

УДК 621.455.32

М. Ю. ТИТОВ, А. В. ЛОЯН, Н. Б. ЧУПРЫНА

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

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В КАНАЛЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе представлены результаты измерений локальных параметров плазмы в газоразрядном канале стационарного плазменного двигателя типа М70 при различных токах через внутреннюю катушку магнитной системы. Проведено сравнение распределений параметров плазмы и магнитного поля в канале двигателя. Параметры плазмы измерялись с помощью эмиссионного зонда, магнитное поле рассчитывалось в пакете Ansoft Maxwell. Выявлены отклонение эквипотенциальных линий от силовых линий магнитного поля и, вместе с тем, существенная связь между параметрами плазмы и магнитным полем в газоразрядном канале двигателя.

Ключевые слова: плазменный двигатель, потенциал плазмы, магнитное поле.

Введение

Магнитное поле (МП) – один из управляющих параметров стационарного плазменного двигателя (СПД), от которого существенно зависят его выходные характеристики. Существуют различные критерии, по которым на этапе разработки можно подобрать оптимальное магнитное поле [1, 2, 3]:

- симметричность силовых магнитных линий относительно срединной поверхности газоразрядного канала (ГРК);
- большой продольный градиент магнитного поля dBr/dz в ГРК;
- вынос положения максимального значения радиальной составляющей индукции магнитного поля $B_{r_{max}}$ в направлении выходного сечения ГРК.

Однако считается, что еще не все возможности по улучшению характеристик двигателя с помощью МП исчерпаны. Так, например, несмотря на линзообразный профиль силовых магнитных линий в ГРК двигателя, «отжимающий» ионы от стенок канала, ни разу не было продемонстрировано работы двигателя без эрозии стенок ГРК. Связано это, главным образом, со сложностью физических процессов в разрядном канале двигателя и недостаточной изученностью влияния на них магнитного поля.

Физические процессы в СПД, а это преимущественно процессы ионизации и ускорения в ГРК, могут быть описаны параметрами плазмы. Единственный способ определения параметров плазмы – экспериментальный, где наибольшее распространение получил зондовый метод диагностики [4].

В связи с вышесказанным актуальным является экспериментальное исследование параметров плаз-

мы в ГРК СПД и поиск их взаимосвязи с распределением магнитного поля.

Описание эксперимента

Исследование параметров плазмы проводилось в СПД средней мощности типа М70 с помощью эмиссионных зондов. Подробное описание двигателя, экспериментального оборудования приведено в работе [5], методики измерений в [6]. Результаты измерений параметров плазмы, а так же результаты расчетов магнитного поля, используемые в данной работе, опубликованы в журнале «Авиационно-космическая техника и технология» одновременно с текущей работой.

Исследование параметров плазмы проводилось на режиме работы двигателя с оптимальным магнитным полем, а так же на режимах с уменьшенным током через внутреннюю катушку двигателя.

1. Оптимальный по магнитному полю режим работы двигателя

Под оптимальным подразумевается режим работы двигателя, на котором токи катушек магнитной системы выбраны из условия минимума разрядного тока. Для рассматриваемого режима (расход газа через анод $\dot{M}_a = 1,3$ мг/с, разрядный ток $I_d = 1,2$ А и напряжение $U_d = 150$ В) оптимальный ток наружных катушек составил 1,5 А, внутренней катушки – 1,0 А.

На рисунке 1 приведено измеренное распределение электрического потенциала U_{plasma} . Совмес-

тив U_{plasma} с профилем силовых магнитных линий (СМЛ) можно обнаружить, что эквипотенциальные линии не совпадают с СМЛ, демонстрируя, таким образом, невыполнение гипотезы о «термализированном» потенциале [7].

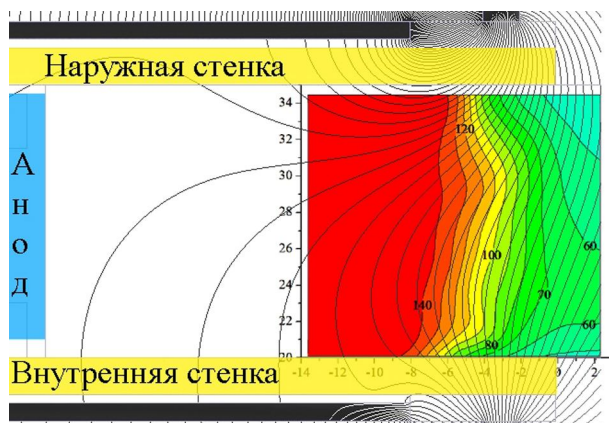


Рис. 1. Распределение электрического потенциала и профиль СМЛ в ГРК

Обращает на себя внимание наличие связи между областью с отрицательным магнитным полем и областью с низкой температурой электронов T_e (рис. 2) вдоль наружной стенки ГРК.

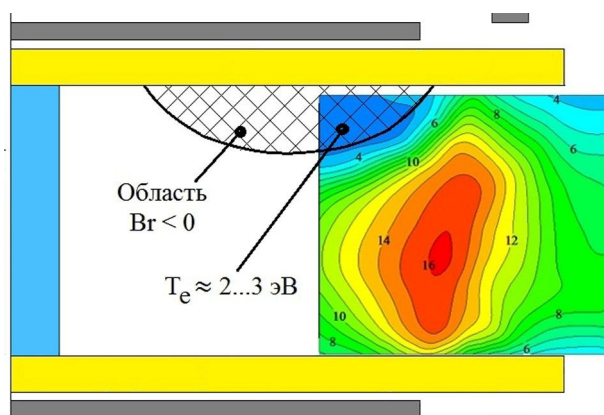


Рис. 2. Распределение T_e и положение области с $B_g < 0$

На рисунках 3 - 5 представлены распределения U_{plasma} , J_{ion} , T_e и B_g в трех сечениях по ширине канала: вдоль срединной линии, и вдоль линий, отстоящих на 1 мм от внутренней и наружной стенок канала.

По представленным распределениям можно выявить следующие закономерности:

1. Напряженность электрического поля в большей части канала $E_z \approx 0$ В/см. При длине канала 28 мм, приложенная разность потенциала U_d срабатывает лишь на участке длиной 6-8 мм, расположен-

ном в области выходного сечения двигателя.

2. Потенциал плазмы в большей части канала \approx разрядному напряжению U_d .

3. Область с максимальной степенью ионизации (о положении которой можно судить по распределению J_{ion}) находится там, где напряженность электрического поля незначительна, а магнитное поле > 0 .

4. Область с $T_{e\text{max}}$ находится дальше по потоку газа, чем область с $J_{\text{ion max}}$.

5. Распределения J_{ion} и T_e имеют колоколообразный вид, что свидетельствует о наличии центров, в которых параметры плазмы принимают свои максимальные значения. Кроме того, наблюдается неоднородность параметров по ширине канала. Так, значения T_e и J_{ion} вдоль наружной стенки в 2-3 раза меньше, чем вдоль срединной линии и внутренней стенки канала. Это характеризует распределение параметров плазмы в канале двигателя как существенно двухмерное.

Отмеченные выше особенности распределения параметров плазмы хорошо коррелирует с результатами полученными другими авторами [8, 9].

Рассмотрим связь положения максимумов параметров плазмы и положения зоны ускорения с величиной магнитного поля (таблица 1) в различных сечениях по ширине канала:

1. Зона ускорения в ГРК начинается раньше возле наружной стенки, что так же видно по эквипотенциальным линиям (см. рис. 1), имеющим наклон к внутренней стенке канала.

2. Начало ЗУ в различных сечениях по ширине канала соответствует различным значениям B_g .

Таблица 1
Положение максимумов параметров плазмы в ГРК

| Параметр | Внутренняя стенка | Средняя линия | Наружная стенка |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Начало ЗУ | $z = -8$ мм | $z = -6,5$ мм | $z = -6$ мм |
| | $0,42 B_{g\text{max}}$ | $0,67 B_{g\text{max}}$ | $0,48 B_{g\text{max}}$ |
| $B_{g\text{max}}$, мТл | 23,5 | 13,1 | 18,5 |
| Положение $B_{g\text{max}}$ | $z = -2,5$ | $z = -0,5$ | $z = -2,5$ |
| Положение $T_{e\text{max}}$ | $z = -7,5$ мм | $-6,5$ мм | -5 мм |
| | $0,46 B_{g\text{max}}$ | $0,7 B_{g\text{max}}$ | $0,67 B_{g\text{max}}$ |
| $T_{e\text{max}}$, эВ | 14,6 | 15,8 | 8,5 |
| Положение $J_{\text{ion max}}$ | $z = -10$ мм | $z = -9$ мм | - |
| | $0,24 B_{g\text{max}}$ | $0,47 B_{g\text{max}}$ | - |

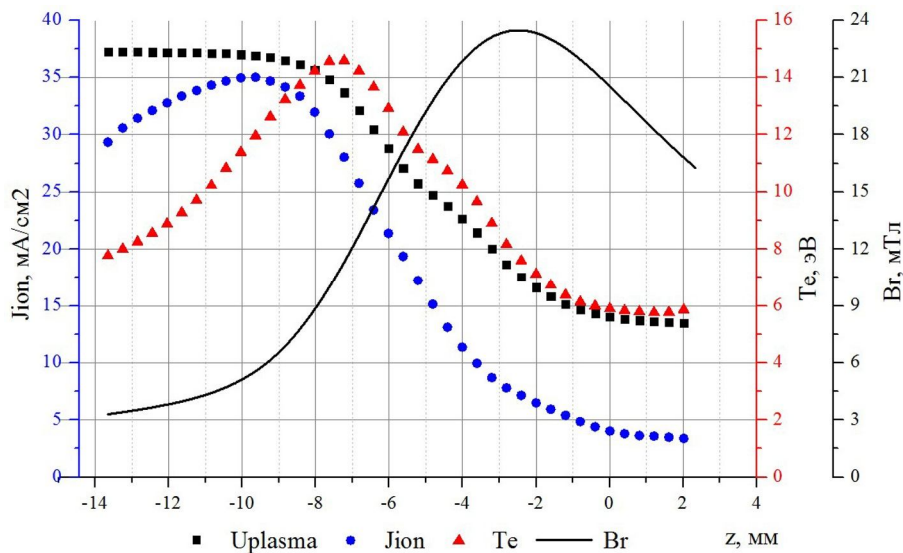


Рис. 3. Распределение параметров плазмы и магнитного поля вдоль внутренней стенки ГРК: $z = 0$ мм соответствует плоскости выхода из ГРК, расположение анода двигателя – $z = -28$ мм

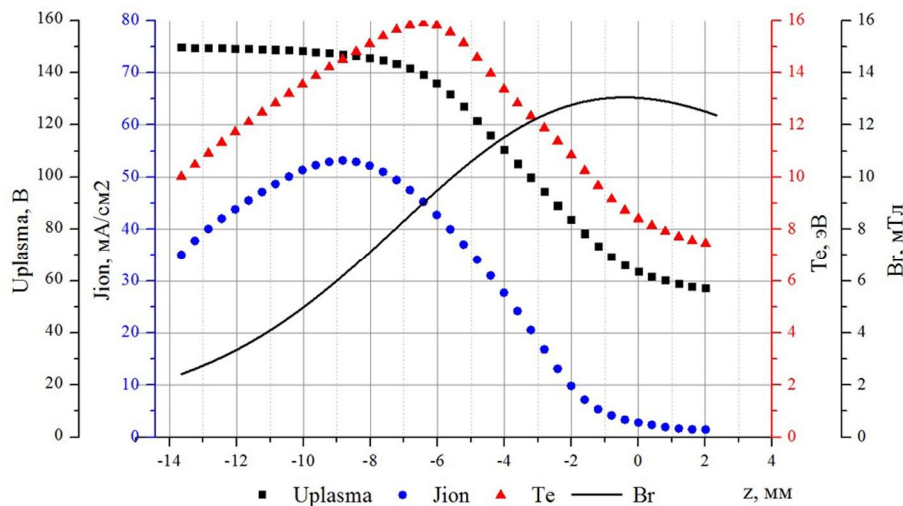


Рис. 4. Распределение параметров плазмы и магнитного поля вдоль срединной линии ГРК

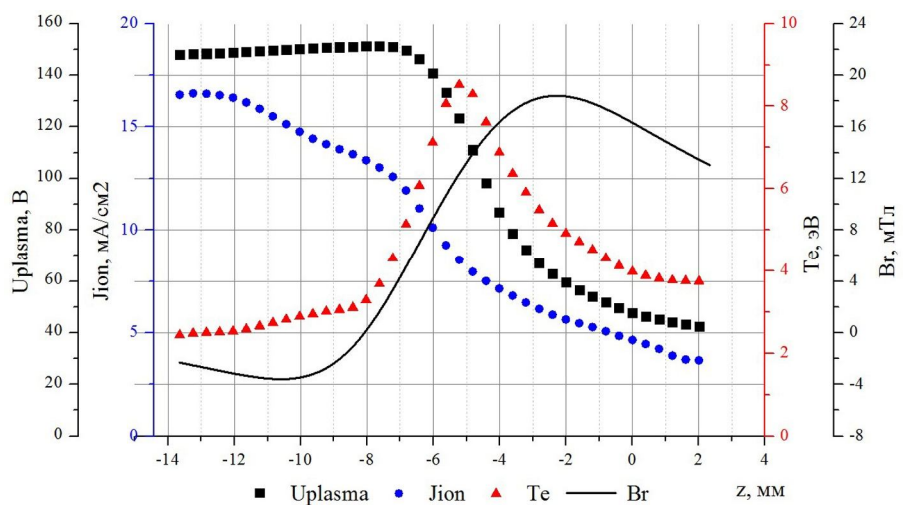


Рис. 5. Распределение параметров плазмы и магнитного поля вдоль наружной стенки ГРК

3. На длине канала от начала ЗУ до положения $V_{r_{max}}$ «срабатывает» $\approx 70\%$ от всего ускоряющего напряжения вдоль внутренней стенки и срединной линии канала, и $\approx 55\%$ вдоль наружной стенки. Ускоряющее напряжение определялось как разность между U_d и значением U_{plasma} в сечении $z = 2$ мм.

2. Уменьшение тока внутренней катушки

Параметры плазмы в ГРК измерялись на режимах с уменьшенным током внутренней катушки с шагом 20% от оптимального значения до полного выключения тока через катушку.

На рисунках 6 – 8 представлены распределения потенциала плазмы, измеренные при различных токах через внутреннюю катушку с наложенным профилем СМЛ.

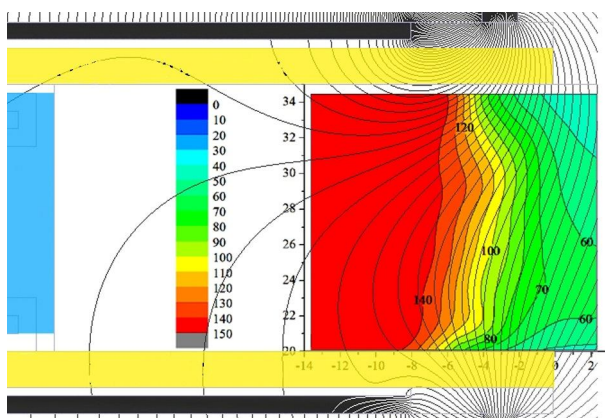


Рис. 6. Распределение U_{plasma} и профиль СМЛ при оптимальном токе

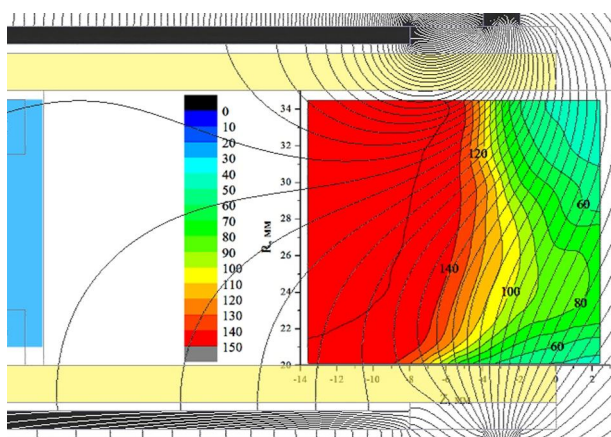


Рис. 7. Распределение U_{plasma} и профиль СМЛ при 60% от I_{nom}

По приведенным выше распределениям U_{plasma} наблюдаются следующие изменения при уменьшении тока внутренней катушки:

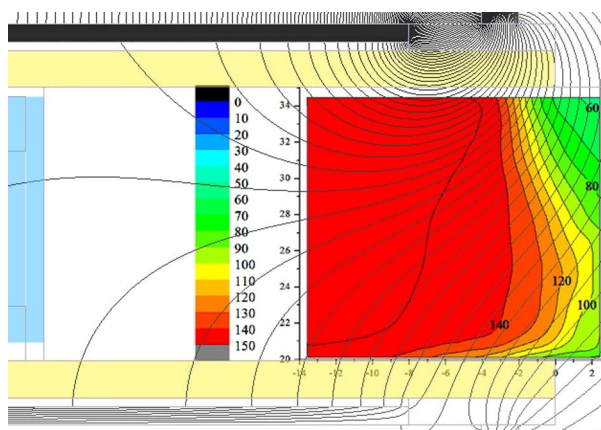


Рис. 8. Распределение U_{plasma} и профиль СМЛ при выключенном токе

- смещение ЗУ по потоку газа по всей ширине канала. При номинальном токе катушки (см. рис. 6) эквипотенциальные линии имеют наклон к внутренней стенке ГРК. При уменьшении тока, смещение ЗУ вдоль внутренней стенки происходит с опережением смещения ЗУ вдоль наружной стенки, и, таким образом, наклон эквипотенциальных линий меняется в обратную сторону – к наружной стенке канала (см. рис. 8);

- расширение ЗУ и уменьшение ускоряющего напряжения в ГРК. В большей степени проявляется вдоль внутренней стенки, в меньшей вдоль срединной линии и практически не проявляется вдоль наружной стенки;

- аналогично режиму работы двигателя с оптимальным магнитным полем в ГРК, на режимах с уменьшенным током через внутреннюю катушку наблюдается отклонение эквипотенциальных линий от СМЛ во всей области измерений.

На рисунках 9 - 11 приведены распределения T_e рассчитанные для режимов с различными токами внутренней катушки.

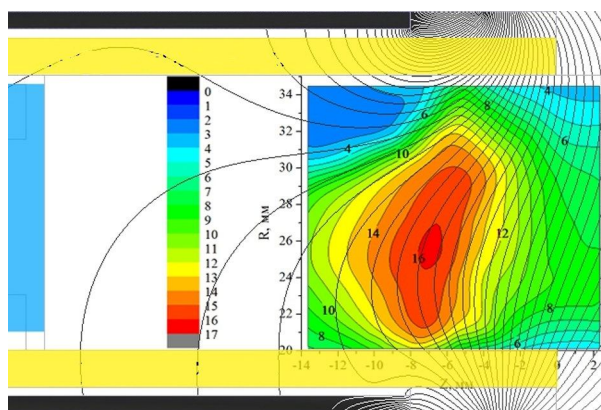


Рис. 9. Распределение T_e и профиль СМЛ при оптимальном токе

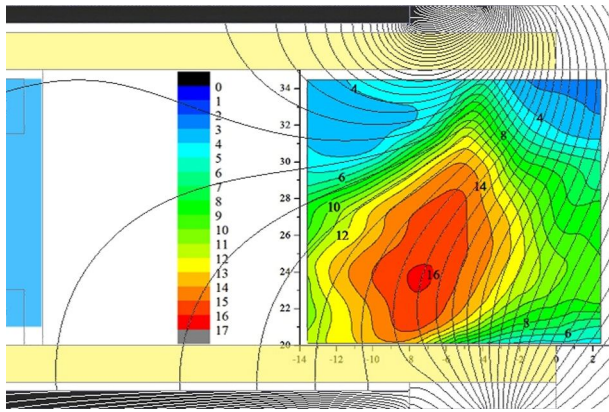


Рис. 10. Распределение T_e и профиль СМЛ при 60% от I_{nom}

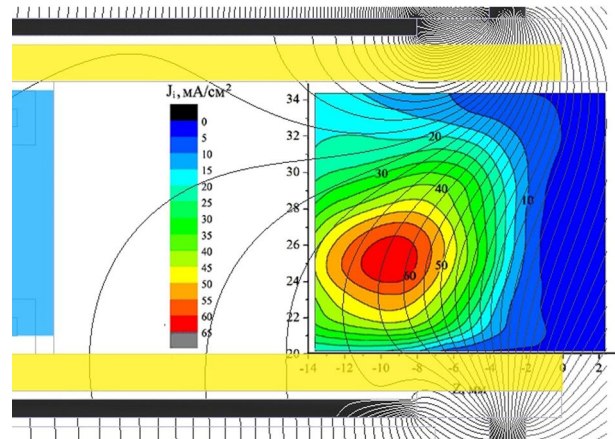


Рис. 12. Распределение J_{ion} и профиля СМЛ при оптимальном токе

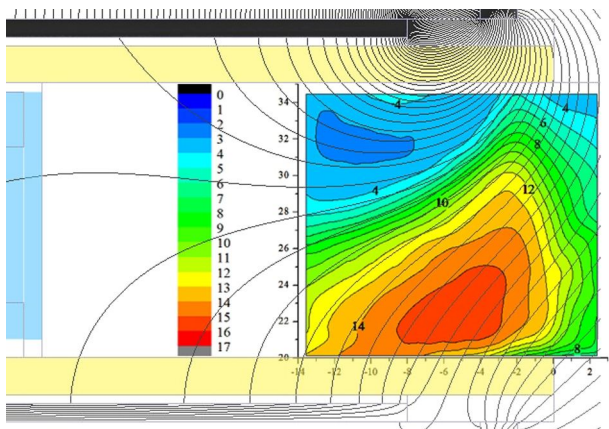


Рис. 11. Распределение T_e и профиль СМЛ на режиме с выключенной внутренней катушкой

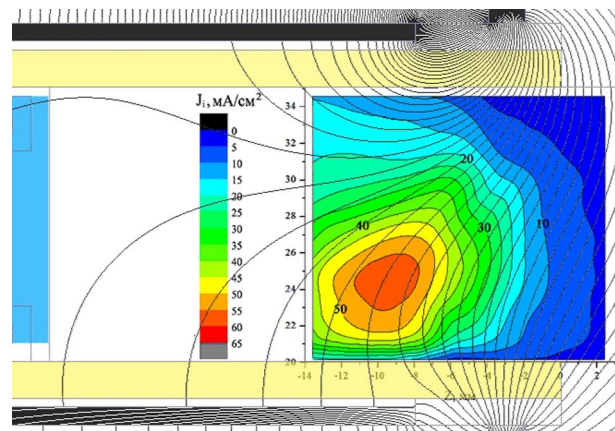


Рис. 13. Распределение J_{ion} и профиль СМЛ при 60% от I_{nom}

На приведенных выше распределениях T_e наблюдается совпадение СМЛ с линиями, вдоль которых $T_e = const$. Однако, совпадение имеет место только со стороны анода до координаты z , в которой T_e принимает максимальное значение. При уменьшении тока через внутреннюю катушку наклон линий $T_e = const$ уменьшается одновременно с наклоном СМЛ. Со стороны выходного сечения двигателя, совпадение линий не наблюдается. С уменьшением тока катушки величина T_e изменяется в меньшую сторону не более чем на 2 эВ.

На рисунках 12 – 14 представлены распределения плотности ионного тока. При уменьшении тока внутренней катушки величина плотности ионного тока уменьшается, а область с максимальными значениями J_{ion} вытягивается вдоль СМЛ.

Выводы

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

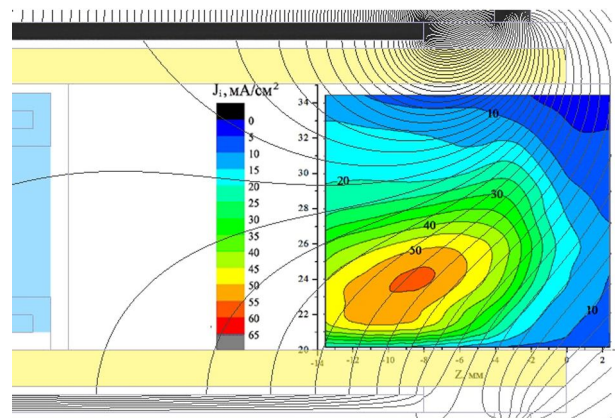


Рис. 14. Распределение J_{ion} и профиль СМЛ на режиме с выключенной внутренней катушкой

1) Широко используемая при проектировании магнитной системы СПД гипотеза о «термализированном» потенциале не выполняется - эквипотенциальные линии не совпадают с силовыми магнитными линиями.

2) Величина магнитного поля и его распре-

ление имеют существенное влияние на распределение параметров плазмы в газоразрядной камере СПД.

Литература

1. Горшков, О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда ; под ред. академика РАН А. С. Коротеева. – М. : Машиностроение, 2008. – 280 с.

2. Hofer, R. R. The role of magnetic field topography in improving the performance of high-voltage hall thrusters [Text] / R. R. Hofer, A. D. Gallimore // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 2002. – AIAA 2002-4111. – С. 1-19. Режим доступа: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/76735/AIAA-2002-4111-487.pdf?sequence=1>. – 10.05.2016.

3. Митрофанова, О. А. Влияние величины и топологии магнитного поля на интегральные характеристики стационарных плазменных двигателей [Тест] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 : защищена 16.11.2015 / Митрофанова Ольга Александровна. – Калининград, 2015. – 147 с.

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

5. 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.

6. 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.

7. Морозов, А. И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков в ЭРД [Текст] / А. И. Морозов. – М. : Атомиздат, 1978. – 326 с.

8. 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.

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

References

1. Gorshkov, O. A., Muravlev, V. A., Shagajda, A. A. Khollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov [*Hall and Ion Electric Propulsion for spacecraft*]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 280 p. (In Russian)

2. Hofer, R. R., Gallimore, A. D. The role of magnetic field topography in improving the performance of high-voltage hall thrusters. *Proceedings of 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2002, Indianapolis, Indiana, USA, pp. 1-19, DOI : 10.2514/6.2002-4111.

3. Mitrofanova O. A. *Vlijanie velichiny i topologii magnitnogo polja na integral'nye harakteristiki stacionarnykh plazmennykh dvigatelej*. Diss. kand. tekhn. nauk [Magnetic field magnitude and topology influence on integral characteristics of stationary plasma thruster. PhD thesis]. Kaliningrad, 2015. 147 p.

4. Alekseev, B. V., Kotel'nikov, V. A. *Zondovyy metod diagnostiki plazmy* [Probe method of plasma diagnostics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 239 p.

5. Titov, M. Yu. Eksperimental'nyi stend i oborudovanie dlya issledovaniya parametrov plazmy v kanale stacionarnogo plazmennogo dvigatelya [Experimental stand and equipment for investigation of plasma parameters inside SPT channel]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 7(124), pp. 121-125. (In Russian).

6. Titov, M. Yu., Loyan A. V. Izmerenie zondovykh kharakteristik v razryadnom kanale stacionarnogo plazmennogo dvigatelya [Measurements of probe characteristics in the discharge channel of stationary plasma thruster]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 8(125), pp. 82-88. (In Russian).

7. Morozov, A. I. *Fizicheskie osnovy kosmicheskikh jelektroreaktivnykh dvigatelej. T. 1. Jelementy dinamiki potokov v JeRD* [Basic physics of space electric propulsion. V. 1. Elements of flow dynamics in electric propulsion]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978. 326 p.

8. Bishaev, A. M., Kim, V. Issledovanie lokal'nykh parametrov plazmy v uskoritele s zamknutym dreifom elektronov i protyazhennoi zonoj uskoreniya [Investigation of local plasma parameters in a thruster with closed electron drift and extended acceleration zone]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1978, vol. 48, no. 9, pp. 1853–1857.

9. Arhipov, A. S., Kim, V. P., Sidorenko, E. K. *Stacionarnye plazmennye dvigateli Morozova* [Morozov stationary plasma thruster]. Moscow, MAI Publ., 2012, 290 p.

Поступила в редакцию 10.05.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сысоев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**КОРЕЛЯЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ З МАГНІТНИМ ПОЛЕМ У КАНАЛІ
СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА***М. Ю. Тітов, А. В. Лоян, Н. Б. Чуприна*

У роботі представлені результати вимірювань локальних параметрів плазми в газорозрядному каналі стаціонарного плазмового двигуна типу М70 при різних токах через внутрішню котушку магнітної системи. Проведено порівняння розподілів параметрів плазми і магнітного поля в каналі двигуна. Параметри плазми вимірювалися за допомогою емісійного зонда, магнітне поле розраховувалося в пакеті Ansoft Maxwell. Виявлені відхилення еквіпотенційних ліній від силових ліній магнітного поля і, разом з тим, суттєвий зв'язок між параметрами плазми і магнітним полем в газорозрядному каналі двигуна.

Ключові слова: плазмовий двигун, потенціал плазми, магнітне поле.

**CORRELATION OF PLASMA PARAMETERS WITH MAGNETIC FIELD
IN THE CHANNEL OF STATIONARY PLASMA THRUSTER***M. Yu. Titov, A. V. Loyan, N. B. Chuprina*

Paper presents results of measurements of local plasma parameters in the gas discharge channel of the stationary plasma thruster M70 type at various currents through the inner coil of magnetic system. A comparison of the plasma parameters and distribution of the magnetic field in the thruster channel is done. Plasma parameters were measured using emission probe, the magnetic field was calculated in Ansoft Maxwell package. Deviations of equipotential lines from magnetic field lines and, at the same time, a significant relationship between plasma parameters and magnetic field in a discharge channel are observed.

Keywords: plasma thruster, plasma potential, magnetic field.

Тітов Максим Юрьевич – аспірант каф. 402 Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: titov@khai.edu.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402 Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Чуприна Наталья Борисовна – інженер каф. 402 Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: veraurum@gmail.com.

Titov Maksym Yurevich – PhD student, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: titov@khai.edu.

Loyan Andriy Vitalevich – Candidate of Technical Science, senior staff scientist, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Chupryna Natalia Borisovna – engineer, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: veraurum@gmail.com.