

## РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ПОТОКА КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ С ЧЕТЫРЕХСЕКЦИОННЫМ КОЛЛЕКТОРОМ

Н. И. МУХУРОВ<sup>1</sup>, Н. Л. БОРОДКОВА<sup>2</sup>, И. В. ГАСЕНКОВА<sup>1</sup>, И. М. АНДРУХОВИЧ<sup>1</sup>,  
Г. Н. ЗАСТЕНКЕР<sup>2</sup>, О. В. САПУНОВА<sup>2</sup>, В. И. КОСТЕНКО<sup>2</sup>,  
Б. Т. КАРИМОВ<sup>3</sup>, Е. В. РЫЖОВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“, 220072, Минск, Беларусь  
E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by

<sup>2</sup>Институт космических исследований Российской академии наук, 117997, Москва, Россия

<sup>3</sup>Специальное конструкторское бюро космического приборостроения Института космических исследований  
Российской академии наук, 249101, Калужская область, Таруса, Россия

<sup>4</sup>„НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“,  
141091, Московская область, г. Королев, Россия

Рассмотрены особенности разработки, создания и проведения испытаний экспериментального образца датчика потока космической плазмы, использующего прецизионные селективирующие элементы из наноструктурированных материалов и четырехсекционный коллектор. Приведены конструктивные особенности исполнения экспериментального образца датчика потока плазмы на основе цилиндра Фарадея. Представлены результаты комплексных испытаний физического функционирования экспериментального образца датчика потока космической плазмы и его селективирующих элементов, выполнено сравнение расчетных характеристик датчика с результатами экспериментальных исследований. Сравнение показало, что запирающие характеристики четырехколлекторного образца датчика ДП-10-34-4К при нормальном и наклонном падении потока ионов на входное окно датчика хорошо совпадают с расчетными и возможно надежно измерять переносную скорость потока и его температуру в изотропном приближении. Угловые характеристики четырех коллекторов датчика достаточно симметричны, совпадают с расчетными, что позволяет с помощью одного датчика определять величину и направление потока ионов, тем самым уменьшая массу прибора, в который будет встраиваться датчик.

**Ключевые слова:** космический эксперимент, солнечный ветер, датчик потока плазмы, цилиндр Фарадея, прецизионные селективирующие элементы, фотоэлектрические, угловые и запирающие характеристики

**Введение.** Одна из серьезных угроз последних десятилетий для современных технических устройств и биологических объектов — солнечная активность и ее проявления в виде усиленных потоков жесткого электромагнитного и корпускулярного излучения, которые рассматриваются как основной источник космической погоды [1—3]. Ярким примером негативного воздействия возмущений космической погоды на технические системы может служить магнитная буря 28 октября 2003 г., которая полностью прервала радиосвязь в Швеции, вывела из строя два японских спутника, нарушила радиосвязь и радионавигацию воздушного и морского транспорта, вывела из строя прибор для измерения радиации на орбитальной станции космического корабля НАСА „Марс Одиссей“ [4].

Одной из проблем, возникающих при предсказании космической погоды, являются непредсказуемые вариации параметров солнечного ветра, магнитослоя и самой магнитосферы [5—9].

Для учета негативного влияния космической погоды и его уменьшения необходимо создавать средства мониторинга космической погоды. Одним из ключевых параметров для прогнозирования космической погоды является концентрация ионов солнечного ветра. Датчики,

конструируемые на основе цилиндров Фарадея, позволяют с высокой точностью определять концентрацию солнечного ветра и при этом отличаются простотой и надежностью.

Первые проведенные на космических аппаратах Луна-2, 3 [10] и Венера-1 [10] эксперименты, подтвердившие, что межпланетное пространство заполнено плазмой, содержали ловушки на основе цилиндров Фарадея. В настоящее время успешно функционируют установленный на борту спутника СПЕКТР-Р [12, 13] российский прибор БМСВ, имеющий в качестве датчиков цилиндры Фарадея, и зарубежные аналоги на спутниках WIND (запущен в 1994 г. [14]) и Вояджер-2 (запущен 40 лет назад [15]).

Приборы, конструируемые на основе цилиндра Фарадея, разрабатываются и для будущих проектов. Анализатор плазмы SPC на базе цилиндра Фарадея разработан и изготовлен для проекта Parker Solar Probe [16]. Таким образом, к преимуществам датчиков на основе цилиндра Фарадея относятся простота, высокая степень надежности, весьма долгий срок службы, возможность измерения полного потока частиц в довольно широком угловом окне и возможность достижения весьма высокого временного разрешения. Такое устройство может быть использовано для мониторинга параметров плазмы солнечного ветра в целях прогнозирования космической погоды.

**Конструктивное исполнение экспериментального образца датчика потока космической плазмы на основе цилиндра Фарадея.** Достаточно полно особенности функционирования датчика на основе цилиндра Фарадея описываются в работе [17]. Особенности конструктивно-технологического исполнения датчика и основных элементов, определяющих его характеристики — селективирующих элементов, представлены в работе [18]. В статьях [19, 20] рассмотрен технологический процесс формирования селективирующих элементов и диафрагм в виде прецизионных сеток с элементами крепления к корпусу, а также сравниваются различные варианты технологических режимов формирования прецизионных деталей.

Обобщенная конструкция экспериментального образца датчика потока космической плазмы ДП-10-34-4К представлена на рис. 1 (а — схематическое изображение конструкции экспериментального образца, б — фотографии чувствительных элементов — сеточных структур, в — фотография датчика потока ионов космической плазмы и 4-секционного коллектора; 1 — корпус, 2 — входное окно, 3 — внешняя диафрагма, 4 — управляющий элемент, 5 — супрессорный элемент, 6 — внутренняя диафрагма, 7 — четыре секции коллекторов, 8 — технологическая пылевлагозащитная крышка, 9 — контакты коллекторов в виде штырей, 10 и 11 — выводы для подключения высокого напряжения). Датчик состоит из корпуса, имеющего входное окно, закрытое внешней диафрагмой С3, управляющих сеток С4 и С5, внутренней диафрагмы С6 и коллектора, разделенного на четыре равных сектора, каждый из которых имеет свой отдельный вывод К1, К2, К3 и К4.

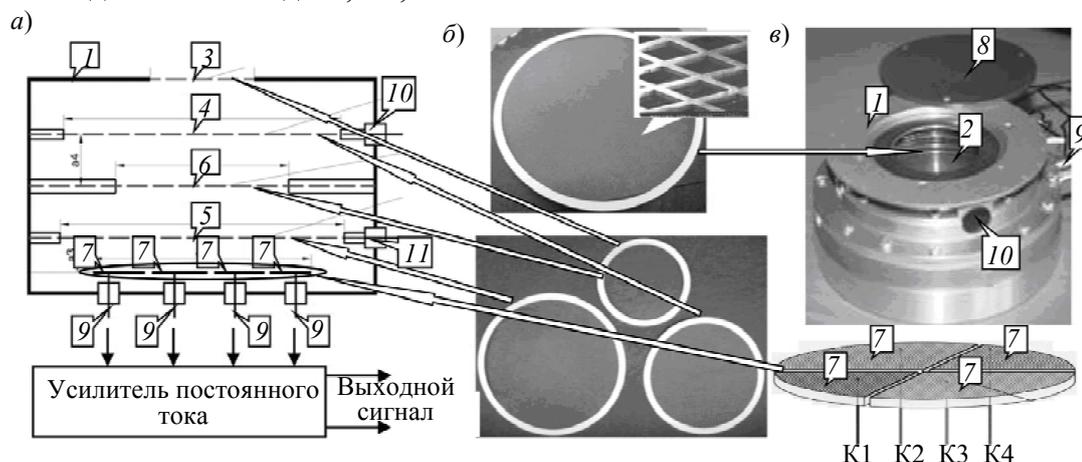


Рис. 1

На супрессорную сетку С5 подается отрицательное относительно корпуса напряжение порядка 500 В для отсечки электронов солнечного ветра и возвращения на коллектор фотоэлектронов и вторичных электронов, выбиваемых из коллектора фотонами УФ-излучения Солнца и ударами ионов солнечного ветра. Сетки С3, С6 соединены с корпусом датчика. Управляющая сетка С4 служит для селекции потока ионов по величине их энергии, для чего на эту сетку подается фиксированное или переменное положительное относительно корпуса напряжение в пределах от нескольких десятков вольт до 4—5 кВ.

Селектирующие элементы представляют собой никелевые сеточные структуры с периферийным крепежным кольцом с внешними размерами от 30 до 100 мм при общей толщине от 10 до 20 мкм. При этом микронные размеры сеточной структуры (сечение 10—20 мкм<sup>2</sup>, расстояние между ячейками 1000 мкм) сочетаются с миллиметровой шириной интегрированного с сеткой внешнего крепежного кольца.

Особенность конструкции экспериментального образца датчика потока плазмы заключается в использовании инновационных селектирующих элементов с чистой и однородной поверхностью сеточного полотна. Такой подход обеспечивает высокую точность измерений составного коллектора, разделенного на четыре сектора, это дает возможность минимизировать массу прибора и в увеличенном до 4—5 кВ диапазоне значений высокого напряжения, подаваемого на управляющую сетку, что позволит получать сведения о содержании дважды ионизованных ионов гелия в солнечном ветре.

Возможность экспериментальных образцов селектирующих элементов противостоять типичным механическим и термоциклическим воздействиям, характерным для программы космического полета, определялась с помощью лабораторных испытаний. Селектирующие элементы нормально функционировали после механических воздействий и трех последовательных циклов испытаний на влияние изменения температуры от  $-50$  до  $+150$  °С и сохранили свои характеристики (целостность и форму ячеек, скрученность линейных составляющих ячеек и провисание сеточного полотна) [17, 18].

**Комплексные испытания физического функционирования экспериментального образца датчика потока космической плазмы ДП-10-34-4К.** Основными физическими особенностями датчика потока космической плазмы являются фотоэлектрические, запирающие и угловые характеристики.

Для определения фототоков коллекторов на образец датчика ДП-10-34-4К, помещенный в откачанную до давления  $6,3 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. вакуумную камеру, направлялся поток ультрафиолетового излучения при значениях напряжения, подаваемого на супрессорную сетку  $U_c$ , в диапазоне от  $-500$  до  $+500$  В. На рис. 2 приведены результаты измерения фототоков  $I$  четырехколлекторного датчика. Коэффициент подавления с помощью супрессорной сетки коллекторного фототока в этом датчике составляет не менее 50, что вполне приемлемо.

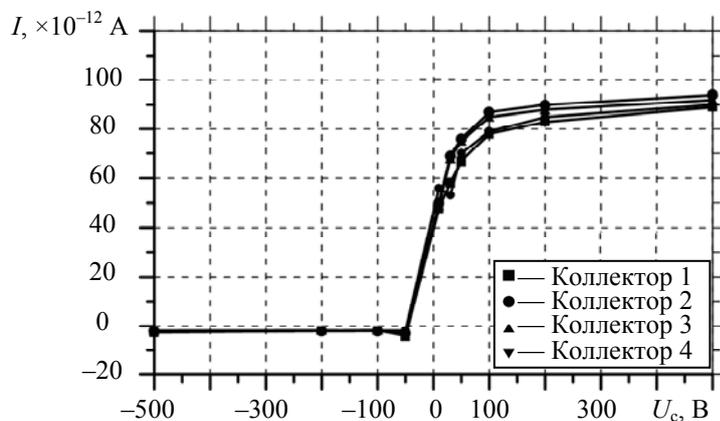


Рис. 2

Для определения запирающих характеристик на супрессорную сетку датчика подавалось электрическое напряжение  $U_c = -100$  В. С помощью источника ионов в камере создавался поток ионов с энергией 1,2 кэВ и с углом падения на входное окно датчика  $\alpha = 0-50^\circ$ . Путем изменения потенциала на управляющей сетке  $U_y$  от 0 до 1300 В снимались зависимости коллекторных токов. На рис. 3 приведена, для примера, зависимость коллекторных токов от напряжения на управляющей сетке при нормальном падении пучка ионов на входное окно датчика ( $\alpha=0$ ). Хорошо видно: когда запирающее напряжение достигает значения, близкого к энергии пучка ионов, коллекторный ток резко падает до нуля.

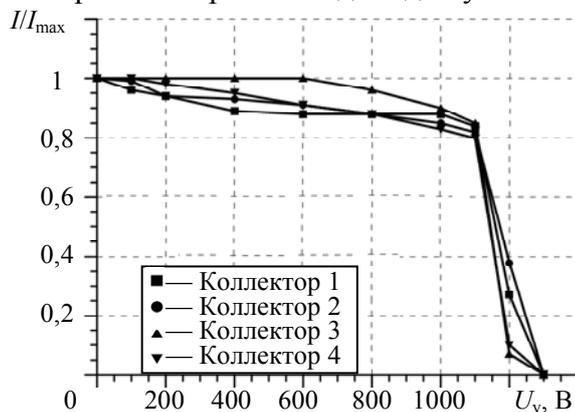


Рис. 3

Угловые характеристики четырехколлекторного датчика отражают возможность определения наклона пучка ионов по данным четырех коллекторов одного датчика.

Результаты измерения угловых характеристик токов четырех коллекторов в направлении вдоль (поперек) щели коллектора ( $\varphi=0(90^\circ)$ ) приведены на рис. 4 ( $U_c=-100$  В). Видно, что при повороте датчика угловые характеристики одной пары коллекторов имеют максимум при  $\theta \approx 15^\circ$ , при повороте в другую сторону другая пара коллекторов имеет максимум при  $\theta \approx 15^\circ$ . Таким образом, угол поворота пучка в плоскости, перпендикулярной щели, может быть определен по отношению четырех коллекторных токов.

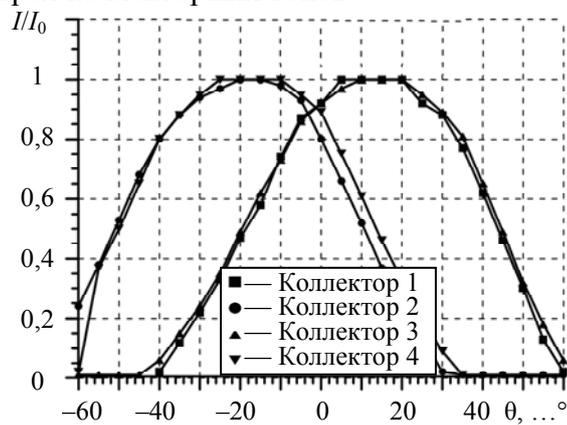


Рис. 4

Необходимо отметить, что коллекторные токи даже при нулевом угле падения оказываются несколько различными, их разность достигает 10—15 %. Это может быть связано либо с неточностью изготовления деталей конструкции, либо с пространственной неоднородностью пучка ионов.

**Сравнение измеренных характеристик экспериментального образца датчика потока космической плазмы с расчетными значениями.** В связи с тем, что на лабораторной установке сложно имитировать ненулевую ионную температуру потока солнечного ветра, измеренные характеристики датчика сравнивались с расчетными, полученными только для нулевой температуры пучка ионов.

На рис. 5 сравниваются измеренные угловые характеристики датчика ДП-10-34-4К — отношения токов коллекторов К4/К1, К3/К4, К2/К4 с аналогичными расчетными характеристиками, для  $\varphi=0$ , когда ось поворота датчика параллельна щели. Видно, что на всех графиках наклон кривых измеренных угловых характеристик соответствует наклону графиков расчетных угловых характеристик. Расчетные характеристики хорошо совпадают с измеренными величинами, несмотря на возможные неточности измерений. Удовлетворительное совпадение проведенных измерений и результатов расчета подтверждает возможность определения величины потока ионов и двух углов (полярного и азимутального), описывающих его направление.

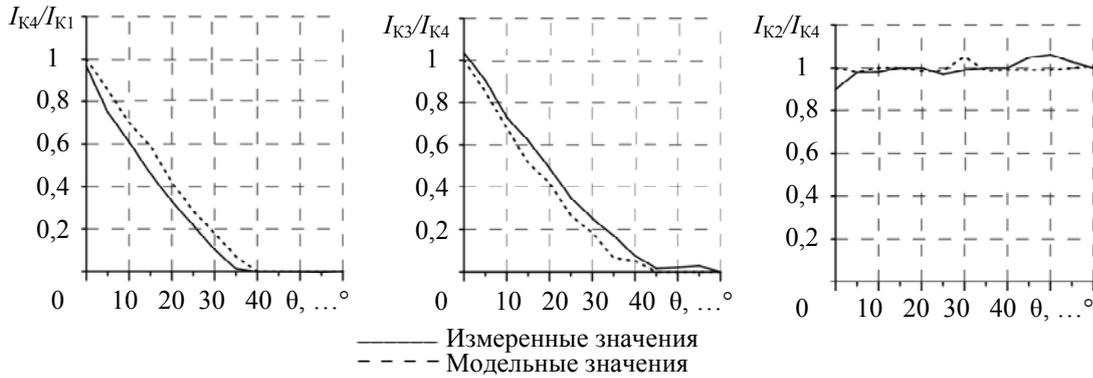


Рис. 5

На рис. 6 сравниваются измеренные запирающие характеристики датчика, полученные путем суммирования коллекторных токов, с рассчитанными характеристиками для  $\alpha=0$ . Запирающие характеристики датчика ДП-10-34-4К, как при нормальном падении потока ионов на входное окно датчика, так и при наклонном падении, хорошо совпадают с расчетными характеристиками, что позволяет определять переносную скорость потока ионов и оценивать ионную температуру в изотропном приближении.

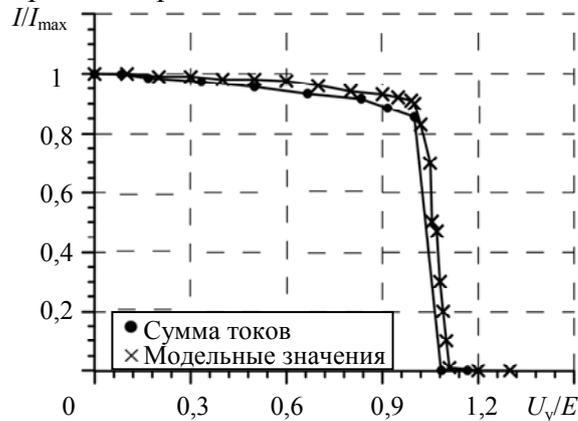


Рис. 6

**Заключение.** В работе представлены особенности конструкции и результаты испытаний экспериментального образца датчика потока космической плазмы ДП-10-34-4К. К особенностям конструкции образца датчика ДП-10-34-4К можно отнести чувствительные элементы из наноструктурированных материалов, четырехсекционный коллектор и увеличенный до 4—5 кВ диапазон значений напряжения, подаваемого на управляющую сетку.

Применение новых технологий в изготовлении селективирующих элементов обеспечивает чистую и однородную поверхность сеточного полотна, что увеличивает точность измерений. Разделение коллектора на четыре сектора позволяет определять с помощью одного датчика величину и два угла потока ионов солнечного ветра, что приводит к уменьшению массы прибора.

Увеличение до 4—5 кВ диапазона значений напряжения, подаваемого на управляющую сетку, позволяет получать сведения о содержании дважды ионизованных ионов гелия в солнечном ветре.

Проведенные испытания физического функционирования экспериментального образца датчика потока космической плазмы ДП-10-34-4К показали возможность надежного измерения переносной скорости потока, температуры, концентрации, величины и направления прихода потока ионов солнечного ветра с помощью одного датчика. Разработанный образец датчика ДП-10-34-4К может использоваться для мониторинга параметров плазмы солнечного ветра в целях прогнозирования космической погоды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс]: <<http://space-weather.ru/index.php?page=Space-Weather-what-is-it-en>>.
2. Петрукович А. А., Зеленый Л. М. Прогноз погоды XXI века: ожидаются магнитные облака и электронные осадки // Наука и жизнь. 2002. № 5. С. 2—8.
3. [Электронный ресурс]: <[http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR\\_2012\\_Gaydasch.pdf](http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Gaydasch.pdf)>.
4. [Электронный ресурс]: <<http://fotogl.com/content.php?r=42>>.
5. Фундаментальные космические исследования: в 2 кн. Кн. 2. Солнечная система / Под ред. Г. Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014. 456 с.
6. Сафаргалеев В. В. Возмущения магнитосферно-ионосферной системы в арктических широтах и задачи мониторинга космической погоды: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Апатиты, 2011. 29 с.
7. Webb D. F., Crooker N. U., Plunkett S. P., and St.Cyr O. C. SEPs: Space Weather Hazard in Interplanetary Space // Space Weather. Washington DC, American Geophysical Union, 2001. Vol. 125. P. 123—141.
8. Schwenn R. Space Weather: The Solar Perspective. Living Rev. // Solar Phys. 2006. Vol. 3. P. 2—72.
9. Застенкер Г. Н., Храпченков В. В., Колоскова И. В. и др. Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра // Космич. исслед. 2015. Т. 53, № 1. С. 63—74.
10. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д. и др. Изучение межпланетного ионизованного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете // Докл. АН СССР. 1960. Т. 131, вып. 6. С. 1302—1304.
11. Gringauz K. I. Some results of experiments in interplanetary space by means of charged particles traps on Soviet space probes // Space Research II. Amsterdam: North-Holland publ. Co., 1961. P. 539—553.
12. Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al. Fast Solar Wind Monitor (BMSW): Description and First Results // Space Sci. Rev. 2013. Vol. 175. P. 165—182.
13. Застенкер Г. Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. 2013. Т. 51, № 2. С. 88—99.
14. Ogilvie K. W., Chornay D. J., Fritzenreiter R. J. et al. SWE, a Comprehensive Plasma Instrument for the Wind Spacecraft // Space Science Reviews. 1995. Vol. 71, N 1/4. P. 41—54.
15. Bridge H. S., Belcher J. W., Butler R. J., Lazarus A. J. et al. The Plasma Experiment on the 1977 Voyager Mission // Space Sci. Rev. 1977. Vol. 21. P. 259—287.
16. Case A. W., Kasper J. C., Daigneau P. S., Caldwell D. et al. Designing a Sun-pointing Faraday cup for Solar Probe Plus. AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1539, is. 1. P. 458—461.
17. Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М., Застенкер Г. Н., Бородкова Н. Л., Костенко В. И., Каримов Б. Т. Датчики космической плазмы на основе цилиндра Фарадея // Приборы и методы измерений. 2017. № 8. С. 305—313.
18. Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М., Застенкер Г. Н., Бородкова Н. Л., Каримов Б. Т. Датчики потоков космической плазмы с прецизионными селективирующими элементами // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 12. С. 757—765.

19. Мухуров Н. И., Гасенкова И. В., Андрухович И. М. Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 1. С. 48—56.
20. Мухуров Н. И. Селектирующие элементы для нового поколения датчиков потоков плазмы // Наука и инновации. 2016. № 4. С. 27—29.

**Сведения об авторах**

- Николай Иванович Мухуров** — д-р техн. наук, профессор; ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“, лаборатория микро- и наносенсорики; заведующий лабораторией; E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by
- Наталья Львовна Бородкова** — канд. физ.-мат. наук; ИКИ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория изучения солнечного ветра; старший научный сотрудник; E-mail: nlbor@mail.ru
- Ирина Владимировна Гасенкова** — д-р физ.-мат. наук, доцент; ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“, лаборатория микро- и наносенсорики; ведущий научный сотрудник; E-mail: gasenkova@oelt.basnet.by
- Ирина Михайловна Андрухович** — ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“, лаборатория микро- и наносенсорики; научный сотрудник; E-mail: andrukovich@oelt.basnet.by
- Георгий Наумович Застенкер** — д-р физ.-мат. наук, профессор; ИКИ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория изучения солнечного ветра; ведущий научный сотрудник; E-mail: gzastenk@iki.rssi.ru
- Валерий Иванович Костенко** — д-р техн. наук; ИКИ РАН; помощник директора; E-mail: vkostenko@iki.rssi.ru
- Ольга Владимировна Сапунова** — ИКИ РАН, отдел физики плазмы, лаборатория изучения солнечного ветра; младший научный сотрудник; E-mail: sapunova\_olga@mail.ru
- Борис Талгатович Каримов** — Специальное конструкторское бюро космического приборостроения Института космических исследований Российской академии наук; начальник сектора 112; E-mail: kabor@skbkr.tarusa.ru
- Елена Владимировна Рыжова** — канд. техн. наук; „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; заместитель директора программ; E-mail: dp940@mail.ru

Поступила в редакцию  
26.02.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Мухуров Н. И., Бородкова Н. Л., Гасенкова И. В., Андрухович И. М., Застенкер Г. Н., Сапунова О. В., Костенко В. И., Каримов Б. Т., Рыжова Е. В. Разработка датчика потока космической плазмы с четырехсекционным коллектором // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 624—632.

**DEVELOPMENT OF SPACE PLASMA FLOW SENSOR WITH FOUR-SECTION COLLECTOR**

**N. I. Mukhurov<sup>1</sup>, N. L. Borodkova<sup>2</sup>, I. V. Gasenkova<sup>1</sup>, I. M. Andrukovich<sup>1</sup>,  
G. N. Zastenker<sup>2</sup>, O. V. Sapunova<sup>2</sup>, V. I. Kostenko<sup>2</sup>, B. T. Karimov<sup>3</sup>, E. V. Ryzhova<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>State Scientific and Production Association "Optic, Optoelectronic and laser technique",  
220072, Minsk, Belarus,  
E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by

<sup>2</sup>Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Special Design Bureau for Space Instruments Engineering  
of the Space Research Institute of the RAS,  
249101, Kaluga Region, Tarusa, Russia

<sup>4</sup>A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch  
of Khruichev State Research and Production Space Center JSC,  
141091, Moscow Region, Korolev, Russia

Features of development, creation and testing of experimental sample of space plasma flow sensor using precision selective elements from nanostructured materials and a four-section collector are considered. The design features of the experimental sample of the plasma flow sensor based on the Faraday cylinder are discussed. Results of complex tests of physical functioning of the experimental sample of the

cosmic plasma flow sensor and its selection elements are presented, calculated characteristics of the sensor are compared with results of the experimental studies. The comparison demonstrates a good agreement between blocking characteristics of the four-collector sample of the DP-10-34-4K sensor at normal and oblique incidence of the ion flow upon the sensor input window with corresponding calculated data, and thus confirms the possibility to reliably measure the transport flow velocity and its temperature in the isotropic approximation. Angular characteristics of the four sensor manifolds are symmetrical enough to coincide with the calculated ones, which allows using one sensor to determine the magnitude and direction of the ion flux, thereby reducing the mass of the device into which the sensor will be embedded.

**Keywords:** space experiment, solar wind, plasma flux sensor, Faraday cup, precision selective elements, photoelectric, angular, and energy cutoff characteristics

#### REFERENCES

1. <http://space-weather.ru/index.php?page=Space-Weather-what-is-it-en>.
2. Petrukovich A.A., Zeleny L.M. *Nauka i zhizn'*, 2002, no. 5, pp. 2–8. (in Russ.)
3. [http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR\\_2012\\_Gaydasch.pdf](http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Gaydasch.pdf). (in Russ.)
4. <http://fotogl.com/content.php?r=42>. (in Russ.)
5. Raykunov G.G., ed., *Fundamental'nyye kosmicheskiye issledovaniya. Kniga 2. Solnechnaya sistema* (Fundamental Space Research. Book 2. Solar System), Moscow, 2014, 456 p. (in Russ.)
6. Safargaleyev V.V. *Vozmushcheniya magitosferno-ionosfernoy sistemy v arkticheskikh shirotakh i zadachi monitoringa kosmicheskoy pogody* (Disturbance of Magitosferno-Ionosferic System in the Arctic Latitudes and Problems of Monitoring of Space Weather), Extended abstract of Doctor's thesis, Apatity, 2011, 29 p. (in Russ.)
7. Webb D.F., Crooker N.U., Plunkett S.P. and St. Cyr O.C. *Space Weather*, Geophysical Monograph, AGU, Washington DC, 2001, no. 125, pp. 123–141.
8. Schwenn R. *Solar Phys.*, 2006, no. 3, pp. 2–72.
9. Zastenker G.N., Khrapchenkov V.V., Koloskova I.V. et al. *Cosmic Research*, 2015, no. 1(53), pp. 63–74. (in Russ.)
10. Gringauz K.I., Bezrukikh V.V., Ozerov V.D. et al. *Doklady akademii nauk SSSR*, 1960, no. 6(131), pp. 1302–1304. (in Russ.)
11. Gringauz K.I. *Space Research II*, Amsterdam, North-Holland publ. Co, 1961, pp. 539–553.
12. Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al. *Space Sci. Rev.*, 2013, no. 175, pp. 165–182.
13. Zastenker G.N., Shafrankova YA., Nemecek Z. et al. *Cosmic Research*, 2013, no. 2(51), pp. 88–99. (in Russ.)
14. Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J. et al. *Space Science Reviews*, 1995, no. 1/4(71), pp. 41–54.
15. Bridge H.S., Belcher J.W., Butler R.J., Lazarus A.J. et al. *Space Sci. Rev.*, 1977, no. 21, pp. 259–287.
16. Case A.W., Kasper J. C., Daigneau P. S., Caldwell D. et al. *Designing a Sun-pointing Faraday cup for Solar Probe Plus. AIP Conference Proceedings*, 2013, no. 1(1539), pp. 458–461.
17. Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andrukhovich I.M., Zastenker G.N., Borodkova N.L., Kostenko V.I., Karimov B.T. *Pribery i metody izmereniy*, 2017, no. 8, pp. 305–313. (in Russ.)
18. Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andrukhovich I.M., Zastenker G.N., Borodkova N.L., Karimov B.T. *Nano- and microsystems technology*, 2017, no. 12, pp. 757–765. (in Russ.)
19. Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andrukhovich I.M. *Nano- and microsystems technology*, 2015, no. 1, pp. 48–56. (in Russ.)
20. Mukhurov N.I. *The Science and Innovations*, 2016, no. 4, pp. 27–29. (in Russ.)

#### Data on authors

<b>Nikolay I. Mukhurov</b>	—	Dr. Sci., Professor; State Scientific and Production Association "Optic, optoelectronic and laser technique", Laboratory of Micro- and Nano-sensorics; Head of the Laboratory; E-mail: n.mukhurov@ifanbel.bas-net.by
<b>Natalia L. Borodkova</b>	—	PhD; Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Plasma Physics, Solar Wind Laboratory; Senior Scientist; E-mail: nlbor@mail.ru
<b>Irina V. Gasenkova</b>	—	Dr. Sci., Associate Professor; State Scientific and Production Association "Optic, optoelectronic and laser technique", Laboratory of Micro- and Nano-sensorics; Leading Researcher; E-mail: gasenkova@oelt.basnet.by
<b>Irina M. Andrukhovich</b>	—	State Scientific and Production Association "Optic, optoelectronic and laser technique", Laboratory of Micro- and Nano-sensorics; Senior Scientist; E-mail: andrukhovich@oelt.basnet.by
<b>Georgy N. Zastenker</b>	—	Dr. Sci., Professor; Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Plasma Physics, Solar Wind Laboratory; Leading Researcher; E-mail: gzastenk@iki.rssi.ru
<b>Valery I. Kostenko</b>	—	Dr. Sci.; Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Assistant Director; E-mail: vkostenko@iki.rssi.ru

- Olga V. Sapunova** — Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Department of Plasma Physics, Solar Wind Laboratory; Junior Scientist; E-mail: [sapunova\\_olga@mail.ru](mailto:sapunova_olga@mail.ru)
- Boris T. Karimov** — Special Design Bureau for Space Instruments Engineering of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Head of Sector 112; E-mail: [kabor@skbcp.tarusa.ru](mailto:kabor@skbcp.tarusa.ru)
- Elena V. Ryzhova** — PhD; A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC; Deputy Programs Director; E-mail: [dp940@mail.ru](mailto:dp940@mail.ru)

**For citation:** Mukhurov N. I., Borodkova N. L., Gasenkova I. V., Andrukhovich I. M., Zastenker G. N., Sapunova O. V., Kostenko V. I., Karimov B. T., Ryzhova E. V. Development of space plasma flow sensor with four-section collector. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 624—632 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-624-632