plasmas. – 2011. – 18, - 073501. С. 1-10. Режим доступа : <http://htx.pppl.gov/publication/Journal/Emissive%20probe.pdf>. – 1.04.2016.

13. Райзер Ю. П. Физика газового разряда [Текст] / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с.

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

*Поступила в редакцию 12.06.2016*

**М.Ю. Тітов, А.В. Лоян, Н.Б. Чуприна. Результати вимірювань локальних параметрів плазми в розрядному каналі стаціонарного плазмового двигуна**

*У роботі представлені результати вимірювань локальних параметрів плазми в газорозрядному каналі стаціонарного плазмового двигуна типу М70. Представлено опис області вимірювань; на прикладі записаної осцилограми плаваючого потенціалу зонда пояснена логіка сканування області вимірювань. За допомогою емісійного зонда виміряні розподіли плаваючого потенціалу зонда, потенціалу плазми, щільності іонного струму. У припущенні максвеллівського розподілу електронів зроблені розрахунки електронної температури та концентрації заряджених частинок в каналі двигуна. Представлені результати мають гарне просторове розподіл.*

**Ключові слова:** плазмовий двигун, параметри плазми, емісійний зонд.

**M. Yu. Titov, A. V. Loyan, N. B. Chuprina. Measurements of local plasma parameters in the discharge channel of stationary plasma thruster**

*The paper presents results of measurements of the local plasma parameters in the gas discharge channel of the stationary plasma engine M70 type. The description of the measurement region is given; The description of the measurement region is given; explanation of scanning logic of measurements domain is done with help of recorded oscillogram of probe floating potential. Distributions of the floating potential, plasma potential and ion current density were measured using emissive probe. Assuming a Maxwellian electron distribution calculation of electron temperature and concentration of charged particles were done. The presented results have good spatial resolution.*

**Keywords:** plasma engine, the plasma parameters, the emission probe.