

## Моделирование мультикасповой магнитной системы источника ускоренных нейтральных частиц

С. А. Трифонов<sup>1</sup>, К. С. Воробьев<sup>2,3</sup>, Д. К. Кострин<sup>2✉</sup>, С. А. Марцынюков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», ГК «Росатом», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», Санкт-Петербург, Россия

✉ dkkostrin@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрено решение актуальной технологической задачи очистки диэлектрических поверхностей, при которой исключается образование поверхностного потенциала, требующее разработки специализированных источников ускоренных нейтральных частиц, интегрируемых в ионно-плазменные установки. Существенный недостаток данных источников состоит в низкой плотности и малой однородности выходного потока, что приводит к увеличению времени технологической операции и ухудшению качества обработки поверхностей. Для устранения данных недостатков можно интегрировать в устройство мультикасповую систему магнитного поля для снижения плазменной нагрузки на анод, уменьшения эффективной площади анода и повышения плотности паро-плазменного потока. Для оптимизации конструкции источника было проведено моделирование магнитной системы и осуществлен расчет распределения магнитного поля в рабочей области. Для оптимального функционирования источника необходимо добиться как можно больших значений индукции магнитного поля у стенок рабочего объема и как можно меньших – в центральной области, в которой перемещается паро-плазменный поток. Результаты моделирования показывают, что существует оптимальное решение при выборе количества постоянных магнитов, удерживающих газоразрядную плазму. Эффект удержания усиливается с увеличением количества постоянных магнитов, при этом выход электронов из конуса потерь становится более частым, что приводит к ухудшению качества выходного потока. Оптимальное количество магнитов выбирается из условия уравнивания этих двух конкурентных эффектов.

**Ключевые слова:** очистка поверхности, ускоренные нейтральные частицы, газоразрядный источник, технологическая установка, мультикасповая система, магнитное поле, компьютерное моделирование

**Для цитирования:** Моделирование мультикасповой магнитной системы источника ускоренных нейтральных частиц / С. А. Трифонов, К. С. Воробьев, Д. К. Кострин, С. А. Марцынюков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 5. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-5-14.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Simulation of a Multicusp Magnetic System of an Accelerated Neutral Particle Source

S. A. Trifonov<sup>1</sup>, K. S. Vorobyev<sup>2,3</sup>, D. K. Kostrin<sup>2✉</sup>, S. A. Martsinukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», SC «Rosatom», Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup>JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», Saint Petersburg, Russia

✉ dkkostrin@mail.ru

**Abstract.** The article considers the solution of an important technological problem of cleaning dielectric surfaces, during which the formation of a surface potential is eliminated, requiring the development of specialized sources of accelerated neutral particles integrated into ion-plasma installations. A significant disadvantage of these sources is the low density and poor uniformity of the output flow, which leads to an increase in the time of the technological operation and deterioration in the quality of surface treatment. To eliminate these disadvantages, a multicusp magnetic field system can be integrated into the device to reduce the plasma load on the anode, reduce the effective area of the anode and increase the density of the vapor-plasma flow. To optimize the design of the source, a simulation of the magnetic system was carried out and the calculation of the distribution of the magnetic field in the working area was conducted. For optimal operation of the source, it is necessary to achieve the largest possible magnitude of magnetic field induction at the walls of the working volume and as small as possible in the central region in which the vapor-plasma flow moves. The simulation results show that there is an optimal solution when choosing the number of permanent magnets holding the gas-discharge plasma. The retention effect increases with an increase in the number of permanent magnets, while the output of electrons from the loss cone becomes more frequent, which leads to a deterioration in the quality of the output flow. The optimal number of magnets is selected from the condition of balancing these two competitive effects.

**Keywords:** surface cleaning, accelerated neutral particles, gas-discharge source, technological installation, multicusp system, magnetic field, computer simulation

**For citation:** Simulation of a Multicusp Magnetic System of an Accelerated Neutral Particle Source / S. A. Trifonov, K. S. Vorobyev, D. K. Kostrin, S. A. Martsinukov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 5. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-5-14.

---

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Повышение эффективности плазменных технологических источников относится к актуальным задачам прикладной науки и техники. Технологические процессы, базирующиеся на использовании потоков высокоэнергетических частиц в вакууме, находят широкое применение во многих отраслях промышленности, и прежде всего в электронном производстве [1], [2]. В настоящее время существуют различные методы финишной очистки поверхностей перед нанесением покрытий [3]. Актуальная технологическая задача – очистка диэлектрических поверхностей, при которой исключается образование поверхностного потенциала, близкого по значениям к энергии бомбардирующих ионов, что дает предпосылки к образованию пробоя достаточно тонких диэлектрических слоев и к иным поверхностным дефектам.

Методы очистки реализуются серийными и экспериментальными устройствами, главный недостаток которых – низкая эффективность нейтрализации заряженных частиц. Ввиду этого эффекта обрабатываемое изделие бомбардируется потоком ионов, обладающих достаточно большими энергиями, и как положительным, так и отрицательным зарядом. Достаточно часто это вызывает существенное снижение степени очистки детали в силу того, что начинают проявляться дефекты, вызванные возникающими зарядами. Также можно отметить, что существующие ис-

точники не позволяют управлять плотностью потока нейтральных частиц на выходе. Отдельную задачу представляет возможность совместного использования данных устройств для ассистирования процесса напыления с использованием подачи на подложку потока ускоренных нейтральных частиц при формировании покрытий комбинированного химического состава (интерметаллические, оксидные и гидридные соединения).

Для устранения этих недостатков необходимо использовать систему с возможностью управления паро-плазменным потоком ускоренных нейтральных частиц. Особенности работы таких источников состоят в создании потока плазмы с помощью газового разряда, ускорении ионной составляющей в зазоре между электродами, их последующей нейтрализации и подаче потока ускоренных нейтральных частиц на обрабатываемое изделие.

**Конструкция источника ускоренных нейтральных частиц.** Для финальной очистки поверхности деталей и дополнительно для ее активации перед нанесением покрытий был сконструирован ионно-плазменный модуль на основе регулируемого источника ускоренных нейтральных частиц с газовым разрядом [4], [5]. Данный источник состоит из следующих основных узлов: катода-нейтрализатора, анода, подключенного к «земле» источника питания и вспомогательного электрода, расположенного под плавающим потенциалом.

При подаче инертного газа в рабочую камеру источника и установлении на катоде-нейтрализаторе потенциала с отрицательным знаком возникает газовый разряд, заполняющий объем внутри источника. В процессе горения газового разряда возникают ионы, подвергающиеся ускорению катодным падением потенциала. Нейтрализация данных частиц осуществляется в первую очередь благодаря отражению от внутренних стенок каналов, просверленных в катоде-нейтрализаторе; дополнительно некоторое количество ионов нейтрализуется в ходе резонансной перезарядки при контакте с атомами рабочего газа. Вследствие данных физических процессов генерируется ускоренный и ориентированный поток нейтральных частиц.

Главный недостаток такого источника заключается в том, что ему присуща низкая плотность и малая однородность выходного потока ускоренных нейтральных частиц, и это приводит к увеличению времени технологической операции и ухудшению качества обрабатываемых поверхностей.

Для устранения данного недостатка можно интегрировать в устройство систему магнитного поля типа «мультикасп» (англ. multicusp – многоострый) для снижения плазменной нагрузки на анод, уменьшения эффективной площади анода и повышения плотности паро-плазменного потока. Это, в свою очередь, приведет к увеличению плотности потока ускоренных нейтральных частиц и росту эффективности применения источника без повышения давления используемого инертного газа.

На сегодняшний день мультикасповые магнитные системы в основном применяются при конструировании ионных источников, используемых для создания потоков ионов высокой интенсивности в задачах термоядерного синтеза и ускорительной техники [6]–[15]. При этом эксперименты по использованию мультикасповых систем для создания нейтральных потоков относительно малочисленны [16], [17]. Можно также отметить разработанную в НИУ «МЭИ» плазменную установку с мультикасповой магнитной системой, предназначенную для исследования воздействия потоков высокоэнергичной плазмы на различные материалы [18]–[22].

На рис. 1 показан конструктивный эскиз источника ускоренных нейтральных частиц, состоящего из катода-нейтрализатора 1, анода 2, вспомогательного электрода 3, разделительного диска 4, двух внутренних 5 и четырех внешних 6 изоляторов.

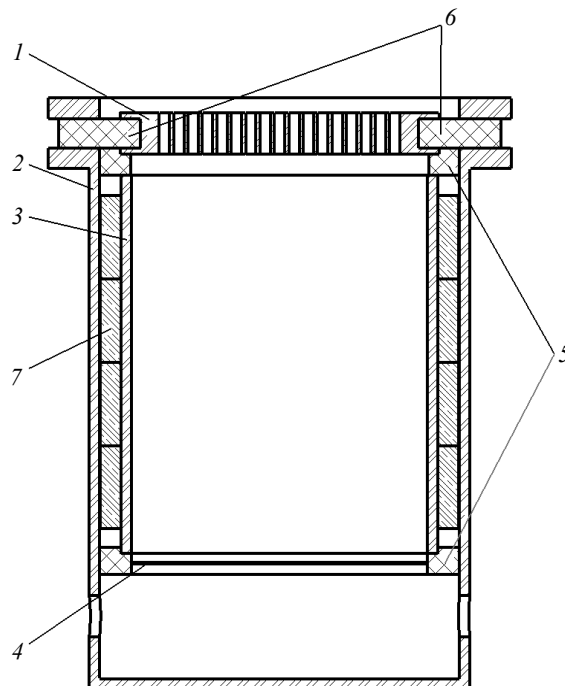


Рис. 1. Эскиз источника ускоренных нейтральных частиц  
Fig. 1. Design of the source of accelerated neutral particles

В качестве источников магнитного поля 7 используются постоянные магниты неодим-железо–бор NdFe35 [23]. Объем, в котором находятся магниты, заполнен дистиллированной водой для их лучшего охлаждения. Размер каждого магнита составляет  $40 \times 10 \times 10$  мм. Коэрцитивная сила магнитов составляет 876 кА/м. Мультикасповая система состоит из набора магнитов противоположной полярности, расположенных по кругу вокруг источника. Магнитное поле внутри рабочего объема источника сжимает поток плазмы и повышает ее плотность. Таким образом, магнитное поле, создаваемое несколькими постоянными магнитами, позволяет увеличить ток ионов в источнике и, как следствие, повысить интенсивность потока нейтральных частиц [24]–[26].

**Моделирование мультикасповой магнитной системы.** Интенсивность магнитного поля может быть увеличена или уменьшена посредством изменения количества пар магнитов, при этом такая модификация поля требует разборки источника и переустановки постоянных магнитов. Таким образом, для оптимизации конструкции источника ускоренных нейтральных частиц необходимо смоделировать модернизированную магнитную систему и рассчитать распределение магнитного поля в рабочей области для определения влияния магнитного поля мультикасповой системы на работу ис-

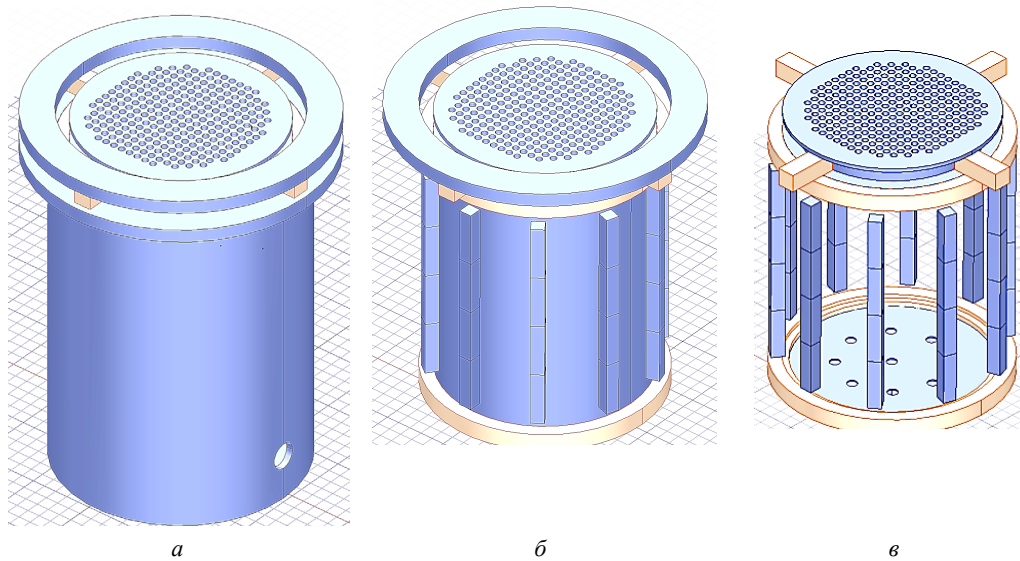


Рис. 2. Расчетная модель источника ускоренных нейтральных частиц, построенная в системе Ansys Electronics: *a* – полная; *б* – без внешнего анода; *в* – без вспомогательного электрода  
Fig. 2. Calculation model of the source of accelerated neutral particles built in the Ansys Electronics system: *a* – complete model; *б* – without an external anode; *в* – without an auxiliary electrode

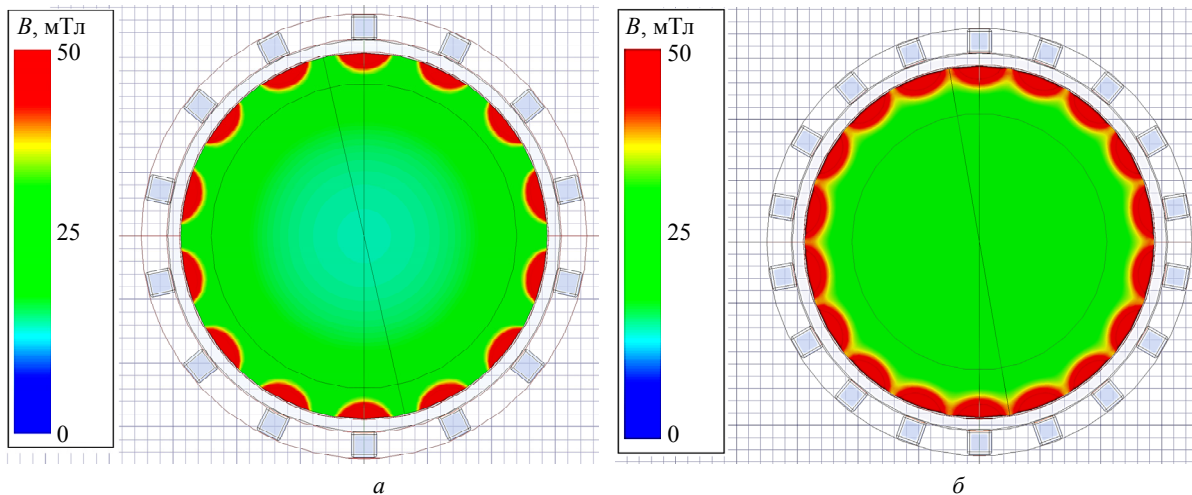


Рис. 3. Распределение индукции магнитного поля на уровне верхнего края магнитов при использовании немагнитной стали: *a* – 14, *б* – 18 магнитов  
Fig. 3. Distribution of magnetic field induction at the level of the upper edge of magnets when using non-magnetic steel: *a* – 14, *б* – 18 magnets

точника. Распределение магнитного поля рассчитывалось в системе конечно-элементного анализа Ansys Electronics в расширении Ansys Maxwell. На рис. 2 приведена расчетная модель источника с внешним корпусом и без него.

Расчеты проводились для количества магнитов, варьирующегося в диапазоне от 6 до 18. На рис. 3 приведены распределения индукции магнитного поля на уровне верхнего края магнитов при использовании немагнитной стали в качестве материала для внешнего корпуса источника. Индукция магнитного поля имеет максимальное значение вблизи магнитов и спадает по мере приближения к центру цилиндрического корпуса,

при этом источник равномерно окружен постоянными магнитами с чередующейся полярностью.

Очевидно, что с увеличением количества магнитов возрастает их влияние на пароплазменный поток в источнике из-за более сильного сжимающего эффекта магнитного поля. Также при использовании большего количества магнитов уменьшаются «мертвые зоны» между ними, и таким образом наблюдается большая степень экранирования внутренних стенок источника. При этом можно отметить, что оптимальное количество магнитов определяется геометрическими размерами как источника в целом, так и его отдельных узлов, а также коэрцитивной силой используемых магнитов.

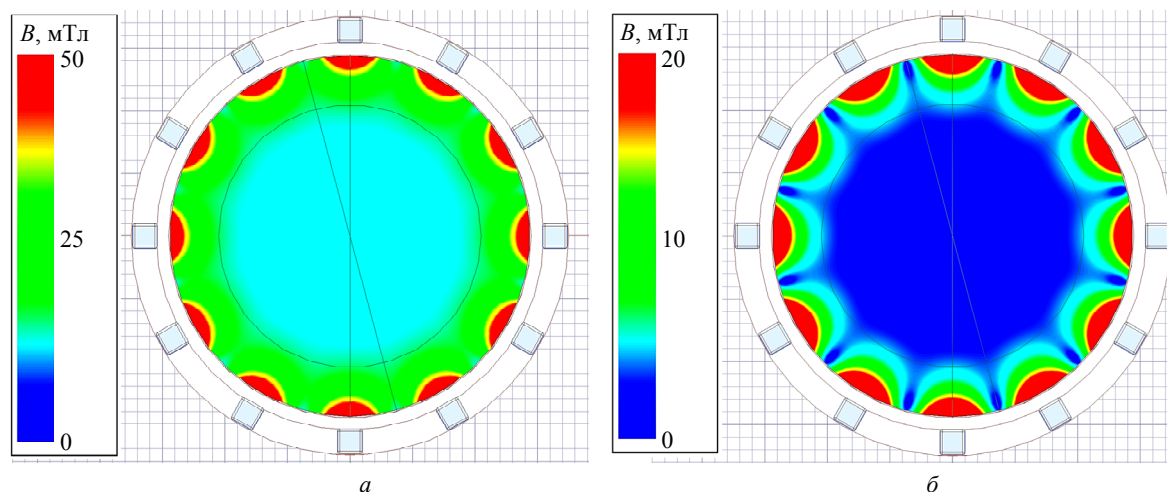


Рис. 4. Распределение индукции магнитного поля на уровне верхнего края магнитов при использовании:  
*a* – немагнитной стали; *б* – конструкционной углеродистой стали  
Fig. 4. Distribution of magnetic field induction at the level of the upper edge of magnets when using:  
*a* – non-magnetic steel; *б* – structural carbon steel

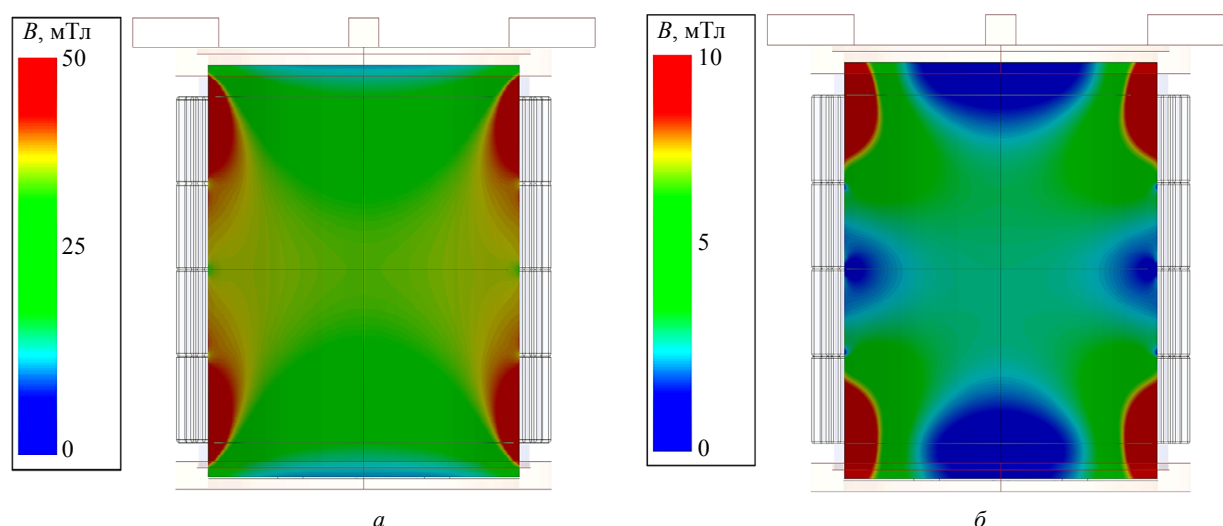


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля в рабочей области при использовании:  
*a* – немагнитной стали; *б* – конструкционной углеродистой стали  
Fig. 5. Distribution of magnetic field induction in the working area when using:  
*a* – non-magnetic steel; *б* – structural carbon steel

На рис. 4 представлено сравнение распределения индукции магнитного поля на уровне верхнего края магнитов при использовании 12 магнитов, а также немагнитной стали и конструкционной углеродистой стали в качестве материала для внешнего корпуса источника. Можно отметить, что индукция магнитного поля вблизи стенок намного выше в случае использования немагнитной стали, при этом при применении конструкционной углеродистой стали наблюдается значительно меньшая индукция магнитного поля в центральной области рабочего объема. Таким образом, в первом случае происходит большее сжатие паро-плазменного потока от стенок внутреннего объема источника к его центру, необходимое

для оптимального функционирования устройства, а во втором случае наблюдается меньшее влияние магнитного поля на поток заряженных частиц.

На рис. 5 приведены аналогичные предыдущим распределения индукции магнитного поля в рабочей области при использовании 18 магнитов и двух указанных ранее материалов, только не в поперечном, а в продольном сечении. По данным распределениям можно сделать аналогичные заключения – в случае немагнитной стали общий уровень наблюдаемой магнитной индукции значительно выше.

На рис. 6 показано векторное распределение индукции магнитного поля в рабочей области при использовании 18 магнитов и немагнитной стали. В данном случае наблюдаются краевые эффекты

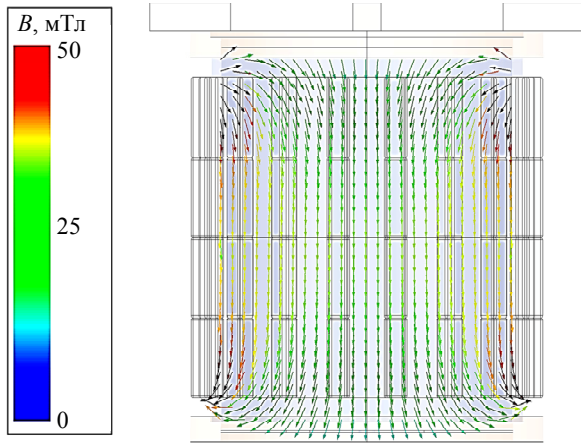


Рис. 6. Векторное распределение индукции магнитного поля в рабочей области при использовании немагнитной стали

Fig. 6. Vector distribution of magnetic field induction in the working area when using non-magnetic steel

на торцах магнитных столбиков, связанные с особенностью магнитных полей в мультикасповых системах.

Кроме моделирования распределения магнитного поля была проведена оценка магнитной индукции на различном удалении от оси источника. Графики распределения индукции магнитного поля вдоль рабочего объема построены для магнитных линий, начальные и конечные точки которых по азимуту располагаются между соседними магнитами. На рис. 7, 8 приведены зависимости распределения индукции продольного магнитного поля вдоль оси симметрии источника, а также поперечного – вдоль диаметра на уровне краев магнитов и на уровне выхода из рабочей об-

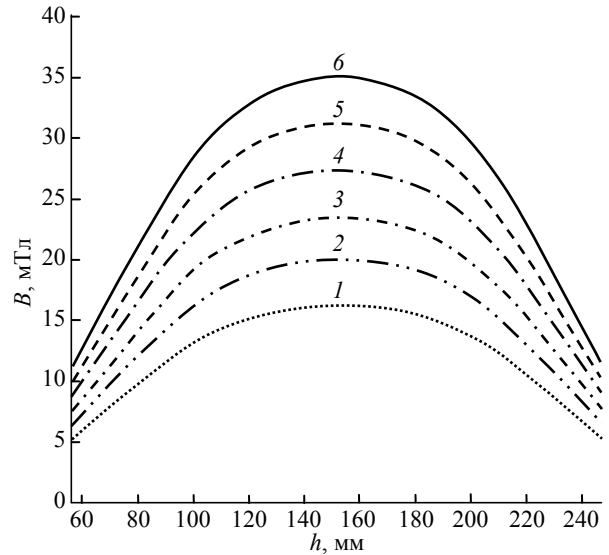


Рис. 7. Зависимости продольного распределения индукции магнитного поля вдоль оси симметрии источника

Fig. 7. Dependences of the longitudinal distribution of the magnetic field induction along the axis of symmetry of the source

ласти при различном количестве используемых магнитов (1 – 8 магнитов; 2 – 10; 3 – 12; 4 – 14; 5 – 16; 6 – 18).

Для оптимального функционирования источника с мультикасповой магнитной системой необходимо добиться как можно большего магнитного поля у стенок рабочего объема и как можно меньшего – в центральной области, в которой перемещается паро-плазменный поток. При этом существует еще один важный фактор – ширина центральной области, характеризуемой равномерным значением индукции магнитного поля.

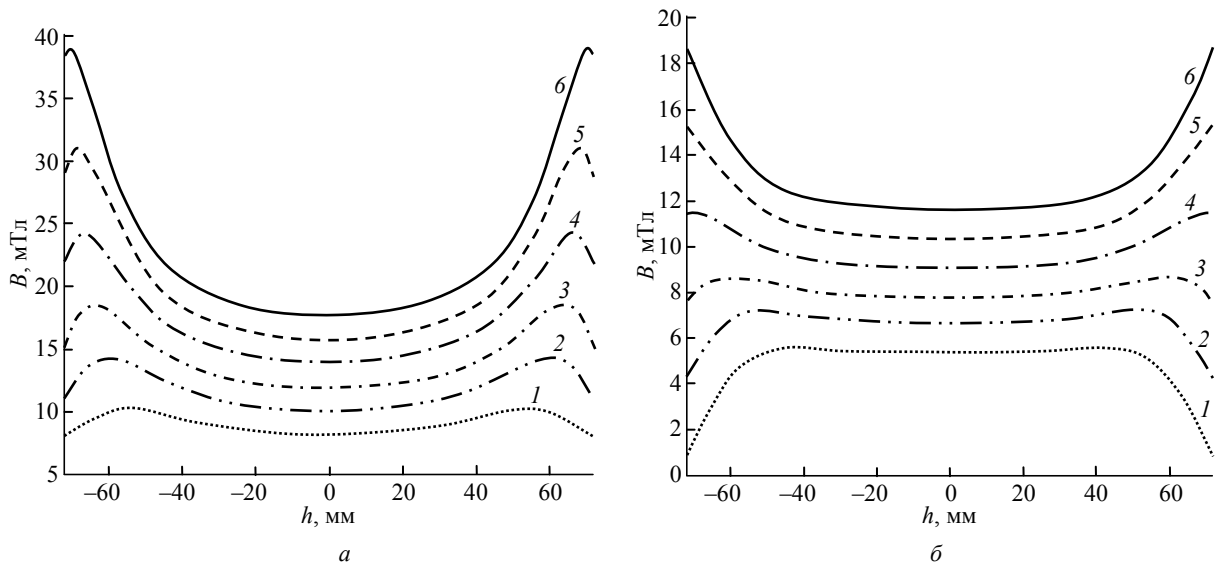


Рис. 8. Зависимости поперечного распределения индукции магнитного поля вдоль диаметра на уровне: а – края магнитов; б – выхода из рабочей области

Fig. 8. Dependences of the transverse distribution of the magnetic field induction along the diameter at the level of: а – edges of the magnets; б – exit from the working area

По графикам, приведенным на рис. 8, можно судить, что с увеличением количества используемых магнитов растет значение индукции магнитного поля у стенок, а центральная область с неизменным значением индукции становится шире. Значение индукции магнитного поля спадает практически по экспоненциальному закону от стенок к центру области, что коррелирует с результатами, полученными в [27].

Целью подбора оптимальной конструкции магнитной системы служит обеспечение наибольшей ширины области с неизменным и достаточно малым значением индукции магнитного поля в центральной области рабочего объема, что дает возможность повысить количество электронов и ионов, имеющих стационарные орбиты в данной области магнитного поля. В указанных конструктивных условиях требуется применение не менее 16 магнитов для получения оптимальной формы распределения магнитной индукции. При этом в случае использования 12 или менее магнитов наблюдается провал в графике распределения индукции магнитного поля вблизи стенок (рис. 8), что делает невозможным сжатие паро-плазменного потока, а применение мультикасповой системы – бесполезным.

Можно отметить, что, с одной стороны, малое количество используемых магнитов создает слишком слабое магнитное поле, с другой – слишком большое количество магнитов не только значительно усложняет конструкцию источника, но и приводит к нежелательному повышению уровня магнитной индукции в центральной области. Таким образом, в данном случае достаточно эффективным подходом может стать увеличение размеров применяемых магнитов, что позволит получить эффективное распределение магнитного поля при использовании несколько меньшего количества магнитов.

**Заключение.** Для удержания плазмы используется мультикасповое магнитное поле, которое обеспечивает повышенную плотность плазмы в

области извлечения и большой однородный объем плазмы. Было исследовано магнитное поле с целью увеличения плотности плазмы вдоль оси плазменной камеры (оси извлечения) и уменьшения потерь на рассеяние. Благодаря мультикасповому полю ионы движутся в плазме по спирали, удерживаются в центре в области слабого магнитного поля и перемещаются вдоль оси цилиндрической плазменной камеры. Траектории всех электронов также ограничены областью слабого поля. По мере увеличения количества магнитов объем удержания электронов становится больше и однороднее. Это увеличивает длину пробега электронов, время жизни и вероятность ионизации инертного газа. Поэтому удержание электронов необходимо для того, чтобы мультикасповый источник генерировал интенсивные пучки нейтральных частиц.

Результаты моделирования показывают, что существует оптимальное решение при выборе количества постоянных магнитов, удерживающих газоразрядную плазму. С одной стороны, эффект удержания растет при увеличении количества рядов постоянных магнитов, с другой – выход электронов из конуса потерь становится более частым с увеличением этого количества, что приводит к ухудшению качества выходного потока нейтральных частиц. Оптимальное количество постоянных магнитов выбирается из условия уравнивания этих двух конкурентных эффектов.

Можно отметить, что, несмотря на высокую эффективность моделирования в системе конечно-элементного анализа Ansys Electronics, в расширении Ansys Maxwell полученные результаты могут отличаться от реальных распределений индукции магнитного поля в мультикасповой системе. Таким образом, целесообразно проведение дополнительных экспериментов с применением датчиков магнитного поля для определения картины магнитных полей в собранном источнике ускоренных нейтральных частиц с мультикасповой системой.

#### Список литературы

1. Plasma of a vacuum-arc discharge for obtaining carbon-based coatings / M. I. Pikus, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin, S. A. Trifonov // J. of Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. 929. P. 012093. doi: 10.1088/1742-6596/929/1/012093.
2. Kostrin D. K., Lisenkov A. A. Surface modification by vacuum arc plasma source // Materials Sci. Forum. 2016. Vol. 843. P. 278–283. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.278.

3. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Кузьмичев А. И. Ионно-плазменные источники для плазмохимического синтеза функциональных покрытий. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 166 с.
4. Cleaning of the dielectric surfaces using a controlled gas-discharge source of fast neutral particles / A. S. Fadeev, A. S. Talanov, D. K. Kostrin, S. A. Trifonov, A. A. Lisenkov, V. D. Goncharov // J. of Phys.: Conf. 2017.

Vol. 872. P. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/872/1/012021.

5. Simon V. A., Kostrin D. K., Trifonov S. A. Development of a source of accelerated neutral particles for the final purification of dielectric substrates // *AIP Conf. Proc.* 2021. Vol. 2356. P. 020021. doi: 10.1063/5.0052918.

6. Nanobeam production with the multicusp ion source / Y. Lee, Q. Ji, K. N. Leung, N. Zahir // *Rev. of Scientific Instruments.* 2000. Vol. 71, № 2. P. 722–724. doi: 10.1063/1.1150273.

7. Effect of magnetic filter in a volume production multicusp ion source / A. George, S. Melanson, D. Potkins, M. Dehnel, H. McDonald, C. Philpott, N. G. R. Broderick // *AIP Conf. Proc.* 2018. Vol. 2052. P. 050015. doi: 10.1063/1.5083769.

8. Recent negative ion source activity at JYFL / T. Kalvas, O. Tarvainen, J. Komppula, M. Laitinen, T. Sajavaara, H. Koivisto, A. Jokinen, M. P. Dehnel // *AIP Conf. Proc.* 2013. Vol. 1515. P. 349–358. doi: 10.1063/1.4792803.

9. New commissioning results of the MIST-1 multicusp ion source / D. Winklehner, J. Conrad, J. Smolsky, L. Waites, P. Weigel // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2022. Vol. 2244. P. 012013. doi: 10.1088/1742-6596/2244/1/012013.

10. Вересов О. Л., Григоренко С. В., Удовиченко С. Ю. Условия формирования пучка H<sup>-</sup>/D<sup>-</sup> в объемно-плазменном источнике с магнитным фильтром // *Журн. технической физики.* 2000. Т. 70, № 2. С. 95–101.

11. The design of high power, external antennas for radio frequency multicusp ion sources / R. F. Welton, M. P. Stockli, R. T. Roseberry, Y. Kang, R. Keller // *Rev. of Scientific Instruments.* 2004. Vol. 75, № 5. P. 1789–1792. doi: 10.1063/1.1699452.

12. High-current H<sup>+</sup> beams from a filament-driven multicusp ion source / D. Winklehner, J. M. Conrad, J. Smolsky, L. H. Waites // *Rev. of Scientific Instruments.* 2021. Vol. 92, № 12. P. 123301. doi: 10.1063/5.0063301.

13. Ablation plasma transport using multicusp magnetic field for laser ion source / K. Takahashi, M. Umezawa, T. Uchino, K. Ikegami, T. Sasaki, T. Kikuchi, N. Harada // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2016. Vol. 717. P. 012113. doi: 10.1088/1742-6596/717/1/012113.

14. Takamura S. Characteristics of the compact plasma device AIT-PID with multicusp magnetic confinement // *IEEJ Transactions on Elect. and Electronic Engin.* 2012. Vol. 7, № S1. P. S19–S24. doi: 10.1002/tee.21801.

15. H<sup>-</sup> beam emittance analysis in a multicusp ion source / A. George, T. Kalvas, S. Melanson, M. Dehnel, N. G. R. Broderick // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2022. Vol. 2244. P. 012038. doi: 10.1088/1742-6596/2244/1/012038.

16. Zhan H., Hu C. Kinetic solutions for electrons in multi-cusp ion source // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99, № 22. P. 221501. doi: 10.1063/1.3664347.

17. Multicusp trap as model of plasma neutralizer for ITER neutral beam injector / V. A. Belyaev, M. M. Dubrovin, P. M. Kosarev, A. A. Skovoroda, A. V. Spitsyn, A. A. Terent'ev, S. V. Yanchenkov, V. A. Zhil'tsov, V. F. Zubarev // *Fusion Sci. and Technol.* 2005. Vol. 47, № 1T. P. 124–127. doi: 10.13182/FST05-A622.

18. Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения / В. П. Будаев, С. Д. Федорович, М. В. Лукашевский, Ю. В. Мартыненко, М. К. Губкин, А. В. Карпов, А. В. Лазукин, Е. А. Шестаков // *Вопр. атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез.* 2017. Т. 40, № 3. С. 23–36. doi: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-23-36.

19. Измерение концентрации примесей в пристеночной плазме при испытании макетов первой стенки термоядерного реактора в установке ПЛМ / Д. И. Кавыршин, В. П. Будаев, С. Д. Федорович, А. В. Карпов, В. Ф. Чиннов, М. В. Лукашевский, В. Ч. Куанг, Е. А. Муравьева, А. С. Мязин, А. Г. Агеев // *Вопр. атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез.* 2022. Т. 45, № 2. С. 55–62. doi: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-55-62.

20. Мартыненко Ю. В., Будаев В. П. Плазменная технология формирования поверхности электродов кардиостимуляторов из рутения // *Вестн. МЭИ.* 2019. № 6. С. 64–70. doi: 10.24160/1993-6982-2019-6-64-70.

21. The PLM-2 plasma device for full-scale tests of fusion reactor materials with stationary plasma loads: design parameters / V. P. Budaev, A. Dedov, A. T. Komov, S. D. Fedorovich, Z. A. Zakletskii // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2019. Vol. 1383. P. 012016. doi: 10.1088/1742-6596/1383/1/012016.

22. Исследование компонентов защитной графитовой облицовки камеры токамака T-15МД стационарными плазменными нагрузками в установке ПЛМ и мощными электронными пучками / С. Д. Федорович, А. В. Карпов, В. П. Будаев, С. А. Грашин, М. К. Губкин, А. П. Слива, Ю. В. Мартыненко, А. Ю. Марченков, М. В. Лукашевский, З. А. Заклецкий, Г. Б. Васильев, К. А. Рогозин, В. Ч. Куанг // *Физика плазмы.* 2021. Т. 47, № 4. С. 316–326. doi: 10.31857/S0367292121030069.

23. Influence of material and geometrical properties of permanent magnets on cogging torque of BLDC / M. Yildirim, H. Kurum, D. Miljavec, S. Corovic // *Engin., Technol. and Appl. Sci. Research.* 2018. Vol. 8, № 2. P. 2656–2662. doi: 10.48084/etasr.1725.

24. Hosseinzadeh M., Afarideh H. Numerical simulation for optimization of multipole permanent magnets of multicusp ion source // *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 2013. Vol. 735. P. 416–421. doi: 10.1016/j.nima.2013.09.011.

25. Azadboni F. K., Sedaghatizade M., Sepanloo K. Design studies of a multicusp ion source with FEMLAB simulation // *J. of Fusion Energy.* 2010. Vol. 29, № 1. P. 5–12. doi: 10.1007/s10894-009-9219-9.

26. Azadboni F. K., Sedaghatizade M. Negative ion confinement in the multicusp ion source // *J. of Fusion Energy.* 2010. Vol. 29. P. 168–176. doi: 10.1007/s10894-009-9252-8.

27. Kim J. H. Numerical simulation of a multi-cusp ion source for high current H<sup>-</sup> cyclotron at RISP // *Phys. Proc.* 2015. Vol. 66. P. 498–505. doi: 10.1016/j.phpro.2015.05.065.



### Информация об авторах

**Трифонов Сергей Александрович** – канд. техн. наук, руководитель проекта. АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», ГК «Росатом», 2-й Муринский пр., д. 28, Санкт-Петербург, 194021, Россия.  
E-mail: triser89@gmail.com

**Воробьев Кирилл Сергеевич** – студент гр. 8202. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197376, Россия; инженер-исследователь. АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», ГК «Росатом», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.  
E-mail: kirill1504spb@gmail.com

**Кострин Дмитрий Константинович** – д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197376, Россия.  
E-mail: dkkostrin@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

**Марцынюков Сергей Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197376, Россия.  
E-mail: sergm2006@mail.ru

### References

1. Plasma of a vacuum-arc discharge for obtaining carbon-based coatings / M. I. Pikus, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin, S. A. Trifonov // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2017. Vol. 929. P. 012093. doi: 10.1088/1742-6596/929/1/012093.
2. Kostrin D. K., Lisenkov A. A. Surface modification by vacuum arc plasma source // *Materials Sci. Forum*. 2016. Vol. 843. P. 278–283. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.278.
3. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Kuz'michev A. I. Ionno-plazmennye istochniki dlja plazmohimicheskogo sinteza funkcional'nyh pokrytij. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2019. 166 s. (In Russ.).
4. Cleaning of the dielectric surfaces using a controlled gas-discharge source of fast neutral particles / A. S. Fadeev, A. S. Talanov, D. K. Kostrin, S. A. Trifonov, A. A. Lisenkov, V. D. Goncharov // *J. of Phys.: Conf.* 2017. Vol. 872. P. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/872/1/012021.
5. Simon V. A., Kostrin D. K., Trifonov S. A. Development of a source of accelerated neutral particles for the final purification of dielectric substrates // *AIP Conf. Proc.* 2021. Vol. 2356. P. 020021. doi: 10.1063/5.0052918.
6. Nanobeam production with the multicusp ion source / Y. Lee, Q. Ji, K. N. Leung, N. Zahir // *Rev. of Scientific Instruments*. 2000. Vol. 71, № 2. P. 722–724. doi: 10.1063/1.1150273.
7. Effect of magnetic filter in a volume production multicusp ion source / A. George, S. Melanson, D. Potkins, M. Dehnel, H. McDonald, C. Philpott, N. G. R. Broderick // *AIP Conf. Proc.* 2018. Vol. 2052. P. 050015. doi: 10.1063/1.5083769.
8. Recent negative ion source activity at JYFL / T. Kalvas, O. Tarvainen, J. Komppula, M. Laitinen, T. Sajavaara, H. Koivisto, A. Jokinen, M. P. Dehnel // *AIP Conf. Proc.* 2013. Vol. 1515. P. 349–358. doi: 10.1063/1.4792803.
9. New commissioning results of the MIST-1 multicusp ion source / D. Winklehner, J. Conrad, J. Smolsky, L. Waites, P. Weigel // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2022. Vol. 2244. P. 012013. doi: 10.1088/1742-6596/2244/1/012013.
10. Veresov O. L., Grigorenko S. V., Udovichenko S. Ju. Uslovija formirovanija puchka H-/D- v ob'emno-plazmennom istochnike s magnitnym fil'trom // *Zhurn. tehnicheckoj fiziki*. 2000. T. 70, № 2. S. 95–101. (In Russ.).
11. The design of high power, external antennas for radio frequency multicusp ion sources / R. F. Welton, M. P. Stockli, R. T. Roseberry, Y. Kang, R. Keller // *Rev. of Scientific Instruments*. 2004. Vol. 75, № 5. P. 1789–1792. doi: 10.1063/1.1699452.
12. High-current H+2 beams from a filament-driven multicusp ion source / D. Winklehner, J. M. Conrad, J. Smolsky, L. H. Waites // *Rev. of Scientific Instruments*. 2021. Vol. 92, № 12. P. 123301. doi: 10.1063/5.0063301.
13. Ablation plasma transport using multicusp magnetic field for laser ion source / K. Takahashi, M. Umezawa, T. Uchino, K. Ikegami, T. Sasaki, T. Kikuchi, N. Harada // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2016. Vol. 717. P. 012113. doi: 10.1088/1742-6596/717/1/012113.
14. Takamura S. Characteristics of the compact plasma device AIT-PID with multicusp magnetic confinement // *IEEJ Transactions on Elect. and Electronic Engin.* 2012. Vol. 7, № S1. P. S19–S24. doi: 10.1002/tee.21801.

15. H- beam emittance analysis in a multicusp ion source / A. George, T. Kalvas, S. Melanson, M. Dehnel, N. G. R. Broderick // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2022. Vol. 2244. P. 012038. doi: 10.1088/1742-6596/2244/1/012038.
16. Zhan H., Hu C. Kinetic solutions for electrons in multi-cusp ion source // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99, № 22. P. 221501. doi: 10.1063/1.3664347.
17. Multicusp trap as model of plasma neutralizer for ITER neutral beam injector / V. A. Belyaev, M. M. Dubrovin, P. M. Kosarev, A. A. Skovoroda, A. V. Spitsyn, A. A. Terent'ev, S. V. Yanchenkov, V. A. Zhil'tsov, V. F. Zubarev // *Fusion Sci. and Technol.* 2005. Vol. 47, № 1T. P. 124–127. doi: 10.13182/FST05-A622.
18. Plazmennaja ustanovka NIU «Mjel» dlja ispytaniy tugoplavkih metallov i sozdaniya vysokoporistykh materialov novogo pokoleniya / V. P. Budaev, S. D. Fedorovich, M. V. Lukashevskij, Ju. V. Martynenko, M. K. Gubkin, A. V. Karpov, A. V. Lazukin, E. A. Shestakov // *Vopr. atomnoj nauki i tehniki. Ser.: Termodjadernyj sintez*. 2017. T. 40, № 3. S. 23–36. doi: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-23-36. (In Russ.).
19. Izmerenie koncentracii primesej v pristenochnoj plazme pri ispytanii maketov pervoj stenki termodjadernogo reaktora v ustanovke PLM / D. I. Kavyrshin, V. P. Budaev, S. D. Fedorovich, A. V. Karpov, V. F. Chinnov, M. V. Lukashevskij, V. Ch. Kuang, E. A. Murav'eva, A. S. Mjazin, A. G. Ageev // *Vopr. atomnoj nauki i tehniki. Ser.: Termodjadernyj sintez*. 2022. T. 45, № 2. S. 55–62. doi: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-55-62. (In Russ.).
20. Martynenko Ju. V., Budaev V. P. Plazmennaja tehnologija formirovaniya poverhnosti jelektrodov kardiostimulyatorov iz ruteniya // *Vestn. Mjel.* 2019. № 6. S. 64–70. doi: 10.24160/1993-6982-2019-6-64-70. (In Russ.).
21. The PLM-2 plasma device for full-scale tests of fusion reactor materials with stationary plasma loads: design parameters / V. P. Budaev, A. Dedov, A. T. Komov, S. D. Fedorovich, Z. A. Zakletskii // *J. of Phys.: Conf. Series*. 2019. Vol. 1383. P. 012016. doi: 10.1088/1742-6596/1383/1/012016.
22. Issledovanie komponentov zashhitnoj grafitovoj oblicovki kamery tokamaka T-15MD stacionarnymi plazmennymi nagruzkami v ustanovke PLM i moshhnymi jelektronnymi puchkami / S. D. Fedorovich, A. V. Karpov, V. P. Budaev, S. A. Grashin, M. K. Gubkin, A. P. Sliva, Ju. V. Martynenko, A. Ju. Marchenkov, M. V. Lukashevskij, Z. A. Zaklekkij, G. B. Vasil'ev, K. A. Rogozin, V. Ch. Kuang // *Fizika plazmy*. 2021. T. 47, № 4. S. 316–326. doi: 10.31857/S0367292121030069. (In Russ.).
23. Influence of material and geometrical properties of permanent magnets on cogging torque of BLDC / M. Yildirim, H. Kurum, D. Miljavec, S. Corovic // *Engin., Technol. and Appl. Sci. Research*. 2018. Vol. 8, № 2. P. 2656–2662. doi: 10.48084/etasr.1725.
24. Hosseinzadeh M., Afarideh H. Numerical simulation for optimization of multipole permanent magnets of multicusp ion source // *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2013. Vol. 735. P. 416–421. doi: 10.1016/j.nima.2013.09.011.
25. Azadboni F. K., Sedaghatizade M., Sepanloo K. Design studies of a multicusp ion source with FEMLAB simulation // *J. of Fusion Energy*. 2010. Vol. 29, № 1. P. 5–12. doi: 10.1007/s10894-009-9219-9.
26. Azadboni F. K., Sedaghatizade M. Negative ion confinement in the multicusp ion source // *J. of Fusion Energy*. 2010. Vol. 29. P. 168–176. doi: 10.1007/s10894-009-9252-8.
27. Kim J. H. Numerical simulation of a multi-cusp ion source for high current H- cyclotron at RISP // *Phys. Procedia*. 2015. Vol. 66. P. 498–505. doi: 10.1016/j.phpro.2015.05.065.

#### Information about the authors

**Sergey A. Trifonov** – Cand. Sci. (Eng.), project supervisor. JSC «V. G. Khlopin Radium Institute», SC «Rosatom», 2nd Murinsky pr., 28, Saint Petersburg, 194021, Russia.  
E-mail: triser89@gmail.com

**Kirill S. Vorobyev** – student of gr. 8202. Saint Petersburg Electrotechnical University, Professor Popov St., 5F, Saint Petersburg, 197376, Russia; engineer-researcher. JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», SC «Rosatom», rd. to Metallostroy, 3, Saint Petersburg, 196641, Russia.  
E-mail: kirill1504spb@gmail.com

**Dmitry K. Kostrin** – Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor of the department of electronic instruments and devices. Saint Petersburg Electrotechnical University, Professor Popov St., 5F, Saint Petersburg, 197376, Russia.  
E-mail: dkkostrin@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

**Sergey A. Martsinukov** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant professor of the department of electronic instruments and devices. Saint Petersburg Electrotechnical University, Professor Popov St., 5F, Saint Petersburg, 197376, Russia.  
E-mail: sergm2006@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; принята к публикации после рецензирования 13.03.2024; опубликована онлайн 24.05.2024.

Submitted 27.02.2024; accepted 13.03.2024; published online 24.05.2024.