

## ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ УСТАНОВКИ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

*Н. Ю. Самароков<sup>a, 1</sup>, А. А. Батов<sup>a</sup>, Р. А. Збруев<sup>a</sup>, М. А. Гусарова<sup>a</sup>,  
С. М. Полозов<sup>a</sup>, М. В. Лалаян<sup>a</sup>, С. А. Смирнов<sup>a</sup>, В. И. Ращиков<sup>a</sup>,  
Т. В. Бондаренко<sup>a</sup>, В. Л. Шатохин<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

Представлены результаты финальных этапов проектирования и оптимизации ускоряющей структуры и источника электронов для установки радиационной терапии. Описаны процессы тренировки и проведения технических испытаний для линейного ускорителя. Продемонстрированы промежуточные результаты испытаний, а также представлен план дальнейших работ по проекту.

The paper presents current status of the final stages of the accelerating structure and electron source for medical applications, including designing and optimization. The training process and conduction of technical tests for the linear accelerator are described. Intermediate test results are demonstrated, and a plan for further work on the project is presented.

PACS: 29.20.Ej; 87.50.–а

### ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов являются одними из наиболее часто встречающихся источников ионизирующего излучения в комплексах радиотерапии. Коллективами кафедры электрофизических установок НИЯУ МИФИ и АО «НИИТФА» ведется совместная работа по созданию такого комплекса. Габаритные размеры и масса ускорителя были значительно ограничены с целью обеспечения возможности изменения его положения до 180° во время эксплуатации установки.

В работе представлены решения, которые были реализованы в рамках данного проекта на примере ускоряющей структуры и источника электронов. Рассматриваются финальные стадии моделирования, изготовление узлов устройства, проведение испытаний.

---

<sup>1</sup>E-mail: NYSamarokov@mephi.ru

## ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ

В качестве источника заряженных частиц для установки была выбрана электронная пушка с термоэмиссионным катодом, что является оптимальным вариантом с точки зрения как технических, так и экономических показателей. Геометрия устройства основана на геометрии Пирса, успешно реализованной в ряде других установок [1–3].

Как упоминалось ранее, проект комплекса радиационной терапии подразумевает значительные ограничения габаритных размеров ускорителя. Поэтому, хотя подвод мощности накала к пушке обычно располагается параллельно оси пролетного канала ускоряющей структуры, необходимо было рассмотреть модификацию, при которой подвод мощности можно было реализовать перпендикулярно оси [4]. Таким образом предполагалось сократить общую длину ускорителя.

Основной проблемой при разработке электронной пушки подобной конструкции является потенциальное влияние магнитного поля, создаваемого импульсным током в тоководе, на динамику электронов вблизи катода. Этот эффект может привести к закручиванию траекторий электронов, что не позволит вывести из пушки необходимый ток, а также усложнит согласование устройства с ускоряющей структурой.

Исходя из результатов моделирования динамики и пролета пучка электронов для источника сильнее всего на величину магнитного поля внутри катодного электрода оказывают влияние размеры отверстий в электроде и их количество. Отверстия необходимы для эффективного вакуумирования прикатодной области. По результатам моделирования вакуумной откачки и динамики источника электронов были определены оптимальный радиус (2,5 мм) и количество (6 шт.) отверстий, при которых частицы не захватываются магнитным полем и удается добиться необходимого уровня вакуума.

На рис. 1, *a* представлен общий вид модели электронной пушки, на рис. 1, *б* — вид катода с прикатодным электродом.

Изготовленная термоэмиссионная пушка была установлена на специализированный стенд для испытаний [5] (рис. 2). Проведено вакуумирование устройства, после чего выполнен ряд измерений: тока на выходе из пушки в зависимости от тока

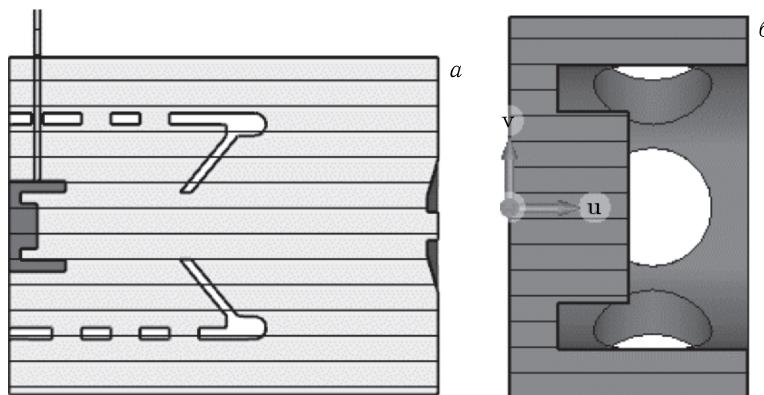


Рис. 1. Моделирование конструкции источника электронов. Электронная пушка (*а*) и катод с прикатодным электродом (*б*)

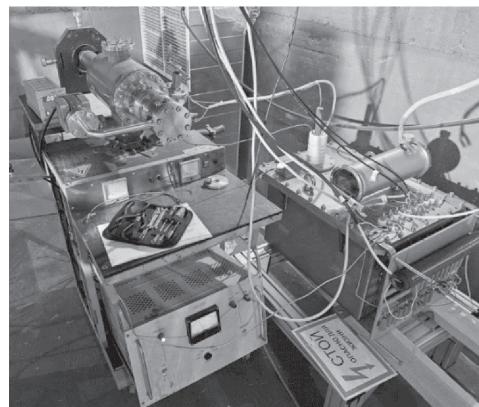


Рис. 2. Источник электронов на стенде для испытаний

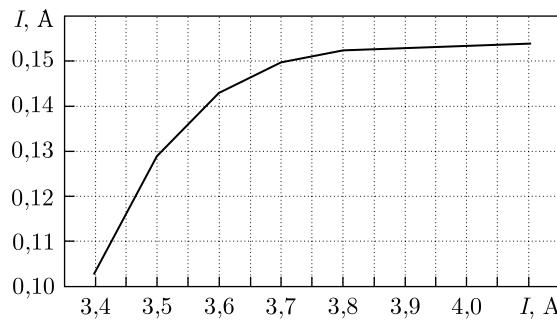


Рис. 3. Зависимость тока на выходе из источника электронов от тока накала

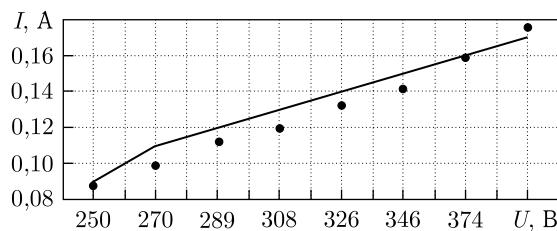


Рис. 4. Зависимость тока на выходе из пушки от напряжения на сетке: линия — экспериментальные данные; черные точки — значения, полученные теоретически

накала (рис. 3), тока на выходе в зависимости от напряжения на сетке (рис. 4). В результате выбрана рабочая точка — необходимая величина тока накала для получения расчетного значения тока пучка на выходе из устройства, а также подтверждено (см. рис. 4), что результаты моделирования и результаты проведения испытаний согласуются между собой.

## УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Ускоряющая структура состоит из трех ячеек группирователя и пяти регулярных ячеек [6]. За основу была взята модель бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи, которая ранее была использована коллективом НИЯУ МИФИ в ряде проектов [1–3]. Главными задачами при модификации моделей являются: настройка на рабочую частоту системы, получение высоких значений коэффициента связи и шунтового сопротивления структуры при условии жестких ограничений на размеры ускорителя, упомянутых ранее.

Для регулярных ячеек настройки на рабочую частоту удалось добиться с помощью варьирования диаметров ячеек, при этом оптимизация по электродинамическим характеристикам проводилась путем изменения конфигурации окон связи [7, 8]. В настройке группирователя в первую очередь необходимо было получить соотношения амплитуд электромагнитных полей в ячейках в диапазоне [0,4–1,0] при сохранении рабочей частоты (конкретные значения соотношений амплитуд были получены в результате моделирования динамики пучка с помощью программы BEAMDULAC-BL [9]). Кроме того, в геометрию первой ячейки группирователя были внесены изменения: удалены «носики».

Для устройства ввода мощности, представляющего собой прямоугольный волновод с сечением 72 × 34 мм и согласующей щелью, рассматривались две модификации — установка на пятую ячейку и седьмую [8, 10]. В финальной реализации выбор пал на вариант с узлом ввода на седьмой ячейке. Данная модификация является более удачной с точки зрения ускорителя в целом, так как упрощает размещение фокусирующей магнитной системы. Оптимизация ввода мощности проводилась путем варьирования радиуса ячейки с вводом и ширины согласующей щели.

В результате были получены модели, представленные на рис. 5, рассчитаны электродинамические характеристики структуры, а также построены вариационные характеристики [7, 8, 10].

Полученные для модели ускоряющей структуры данные были использованы в процессе изготовления ячеек (рис. 6). Вариационные характеристики позволяют проводить доработку элементов, при этом имеется возможность достаточно точно прогнозировать изменения электродинамических характеристик в процессе финальной обработки. В ходе производства контролировались: рабочая частота, добротность систе-

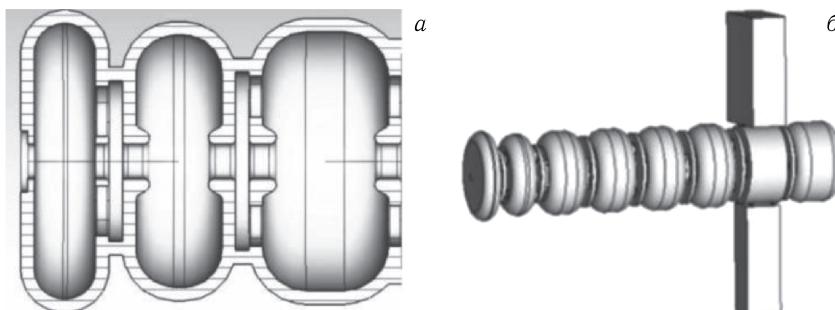


Рис. 5. Геометрия ячеек группирователя (а) и структуры с устройством ввода мощности в сборе (б)



Рис. 6. Комплект ускоряющих ячеек на этапе проведения измерений и доработки

мы, распределение амплитуды ускоряющего поля на оси структуры (методом малых возмущений). Были изменены геометрические размеры исходных моделей в соответствии с размерами изготовленных ячеек. Измеренные значения электродинамических характеристик хорошо согласуются с расчетными данными. После пайки ускоряющей структуры были проведены повторные измерения, которые подтвердили согласие результатов измерений и расчетных значений.

### ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК И СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

На следующем этапе проекта были выполнены стеновые испытания ускорителя с пучком, измерены ток, энергия и размеры пучка.

Ускорительная секция вместе с вакуумной системой и системой высокочастотного питания были смонтированы на специализированном стенде (рис. 7). Проведены

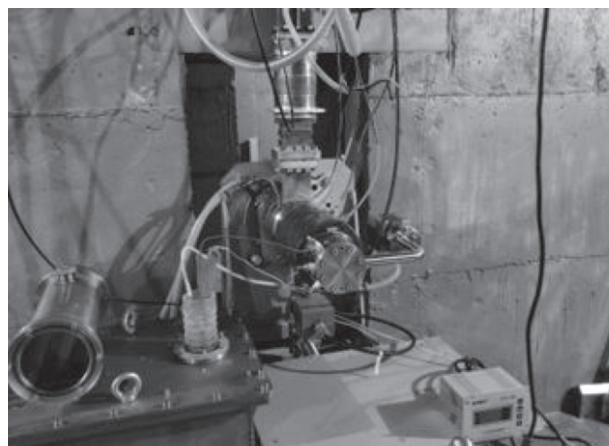


Рис. 7. Ускоритель в сборе на испытательном стенде

тренировки пушки и секции (с включением СВЧ-мощности без пучка и с пучком). После выхода ускорителя на удовлетворительный уровень вакуума были выполнены измерения параметров пучка. Технические условия проведения испытаний позволили достичь частоты повторения импульсов порядка нескольких десятков Гц. В результате измерений получены величины энергии пучка 6,3 МэВ и тока пучка в диапазоне 80–140 мА, что соответствует расчетным значениям. Кроме того, физический пуск ускорителя позволил выделить ряд рекомендаций по корректировке конструкторской документации с целью облегчения производства установки, ускорения процесса тренировки и, как следствие, повышения потенциала серийного производства продукта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе показан путь развития проекта: от этапа моделирования и выработки решений до физического пуска ускорителя. Продемонстрировано согласие результатов расчетов и измерений экспериментального образца.

В ближайшее время планируется проведение новой серии технических испытаний, в ходе которых предполагается выход на рабочую частоту повторения импульсов от источника СВЧ-питания, подтверждение значений параметров пучка, а также выполнение ряда дополнительных измерений.

**Благодарности.** Авторы благодарят коллективы: ООО «НПП “Корад”» (Санкт-Петербург) за предоставление оборудования и помещения для проведения испытаний, изготовление фокусирующих катушек, а также за помощь в проведении испытаний; ООО «Металекс» (Санкт-Петербург) за изготовление ускоряющей структуры и обвязки секций, мишенного узла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basyl D. S. et al. New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. 7th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2016), Busan, Korea, May 8–13, 2016. V. 7. P. 1794–1796.
2. Polozov S. M., Rashchikov V. I., Demsky M. I. Beam Dynamics in New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, 2016. P. 493–495.
3. Basyl D. S. et al. Commissioning and First Tests of the New Standing Wave 10 MeV Electron Accelerator // Ibid. P. 173–175.
4. Самароков Н. Ю. Оптимизация геометрии катодного электрода // Ядер. физика и инжиниринг. 2024. Т. 15, № 4. С. 368–371.
5. Samarov N. Y., Rashchikov V. I., Polozov S. M., Zbruev R. A. Preliminary Tests of a Modified Electron Source for a Medical Therapeutic Accelerator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21, No. 3. P. 337–340.
6. Batov A. A., Zbruev R. A., Gusarova M. A., Lalayan M. V., Polozov S. M. Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Applications // Proc. 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'21), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. Geneva: JACOW Publ., 2021. P. 186–188.
7. Batov A. A., Zbruev R. A., Gusarova M. A., Lalayan M. V. Optimization of Geometry of a Compact Accelerating Structure of S-Frequency Range for a Radiation-Therapy Facility // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85. P. 1733–1736.

8. *Batov A.A., Bondarenko T.V., Zbruev R.A., Gusarova M.A., Lalayan M.V., Shashkov Ya.V., Polozov S.M.* Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 4. P. 699–703.
9. *Bondarenko T.V., Masunov E.S., Polozov S.M.* BEAMDULAC-BL Code for 3D Simulation of Electron Beam Dynamics Taking into Account Beam Loading and Coulomb Field // Вопр. атом. науки и техники. 2013. Т. 6. С. 114–118.
10. *Zbruev R.A., Batov A.A.* Input Coupler of an Accelerating Structure of the S-Frequency Range for a Radiation Therapy Facility // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85, No. 11. P. 1890–1893.

Получено 28 октября 2024 г.