

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.3.038.612

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КАТОДНОГО ЭЛЕКТРОДА

© 2024 г. Н. Ю. Самароков*

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: nikita.samarokov@gmail.com

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

Для медицинского ускорителя на 6 МэВ был разработан компактный модифицированный источник электронов. Особенность данной пушки состоит в существенно уменьшенном конечном раз-
мере, за счет изменения схемы подвода питания. В данной работе было изучено проникновение магнитного поля внутрь катодного электрода в зависимости от радиуса отверстий для откачки и их количества, а также возможность последующего захвата электронов.

Ключевые слова: термоэлектронная пушка, магнитные поля, траектория пучка

DOI: 10.56304/S2079562923030284

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов применяются в различных областях науки и народного хозяйства. Широкое применение линейные ускорители электронов нашли в медицине, например, для стерилизации медицинского оборудования или же как источник рентгеновского и электронного излучения аппаратов для радиотерапии и радиохирургии.

Коллективом НИЯУ МИФИ совместно с НПП Корад был разработан ряд ускорителей промышленного назначения [1–3]. В настоящее время разрабатывается компактный линейный медицинский ускоритель электронов для радиотерапии на 6 МэВ [4–6]. Его основой является бипериодическая ускоряющая структура с ячейками связи. Положение в пространстве данного ускорителя в процессе эксплуатации изменяется в пределах 180 градусов. В связи с этим остро возникает вопрос его веса и размеров.

Источником электронов в установках подобного класса служит электронная пушка с термоэмиссионным катодом — практически безальтернативным по техническим, экономическим и эксплуатационным показателям.

Подвод мощности накала к термоэмиссионной пушке обычно расположен параллельно оси пролета пучка, однако это значительно увеличивает продольные размеры источника. В связи с этим была рассмотрена возможность подведения питания к электронной пушке не параллельно, а перпендикулярно оси, существенно сокращая таким образом длину ускорителя [7].

Ниже представлены результаты оптимизации геометрии термоэмиссионного источника электронов, предназначенного для линейных ускорителей медицинского назначения при изменении конфигурации системы питания с целью минимизации габаритных размеров источника. Рассмотрены вопросы выбора геометрии катодного электрода для минимизации влияния магнитного поля при перпендикулярном включении подвода питания.

РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ КАТОДНОГО ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫМ ПОДВОДОМ ПИТАНИЯ

Была создана модель электронной пушки с двумя вариантами подвода питания, общие виды пушки с параллельным и перпендикулярным подводом питания приведены на рис. 1а и 1б соответственно.

При изменении подвода питания с параллельного оси пролета пучка на перпендикулярный были рассмотрены различные варианты строения катодного электрода. Основным фактором, влияющим на выбор геометрии катодного электрода и соответственно возможность такого переноса питания пушки будет являться величина магнитного поля на внутри катода и в непосредственной близости от него, так как оно может захватывать вылетающие электроны и убирать их из последующего цикла ускорения [8]. На величину магнитного поля внутри катодного электрода из всех геометрических параметров в первую очередь влияет

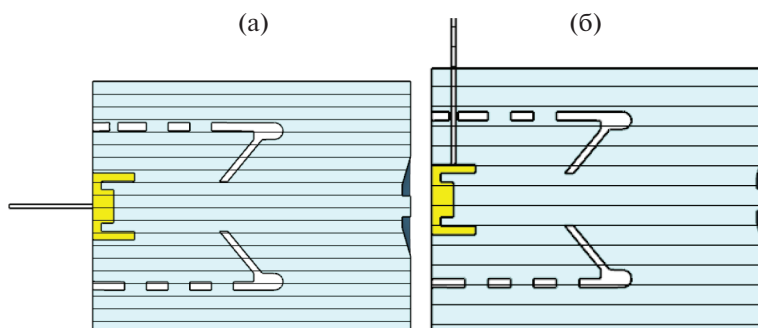


Рис. 1. Общий вид электронной пушки с (а) параллельным подводом питания и (б) перпендикулярным подводом питания.

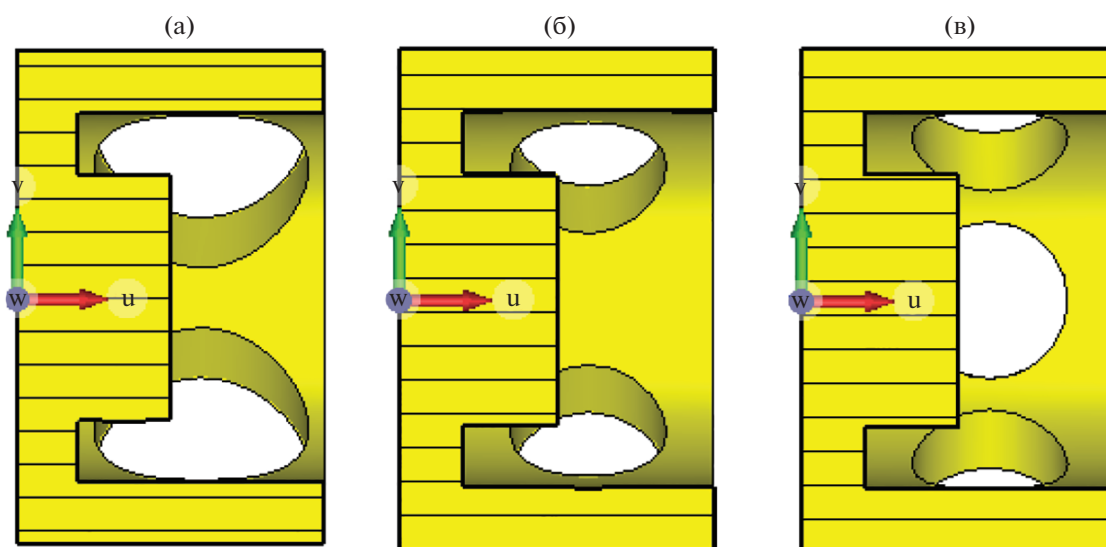


Рис. 2. Общий вид трех вариантов катодного электрода с (а) 4 отверстиями радиуса 3.5 мм; (б) 4 отверстиями радиуса 2.5 мм; (в) 6 отверстиями радиуса 2.5 мм.

размер и количество отверстий в нем. Но в то же время отверстия нельзя убрать совсем, так как они нужны для эффективной вакуумной откачки прикатодной области. Исходя из сказанного выше можно сделать вывод что, задача сводится к нахождению оптимального размера и количества отверстий в катодном электроде для решения этих двух задач одновременно. Методом численного моделирования был проведен анализ характеристик различных моделей катодного узла с различным диаметром и количеством отверстий; геометрия этих моделей иллюстрируется на рис. 2. Для данных моделей были рассчитаны магнитные поля, возникающие вокруг проводника, питающего катод. Величина тока питания при расчетах составляла 10А.

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАЕКТОРИЮ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫЛЕТАЮЩИХ С КАТОДА ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫМ ПОДВОДОМ ПИТАНИЯ

Следующим этапом было моделирование динамики пучка в пушке с полученными ранее распределениями магнитного поля. В расчетах запускались 81 электрон с начальной энергией 7 эВ и током пучка 270 мА. Напряжение на катодном электроде составляло 20 кВ, а сеточное напряжение составляло 19.2 кВ. Рассматривались представленные выше варианты катодного электрода, каждый для параллельного и перпендикулярного подключения питания.

На рис. 3а, 3б представлены траектории пролета электронов в пушке с катодным электродом с 4 от-

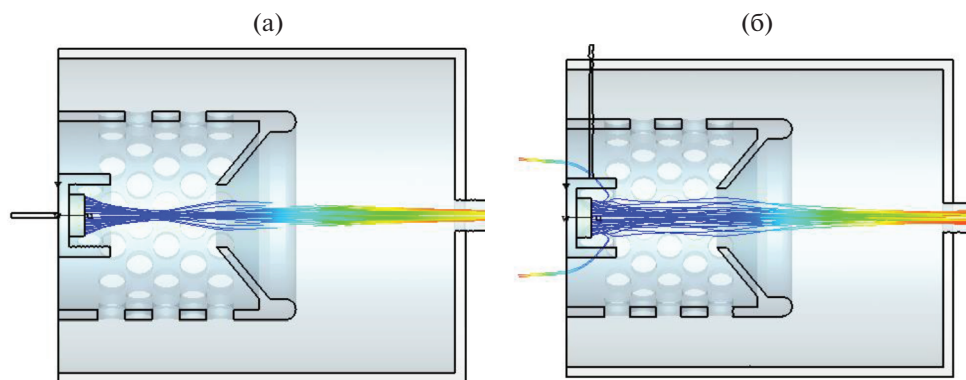


Рис. 3. Траектория полета электронов для (а) параллельного подключения и (б) перпендикулярного подключения.

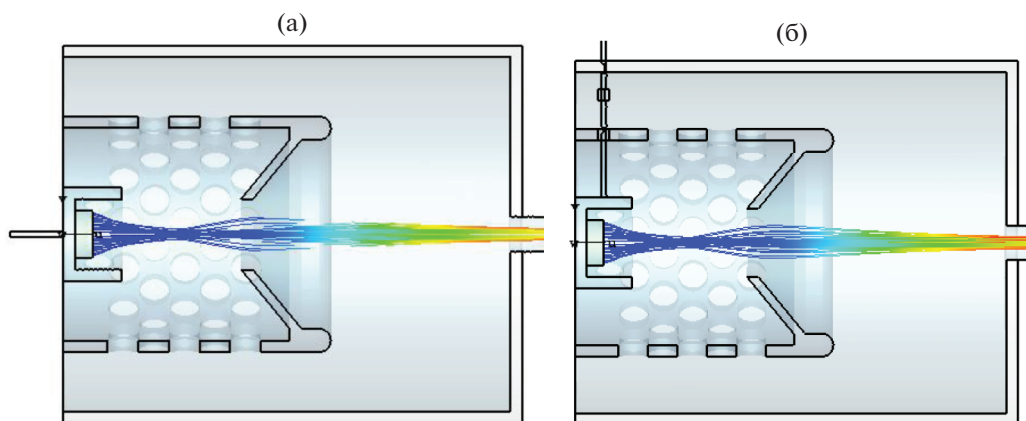


Рис. 4. Траектория полета электронов для (а) параллельного подключения и (б) перпендикулярного подключения.

верстиями радиуса 3.5 мм для параллельного и перпендикулярного подключения питания соответственно. Из рисунков видно, что магнитное поле оказывает влияние на электроны при перпендикулярном подключении питания. Однако, магнитным полем захватывается 8 электронов из 81 что составляет примерно 10% от общего количества.

На рис. 4а, 4б представлены траектории пролета электронов в пушке с катодным электродом с 4 отверстиями радиуса 2.5 мм для параллельного и перпендикулярного подключения питания соответственно. Для данного варианта катодного электрода видно, что магнитное поле внутри него не имеет такого влияния на пучок электронов как в предыдущем случае при перпендикулярном подключении и не отличается от траекторий электронов для параллельного подключения с этим же катодным электродом.

На рис. 5а, 5б представлены траектории пролета электронов в пушке с катодным электродом с 6 отверстиями радиуса 2.5 мм для параллельного и перпендикулярного подключения питания соответственно.

Для данного варианта катодного электрода видно, что магнитное поле внутри него не имеет такого

влияния на пучок электронов как в первом случае при перпендикулярном подключении и не отличается от траекторий электронов для параллельного подключения с этим же катодным электродом.

Из представленных выше расчетов видно, что из рассмотренных наилучшими параметрами обладает вариант катодного электрода с 6 отверстиями радиуса 2.5 мм, так как этих отверстий достаточно для откачки, но при этом магнитное поле внутри катодного электрода при перпендикулярном подключении питания не сильно отличается от значений при параллельном подключении питания и при расчетных значениях тока в цепи накала не происходит существенного ухудшения параметров динамики электронного потока. Следовательно, вариант с перпендикулярным подключением питания к пушке возможен, следует использовать катодный электрод с 6 отверстиями радиуса 2.5 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для созданных моделей с различными вариантами катодных электродов были рассчитаны магнитные поля и так же промоделированы траектории пролета электронов в пушке. В результате

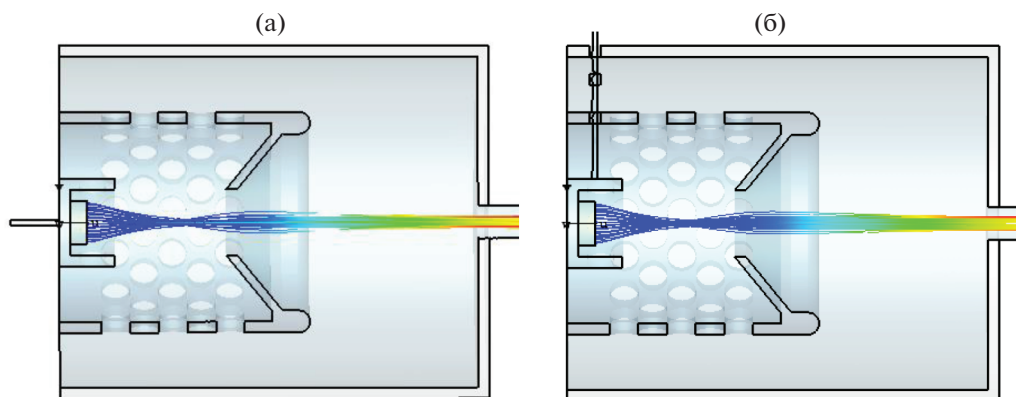


Рис. 5. Траектория полета электронов для (а) параллельного подключения и (б) перпендикулярного подключения.

было выявлено, что вариант с перпендикулярным подключением питания возможен, следует рассматривать варианты электронной пушки с катодным электродом с 6 отверстиями радиуса 2.5 мм, так как магнитное поле внутри катодного электрода в таком случае недостаточно велико для захвата электронов и в то же время остается достаточная площадь для откачки газов из пространства катодного электрода.

На текущий момент данная пушка изготовлена, собрана и успешно прошла первичные испытания. Получены экспериментальные данные, которые хорошо согласуются с результатами моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Basyl D.S. et al.* // Proc. 7th Intl. Particle Accelerator Conf. 2016. P. 1794.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-TU-POW023>
2. *Polozov S.M., Rashchikov V.I., Demsky M.I.* // Proc. XXV Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2016). 2017. P. 493.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-WEPSB057>
3. *Basyl D.S. et al.* // Proc. XXV Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2016). 2017. P. 173.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-TU-CASH02>
4. *Batov A.A. et al.* // Proc. CERN-Proc. 2021. P. 186.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA42>
5. *Батов А.А. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (3). С. 269.
<https://doi.org/10.56304/S2079562922050050> [*Batov A.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (10). P. 1733].
<https://doi.org/10.1134/S1063778822100064>
6. *Збруев Р.А., Батов А.А.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (4). С. 385–388.
<https://doi.org/10.56304/S2079562922050554> [*Zbruev R.A., Batov A.A.* // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (11). P. 1890].
<https://doi.org/10.1134/S1063778822100660>
7. *Самароков Н.Ю.* // Сб. тр. VIII Междунар. конф. “Лазерные, плазменные исследования и технологии”. 2022. С. 321.

Optimization of Cathode Electrode Geometry

N. Yu. Samarokov*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: nikita.samarokov@gmail.com

Received June 20, 2023; revised July 31, 2023; accepted August 7, 2023

Abstract—A compact modified thermionic electron source was developed for the 6 MeV medical accelerator. This gun features significantly reduced size, due to a change in the power supply feeder scheme. In this work, the penetration of the magnetic field into the cathode electrode was studied depending on the radius of the holes for pumping and their number, as well as the possibility of subsequent capture of electrons by it.

Keywords: thermionic gun, magnetic fields, beam trajectory