

Научная статья  
УДК 533.932:021.3.049.77  
doi: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-132-143

## Зондовая диагностика физических процессов

### в магнитодинамической плазме

*Ю. В. Кубарев<sup>1</sup>, В. А. Котельников<sup>2</sup>, М. В. Котельников<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Академия инженерных наук им. А. М. Прохорова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

*mvk\_home@mail.ru*

**Аннотация.** Плазменные потоки, истекающие из космических двигателей, взаимодействуют с другими системами жизнеобеспечения космических станций, в частности с солнечными батареями. Магнитоплазмодинамический двигатель является источником разреженной низкотемпературной плазмы и может применяться в производстве полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и в других областях. Оптимизация такого источника плазмы предполагает использование электрических зондов для диагностики плазменных образований. В работе представлены результаты исследований, выполненных на основе натурных и вычислительных экспериментов. Представлены оригинальные методики обработки зондовых экспериментов в плазменных потоках, включая применение плоских и цилиндрических ориентированных зондов, а также нестационарных зондов, что позволяет расширить возможности зондового метода диагностики плазмы. Рассмотрены вопросы оптимизации зондовых измерительных схем. Приведены результаты зондовых измерений в струях с помощью плоских и

цилиндрических ориентированных зондов как в стендовых условиях, так и в условиях ионосферы Земли, позволяющие оптимизировать режимы работы магнитоплазодинамического двигателя и расширить области его применения в современных наукоемких технологиях, в полупроводниковой микроэлектронике. Полученные результаты имеют большое значение для плазодинамических технологий в микроэлектронике и для радиосвязи с космическими аппаратами на плазодинамических двигателях.

**Ключевые слова:** разреженная плазма, магнитоплазодинамический двигатель, зондовая диагностика, плоские и цилиндрические ориентированные зонды, нестационарный зонд, плазменные технологии, микроэлектроника

**Финансирование работы:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № ...).

**Благодарности:** работа выполнена с использованием оборудования и при содействии специалистов Центра...

**Для цитирования:** Кубарев Ю. В., Котельников В. А., Котельников М. В. Зондовая диагностика физических процессов в магнитодинамической плазме // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 132–143.

<https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-2-132-143>

## Original article

### Probe diagnostics of physical processes in magneto-dynamic plasma

*Yu. V. Kubarev<sup>1</sup>, V. A. Kotelnikov<sup>2</sup>, M. V. Kotelnikov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Prokhorov Academy of Engineering Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

*mvk\_home@mail.ru*

**Abstract.** Plasma streams flowing from space engines interact with other life-support systems of space stations, in particular with solar panels. The magnetoplasmadynamic engine is a source of rarefied low-temperature plasma and can be used in production of semiconductor devices, integrated circuits and in a number of other areas. The optimization of such a plasma source involves the use of electric probes for diagnosis of plasma formations. In this work, the results obtained in studies carried out based on full-scale and computational experiments are presented. The original methods for processing the probe experiments in plasma flows, including the use of flat and cylindrical oriented probes as well as the non-stationary probes, which allows expanding the capabilities of the probe method for plasma diagnostics, have been presented. The optimization of the probe measurement schemes is discussed. The results of probe measurements in jets using flat and cylindrical oriented probes, both in the bench conditions and in conditions of the Earth ionosphere, are presented, making it possible to optimize the operating practices of magnetoplasmadynamic engine and to extend its application range in modern knowledge intensive technologies, in semiconductor microelectronics. The results obtained are important for plasmadynamic

technologies in microelectronics and for radio communication with spacecraft powered by plasmadynamic engines.

**Keywords:** rarefied plasma, magnetoplasmadynamic engine, probe diagnostics, flat and cylindrical oriented probes, non-stationary probe, plasma technologies, microelectronics

**Funding:** the work has been supported by the Russian Science Foundation (project No. ...).

**Acknowledgments:** the work has been carried out using equipment and with the assistance of specialists from Center...

**For citation:** Kubarev Yu. V., Kotelnikov V. A., Kotelnikov M. V. Probe diagnostics of physical processes in magneto-dynamic plasma. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 132–143. [https://coi.org/10.24151/1561-5405-](https://coi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-2-132-143)

2021-26-2-132-143

## ТЕКСТ СТАТЬИ

Статья должна быть обязательно разделена на смысловые части.

Обязательные:

**Введение**

**Методы исследования**

**Результаты исследования**

**Заключение**

Возможные:

Актуальность  
Постановка проблемы  
Обзор литературы  
База исследования  
Методология исследования  
Теоретические основания исследования  
Организация исследования  
Результаты и их обсуждение  
Результаты и дискуссия  
Анализ результатов исследования  
Выводы  
(и другие)

### *Литература*

1. **Кубарев Ю. В.** Закономерность возникновения электростатической неустойчивости плазмы, движущейся в неоднородных электрических и магнитных полях. Открытие № 14 // Бюл. ВАК РФ. 1995. № 6.
2. **Кубарев Ю. В., Котельников В. А., Котельников М. В.** Зондовый метод диагностики нестационарной плазмы // Изв. вузов. Электроника. 1997. № 1. С. 103–106.
3. **Кубарев Ю. В.** Полет на Марс, электрореактивные двигатели настоящего и будущего // Наука и технология в промышленности. 2006. № 2. С. 19–35.
4. **Кубарев Ю. В.** Источник газоразрядной плазмы // А. с. СССР № 166974. 1964. Бюл. № 24.
5. **Кубарев Ю. В., Соловьев Е. Г., Черник В. Н., Ташаев Ю. Н.** Ускоритель плазмы // А. с. СССР № 1210604. 1984. Бюл. № 1.

6. **Кубарев Ю. В., Черник В. Н.** Магнитоплазодинамический ускоритель, его применение в наземных и космических условиях. Ч. 1: Применение МПД-ускорителя для наземных испытаний материалов наружных поверхностей космических аппаратов // Наука и технологии в промышленности. 2008. № 4. С. 7–18.

7. **Кубарев Ю. В., Коршаковский С. И., Черник В. Н.**

Магнитоплазодинамический ускоритель, его применение в наземных и космических условиях. Ч. 2: Применение МПДУ для разработки систем плазменной нейтрализации электростатических зарядов космических аппаратов // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 1. С. 12–26.

8. **Чан П., Тэлбот Л., Турян К. И.** Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме: Теория и применение. М.: Мир, 1978. 202 с.

9. **Алексеев Б. В., Котельников В. А.** Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 239 с.

10. **Котельников В. А., Котельников М. В.** Зондовая диагностика плазменных потоков. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2016. 440 с.

11. **Котельников М. В., Котельников В. А.** Вольт-амперные характеристики плоского зонда в потоке разреженной плазмы // Теплофизика высших температур. 2016. Т. 54. № 1. С. 23–28.

12. Определение плотности плазмы по данным ионного тока на цилиндрический и плоский зонд / **Д. Г. Волошин, А. Н. Васильева, А. С. Ковалев и др.** // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 12. С. 1099–1108.

13. **Котельников М. В., Котельников В. А.** Использование формулы Бома и ее аналогов в зондовой диагностике // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 4. С. 493–497.
14. **Игнахин В. С., Сысун В. И.** Моделирование ионного тока на зонд в плазме с учетом ионизации и столкновений с атомами. Ч. 2: Цилиндрический зонд // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 10. С. 812–819.
15. **Котельников В. А., Морозов А. В., Котельников М. В.** Математическое моделирование взаимодействия потока разреженной плазмы с магнитным полем. М.: Изд-во МАИ, 2015. 167 с.
16. **Кубарев Ю. В., Котельников В. А.** Низкочастотные резонансные электрические колебания в потоке неизотермической плазмы // ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 11. С. 69–70.
17. **Котельников М. В.** Плоский электрический зонд: теория и приложения. М.: Изд-во МАИ, 2015. 212 с.
18. **Kubarev J. V., Kotelnikov V. A., Thasovitin J. K.** Mass-spectrometer probe measurements of characteristics of the magnetoplasmodynamics source operating in the upper atmosphere // XVI Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Dusseldorf, 1983. P. 440–441.
19. **Кубарев Ю. В., Котельников В. А., Часовитин Ю. Г.** Измерения концентрации заряженных частиц в эксперименте «Куст» // Тезисы докладов IV Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М., 1978. С. 388–391.

### ***Информация об авторах***

***Кубарев Юрий Васильевич*** – доктор технических наук, профессор, вице-президент Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова (Россия, 123557, г. Москва, Пресненский вал, 19), kubarev.mguri@ya.ru

***Котельников Вадим Алексеевич*** – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной математики и программирования Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), mvk\_home@mail.ru

***Котельников Михаил Вадимович*** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и программирования Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), mvk\_home@mail.ru

### ***References***

1. Kubarev Yu. V. Regularity of the occurrence of electrostatic instability of plasma moving in inhomogeneous electric and magnetic fields. *Discovery* No. 14. *Bullet. HAC of the Russian Federation*. Moscow, 1995. (In Russian).
2. Kubarev Yu. V., Kotelnikov V. A., Kotelnikov M. V. Probe method of diagnostics of unsteady plasma. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 1997, no. 1, pp. 103–106. (In Russian).
3. Kubarev Yu. V. Mission to Mars, electric propulsion systems present and future. *Nauka i tekhnologiya v promyshlennosti = Science and Technology in Industry*, 2006, no. 2, pp. 19–35. (In Russian).



4. Kubarev Yu. V. *Source of gas-discharge plasma*. Copyright certificate of the USSR, no. 166974. 1964. (In Russian).
5. Kubarev Yu. V., Solovyov E. G., Chernik V. N., Tashaev Yu. N. *The plasma accelerator*. Copyright certificate of the USSR no. 1210604. 1984. (In Russian).
6. Kubarev Yu. V., Chernik V. N. Magnetoplasmodynamic accelerator, its application in ground and space conditions. Part 1. Application of the MPD accelerator for ground testing of materials of outer surfaces of spacecraft. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti = Science and Technology in Industry*, 2008, no. 4, pp. 7–18. (In Russian).
7. Kubarev Yu. V., Korshakovskiy S. I., Chernik V. N. Magnetoplasmodynamic accelerator, its application in ground and space conditions. Part 2. Application of MPDU for the development of systems for plasma neutralization of electrostatic charges of spacecraft. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti = Science and Technology in Industry*, 2009, no. 1, pp. 12–26. (In Russian).
8. Chung P. M., Talbot L., Touryan K. J. *Electric probes in stationary and flowing plasmas: theory and application*. New York, Springer, 1975. xvi, 150 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-65888-4>
9. Alekseev B. V., Kotelnikov V. A. *Probe method of plasma diagnostics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 239 p. (In Russian).
10. Kotelnikov V. A., Kotelnikov M. V. *Probe diagnostics of plasma flows*. Moscow, Izhevsk, Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., 2016. 440 p. (In Russian).

11. Kotelnikov M. V., Kotelnikov V. A. Volt-ampere characteristics of a flat probe in a rarefied plasma flow. *Teplofizika vysokikh temperatur = Thermophysics of High Temperatures*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 23–28. (In Russian).
12. Voloshin D. G., Vasilyeva A. N., Kovalev A. S., Mankelevich Yu. A., Rakhimova T. V. Determination of plasma density from ion current data on a cylindrical and flat probe. *Fizika plazmy = Plasma Physics*, 2016, vol. 42, no. 12, pp. 1099–1108. (In Russian).
13. Kotelnikov M. V., Kotelnikov V. A. The use of the Bohm formula and its analogues in probe diagnostics. *Teplofizika vysokikh temperatur = Thermophysics of High Temperatures*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 493–497. (In Russian).
14. Ignakhin V. S., Sysun V. I. Modeling of ion current on a probe in plasma taking into account ionization and collisions with atoms. Part 2. Cylindrical probe. *Fizika plazmy = Plasma Physics*, 2018, vol. 44, no. 10, pp. 812–819. (In Russian).
15. Kotelnikov V. A., Morozov A. V., Kotelnikov M. V. *Mathematical modeling of the interaction of a rarefied plasma flow with a magnetic field*. Moscow, MAI Publ., 2015. 167 p. (In Russian).
16. Kubarev Yu. V., Kotelnikov V. A. Low-frequency resonant electric oscillations in a non-isothermal plasma flow. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*, 1968, vol. 38, iss. 11, pp. 69–70. (In Russian).
17. Kotelnikov M. V. *Flat electric probe: Theory and applications*. Moscow, MAI Publ., 2015, 212 p. (In Russian).

18. Kubarev J. V., Kotelnikov V. A., Thasovitin J. K. Mass-spectrometer probe measurements of characteristics of the magnetoplasmodynamics source operating in the upper atmosphere. *XVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases*. Dusseldorf, 1983, pp. 440–441.

19. Kubarev Yu. V., Kotelnikov V. A., Chasovitin Yu. G. Measurements of the concentration of charged particles in the experiment “Kust”. *Theses of the reports of the IV All-Soviet Conference on Plasma Accelerators and Ion Injectors*. Moscow, 1978, pp. 388–391. (In Russian).

### ***Information about the authors***

***Yuri V. Kubarev*** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice President of Prokhorov Academy of Engineering Sciences (Russia, 123557, Moscow, Presnensky val, 19),  
kubarev.mgupi@ya.ru

***Vadim A. Kotelnikov*** – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Computational Mathematics and Programming Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk Highway, 4),  
mvk\_home@mail.ru

***Mikhail V. Kotelnikov*** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Computational Mathematics and Programming Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk Highway, 4),  
mvk\_home@mail.ru