



www.volsu.ru

ИННОВАЦИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu10.2017.1.4>

УДК 621.3.032.026

ББК 32.85

АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ УСТРОЙСТВ С ФОКУСИРУЮЩИМИ ИОННО-ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Станислав Юрьевич Сторожаков

Кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехнологий и электрооборудования в сельском хозяйстве,
Волгоградский государственный аграрный университет
ppsts@rambler.ru
просп. Университетский, 26, 400002 г. Волгоград, Российская Федерация

Алексей Николаевич Чернявский

Ассистент кафедры электротехнологий и электрооборудования в сельском хозяйстве,
Волгоградский государственный аграрный университет
alexei.tcherniawskij@yandex.ru
просп. Университетский, 26, 400002 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения электрической прочности различных ионно-оптических систем. Приведен анализ особенностей работы различных ионно-оптических систем, применяемых на практике.

Ключевые слова: ионно-оптические системы, устройство, система, электрод, электрическая прочность.

В настоящее время в исследованиях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу широко применяются интенсивные пучки высокоэнергетичных ионов и атомов. Сильноточные пучки ионов и атомов водорода (дейтерия) служат для создания и нагрева плазмы до термоядерных температур в установках с магнитным удержанием плаз-

мы. Инжекторы быстрых частиц для термоядерных установок стали развиваться с началом строительства магнитных ловушек. В 70-е гг. необходимость создания средств безындукционного нагрева плазмы в токамаках послужила стимулом для большого прогресса в развитии инжекторов. Мощность систем инжекции в первых токамаках составляла де-

сятки киловатт, в современных системах она достигает десятки мегаватт. В проектах демонстрационных термоядерных реакторов рассматриваются мощности систем инжекции до 100 МВт. Диапазон энергий атомов – от десятков до сотен кэВ, эквивалентные токи пучков – от долей ампера до ста ампер [1].

Для увеличения ресурса работы таких систем применяется упрощение конструкции, изготовления и сборки с одновременным уменьшением экономических затрат. Это достигается тем, что в ионно-оптической системе (далее – ИОС) ионного двигателя, включающей изолированные друг от друга электропроводные полусферические сетчатые эмиссионный и ускоряющий электроды, крепежные элементы и электрические контакторы, эмиссионный и ускоряющий электроды крепятся к двум разным фланцам прижатием их головкой винта через втулку, между фланцами установлены закрытые чехлами со всех сторон керамические изоляторы, при этом фланцы непосредственно соединены с электрическими контакторами, подающими и поддерживающими потенциалы по всей площади прилегания сетчатых электродов к фланцам [2].

Существует ионно-оптическая система, представленная на рисунке 1, состоящая из ис-

точника ионов 1, положительной полярности, плазменного электрода 2, ускоряющего электрода 3, который выполнен в виде катушки конусообразной формы, создающей магнитное поле 4, силовые линии которого вытянуты в сторону продольной оси системы. Электроны, идущие из пучковой плазмы 5, образуемой ускоряемыми частицами в области их дрейфа, надежно замагничены и не могут уйти с силовых линий магнитного поля [1; 2; 4].

Это позволяет эффективно защищать поверхности электродов от бомбардировки заряженными частицами. Такой результат достигается тем, что в ИОС ускоряющий электрод выполнен в виде магнитной катушки, создающей конфигурацию магнитных силовых линий, при которой величина радиальной составляющей магнитного поля в каждой точке продольной оси будет минимальной и резко нарастать к периферии.

Существует электростатическая ионно-оптическая система, обеспечивающая фокусировку пучка по углу и его монохроматизацию на входе в монополюсный масс-анализатор, представленная на рисунке 2. Используется воронкообразный вытягивающий электрод в энергофильтре в виде цилиндра, в меридиональной плоскости которого расположен

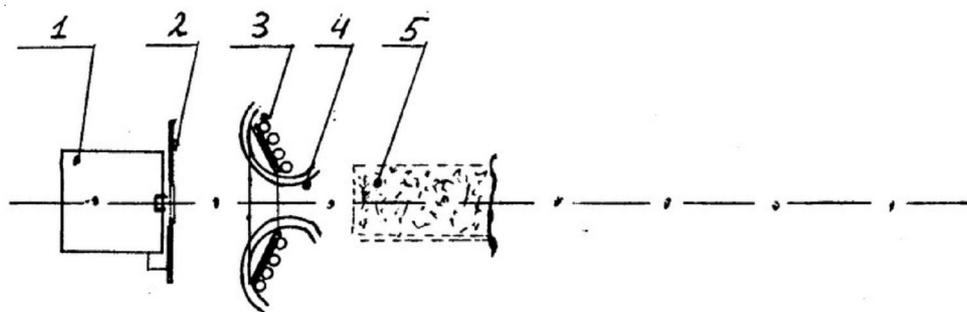


Рис. 1. Ионно-оптическая система с магнитной защитой электродов

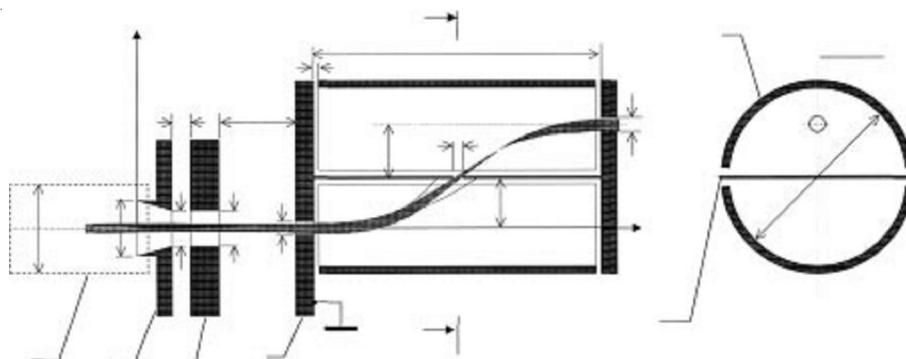


Рис. 2. Ионно-оптическая система формирования пучка с фильтрацией по энергии

плоский электрод. Система допускает изменение геометрии пропорционально радиусу апертуры и питания анода [3; 6].

Одним из возможных путей решения задачи является повышение эквипотенциальности области образования ионов. Для предотвращения попадания в блок электродов монопольного анализатора рассеянных электронов существует метод смещения ИОС относительно входной апертуры с помощью отклоняющей системы. Такая система обеспечивает уменьшение разброса по энергии в ионном пучке, что позволяет работать без энергофильтрации. Но все-таки, когда требования к моноэнергетичности пучка выше, необходимо ставить фильтр по энергии.

Для решения задачи создания инжекторов квазистационарного источника водородных ионов с энергией 60 кэВ и током 60 А разработана конструкция ИОС с многощелевыми электродами, в которых в перемычки между щелями встроены медные трубки диаметром 4 мм при толщине стенки 0,8 мм, через которые прокачивается вода. При этом толщина электродов увеличивается до 6 мм, что существенно с точки зрения условий формирования пучка с малым средним углом расходимости на уровне 20 ± 25 мрад (около $\pm 1,5$). Отметим, что прозрачность щелевой ИОС примерно на 30 % больше, чем в ИОС с круглыми отверстиями [3].

При этом, используя программу численного расчета пучков RUDI, можно:

– оптимизировать конфигурацию трехэлектродной щелевой ячейки ИОС стационарного ионного источника для получения оптимальной плотности тока ионов с заданной энергией и приемлемой расходимостью пучка;

– рассчитать потоки вторичных частиц и провести оценки мощности, которая выделяется на электродах [5].

Для формирования диагностического пучка RUDI используется четырехэлектродная ИОС, представленная на рисунке 3.

Система электродов имеет следующее распределение потенциалов: плазменный электрод – 50 кВ; вытягивающий электрод – 43 кВ; ускоряющий электрод – 0,5 кВ; заземленный электрод – 0 кВ. Отрицательное напряжение на третьем электроде предотвращает попадание электронного потока из вторичной плазмы в ускоряющий зазор [5].

В данной ИОС реализован принцип геометрической фокусировки, то есть полный пучок формируется из множества направленных в общую точку фокуса элементарных пучков. Сеточная система RUDI имеет активное водяное охлаждение. Поскольку размещение водяных каналов непосредственно в рабочей области сеток представляет определенные технологические трудности, в данной конструкции каналы системы охлаждения расположены на периферии держателей сеток.

Среди достоинств щелевой геометрии следует отметить ее потенциально более высокую прозрачность, а следовательно, более

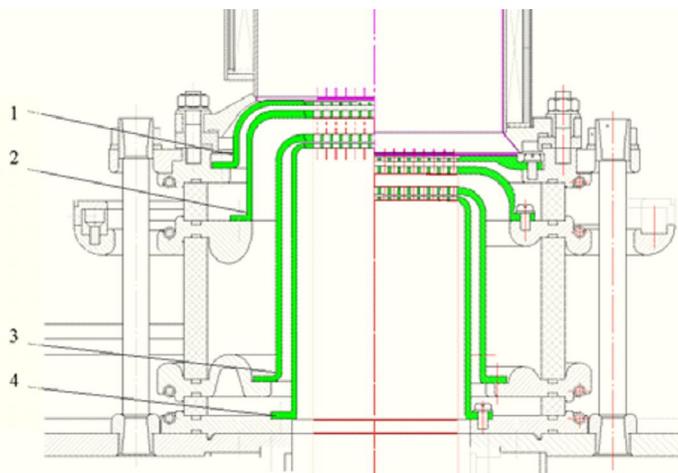


Рис. 3. Ионно-оптическая система в сборе (слева показана предыдущая геометрия, справа – геометрия с новыми щелевыми сетками и увеличенной апертурой):

1 – плазменный электрод; 2 – вытягивающий электрод; 3 – ускоряющий электрод; 4 – заземленный электрод

высокие возможные значения тока пучка по сравнению с дырочной геометрией при исходном размере сеток. К проблемам реализации щелевой оптики можно отнести несколько более затрудненный теплоотвод от длинных перемычек между щелями [7; 8].

Существуют нейтронные трубки с ионным источником Пеннинга с термокатодом, выполненные в виде герметичной колбы, состоящей из металлостеклянной оболочки и металлостеклянной или металлокерамической ножки, в которой расположены мишень, ионно-оптическая система, источник ионов и генератор рабочего газа, одновременно служащий и газопоглотителем остаточных газов. Известен ионный источник Пеннинга с термокатодом, содержащий катод с вольфрамовой спиралью, разогреваемой при работе нейтронной трубки до температуры 2 100 °С, антикатод с отверстием для выхода ионов в ИОС трубки, анод, генератор газа и магнит. На анод ионного источника Пеннинга с термокатодом подают постоянное или импульсное напряжение. Газонаполненная нейтронная трубка с источником Пеннинга способна при напряжении 120–125 кВ и среднем токе порядка 350 мкА генерировать нейтронные потоки выше $2 \cdot 10^9$ н/с и обеспечить среднюю наработку порядка 200 часов. Сорбционная емкость термогазопоглотителя 12 зависит от его массы. Наиболее приемлемой для газонаполненной нейтронной трубки, рассчитанной на обеспечение нейтронного потока порядка $2 \cdot 10^9$ н/с при выделяемой мощности порядка 50 Вт, является масса порядка 100–350 мг.

Некоторые устройства обеспечивают электрическую прочность ИОС и трубки более 140 кВ, генерируют нейтронный поток на уровне $2 \cdot 10^9$ н/с и сохраняют его при длительной работе (более 200 часов).

Рабочие параметры предлагаемых нейтронных трубок (в сравнении с трубкой, не

имеющей термогазопоглотителя) представлены в таблице.

В результате проведенного анализа ионно-оптических систем очевидно, что одним из методов повышения электрической прочности является принцип геометрической фокусировки, то есть полный пучок формируется из множества направленных в общую точку фокуса элементарных пучков, включая источник Пеннинга с термокатодом, а также использование фокусировки ионного пучка и защиты внутренней поверхности колбы от запыления материалами электродов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов, Д. Ю. Электрофизические способы предпосевной обработки семян озимой пшеницы / Д. Ю. Беликов, С. Ю. Сторожаков, А. Н. Чернявский // Электронный научный журнал. – 2016. – № 12-1 (15). – С. 104–110.
2. Бочаров, М. Е. Математическая обработка дискретных элементов по исследованию точности измерения концентрации аэроионов / М. Е. Бочаров, С. Ю. Сторожаков, А. А. Шубович // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8-2. – С. 239–242.
3. Маркелов, А. Ю. Моделирование формирования пучка в щелевой ячейке ионно-оптической системы стационарного источника ионов / А. Ю. Маркелов, А. А. Панасенков, В. А. Смирнов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». – 2013. – № 1. – С. 58–63.
4. Пат. Российская Федерация, Н01J3/38. Монтаж, крепление, размещение или изоляция электронно-оптических или ионно-оптических устройств / Жиркин А. С. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://poleznayamodel.ru/model/12/127511>. – Загл. с экрана.
5. Сторожаков, С. Ю. Исследования по подтверждению точности измерения концентрации аэроионов приборами Сапфир-3М / С. Ю. Сторожаков, А. А. Шубович, А. Н. Чернявский // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4-2. – С. 265–270.
6. Сторожаков, С. Ю. Применение компьютерного моделирования в поиске путей утилизации

Рабочие параметры нейтронных трубок

№ п/п	Параметр	Трубка без дополнительного электрода	Трубка с дополнительным электродом
1	Ускоряющее напряжение (кВ)	120–130	120–130
2	Ток, протекающий через трубку (мкА)	300–400	300–400
3	Нейтронный поток (10^9 н/с)	~ 2	~ 2,5
4	Ресурс	~ 200	~ 300

ацетатсодержащих побочных продуктов химических производств / С. Ю. Сторожаков // *Электронный научный журнал*. – 2016. – № 2 (5). – С. 474–478.

7. Сторожаков, С. Ю. Проблемы развития АПК России / С. Ю. Сторожаков // *Электронный научный журнал*. – 2016. – № 2 (5). – С. 469–473.

8. Сторожаков, С. Ю. Численная обработка результатов измерений концентрации ионов в воздухе / С. Ю. Сторожаков, А. А. Шубович, Н. А. Куликова // *Современные наукоемкие технологии*. – 2016. – № 10-1. – С. 92–96.

9. Шубович, А. А. Применение ионизаторов воздуха на рабочем месте / А. А. Шубович, С. Ю. Сторожаков // *Электротехнологии, оптические излучения и электрооборудование в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ведущего электротехнолога России акад. Ивана Федоровича Бородина*. – Волгоград, 2016. – С. 66–71.

REFERENCES

1. Belikov D.Yu., Storozhakov S.Yu., Chernyavskiy A.N. Elektrofizicheskie sposoby predposevnoy obrabotki semyan ozimoy pshenitsy [Electrical and Physical Methods of Presowing Treatment of Seeds of Winter Wheat]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2016, no. 12-1 (15), pp. 104-110.

2. Bocharov M.E., Storozhakov S.Yu., Shubovich A.A. Matematicheskaya obrabotka diskretnykh elementov po issledovaniyu tochnosti izmereniya kontsentratsii aeroionov [Mathematical Processing of Discrete Elements in the Study of Accuracy of Measuring the Concentration of Ions]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2015, no. 8-2, pp. 239-242.

3. Markelov A.Yu., Panasenkov A.A., Smirnov V.A. Modelirovanie formirovaniya puchka v shchelevoy yacheyke ionno-opticheskoy sistemy statsionarnogo istochnika ionov [Modeling of the Beam Shaping Slit in the Cell of Ion-Optical System of the Stationary Ion Source]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya «Termoyadernyy sintez»*, 2013, no. 1, pp. 58-63.

4. Zhirkin A.S. Pat. Rossiyskaya Federatsiya, H01J3/38. Montazh, kreplenie, razmeshchenie ili izolyatsiya elektronno-opticheskikh ili ionno-opticheskikh ustroystv [Patent of the Russian Federation, H01J3/38. Mounting, Fixing, Placing or Isolation of Electron-Optical or Ion-Optical Devices]. Available at: <http://poleznayamodel.ru/model/12/127511>.

5. Storozhakov S.Yu., Shubovich A.A., Chernyavskiy A.N. Issledovaniya po podtverzhdeniyu tochnosti izmereniya kontsentratsii aeroionov priborami Sapfir-3M [Studies on Verifying the Accuracy of Measuring the Concentration of Ions Devices Sapfir-3M]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 4-2, pp. 265-270.

6. Storozhakov S.Yu. Primenenie kompyuternogo modelirovaniya v poiske putey utilizatsii atsetatsoderzhashchikh pobochnykh produktov khimicheskikh proizvodstv [The Use of Computer Modeling in the Search for Ways of Disposing Acetazolamide By-Products of Chemical Production]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2016, no. 2 (5), pp. 474-478.

7. Storozhakov S.Yu. Problemy razvitiya APK Rossii [Problems of Development of Agro-Industrial Complex of Russia]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2016, no. 2 (5), pp. 469-473.

8. Storozhakov S.Yu., Shubovich A.A., Kulikova N.A. Chislennaya obrabotka rezultatov izmereniy kontsentratsii ionov v vozdukh [Numerical Processing of the Measurement Results of Ions Concentration in the Air]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, no. 10-1, pp. 92-96.

9. Shubovich A.A., Storozhakov S.Yu. Primenenie ionizatorov vozdukh na rabochem meste [The Use of Air Ionizers for the Workplace]. *Elektrotekhnologii, opticheskie izlucheniya i elektrooborudovanie v APK: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati vedushchego elektrotekhnologa Rossii akad. I.F. Borodina* [Electrical Technologies, Optical Radiation and Electrical Equipment in Agro-Industrial Complex: Proceedings of Scientific and Practical Conference in Memory of Leading Electro-, Academician I.F. Borodin]. Volgograd, 2016, pp. 66-71.

ASPECTS OF INCREASING THE ELECTRIC STRENGTH OF DEVICES WITH FOCUSING ION-OPTICAL SYSTEMS

Stanislav Yuryevich Storozhakov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Electrotechnology and Electrical Equipment in Agriculture,
Volgograd State Agrarian University
ppsts@rambler.ru
Prospect Universitetsky, 26, 400002 Volgograd, Russian Federation

Aleksey Nikolaevich Chernyavskiy

Assistant, Department of Electrotechnology and Electrical Equipment in Agriculture,
Volgograd State Agrarian University
alexei.tcherniawskij@yandex.ru
Prosp. Universitetsky, 26, 400002 Volgograd, Russian Federation

Abstract. Currently, research on plasma physics and controlled thermonuclear fusion widely use intense beams of energetic ions and atoms. High-current beams of ions and atoms of hydrogen (deuterium) are used to create and heat the plasma to fusion temperatures in installations with magnetic confinement of the plasma. The fast particle injectors for fusion devices started to develop with the construction of the magnetic trap.

The authors of the present research deal with such problems as increasing the service life of mentioned devices, simplifying their design, fabrication and assembly, while reducing economic costs. This can be achieved in the ion-optical system for ion engine comprising isolated from each other with conductive hemispherical mesh emission and accelerating electrodes, fasteners and electrical contactors. The emission accelerating electrodes are attached to two different flanges pressing them through the grommet between the flanges installed closed covers on all sides of ceramic insulators, the flanges are directly connected to the electrical contactors, the supply and support capacities throughout the area fit mesh electrodes to the flanges.

In the result of the analysis of the ion-optical system it is obvious that one method of increasing the electrical strength is the principle of geometric focusing, i.e. the full beam is formed of many aimed at a common focus point of the elementary beam source of the penning with a thermionic cathode, and the use of focus ion beam and the use of protection of the inner surface of the bulb from dust and materials of the electrodes.

Key words: ion-optical systems, device, system, electrode, electric strength.