

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.644

### РАЗРАБОТКА ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 8 МэВ

© 2025 г. Р. А. Збруев<sup>a</sup>, \*, А. А. Батов<sup>a</sup>, Т. В. Бондаренко<sup>a</sup>, С. М. Полозов<sup>a</sup>, М. В. Лалаян<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: roman.zbruev@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 30.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Рассмотрены некоторые результаты проектирования линейного ускорителя электронов на энергию 8 МэВ, связанные с моделированием двухсекционной ускоряющей структуры и вводов высокочастотной мощности. Исследована динамика пучка электронов в ускорителе с помощью программы BEAMDULAC-BL. По результатам проведена настройка электродинамической модели ускоряющей структуры с вводами мощности, получены значения электродинамических характеристик.

**Ключевые слова:** Бипериодическая ускоряющая структура, электродинамические характеристики, линейный ускоритель электронов, линак S-частотного диапазона, устройство ввода мощности, динамика пучка электронов

**DOI:** 10.56304/S2079562925010270

#### ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов S-диапазона являются популярным видом установок прикладного назначения. Такие установки могут применяться в различных областях: стерилизация инструментов и продуктов питания, гамма-активационный анализ, дозиметрия, радиационная терапия. Коллективом кафедры электрофизических установок НИЯУ МИФИ совместно с НПП “Корад” (Санкт-Петербург) разработан ряд линейных ускорителей прикладного назначения на базе бипериодической ускоряющей структуры. Созданные по итогам разработки ускорители поставлены пользователям в России, Узбекистане, Вьетнаме, Республике Корея, на Филиппинах [1–6].

В работе представлен новый проект двухсекционного линейного ускорителя электронов прикладного назначения, который может быть использован для исследований радиоэлектронной аппаратуры на радиационную стойкость. Проведено численное моделирование динамики пучка электронов, на основании которого были выбраны параметры ускоряющей структуры. На следующем этапе была оптимизирована геометрия ускоряющей структуры, а также получены значения электродинамических характеристик.

Ускоряющая структура состоит из двух секций S-диапазона длиной 12 (из них 6 ячеек группирователя) и 8 ячеек соответственно. Для каждой из сек-

ций разработан симметричный ввод мощности. Вид ускоряющей структуры представлен на рис. 1.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Разработка проекта началась с этапа моделирования динамики пучка электронов. Для решения данной задачи применялась программа BEAMDULAC-BL из пакета BEAMDULAC, разработанная на кафедре электрофизических установок НИЯУ МИФИ. BEAMDULAC-BL используется для моделирования динамики пучка самосогласованным образом с учетом как квазистатической

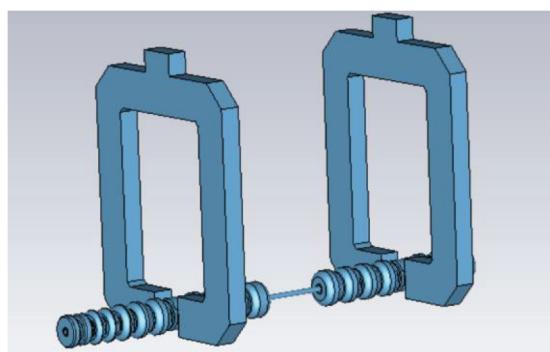
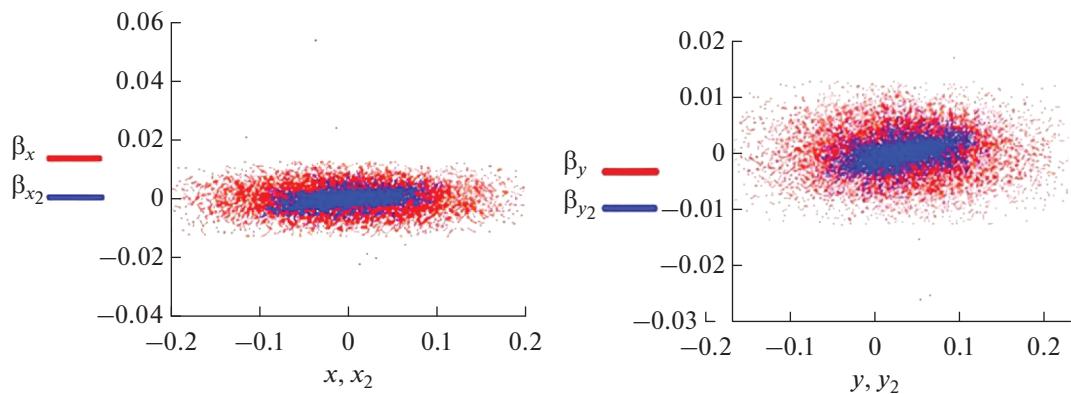


Рис. 1. Ускоряющая структура линейного ускорителя электронов прикладного назначения.



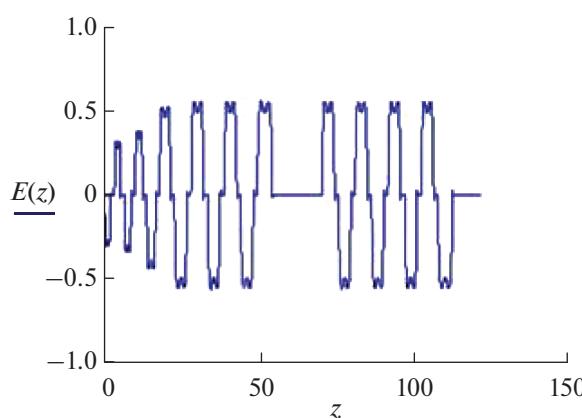
**Рис. 2.** Продольный эмиттанс пучка в пространстве координат и скоростей. Красным и синим цветом – эмиттанс на входе и выходе из структуры соответственно.

составляющей объемного заряда, так и эффекта нагрузки током в ускорителях на бегущей и стоячей волне [7–9].

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Соотношения значений напряженности электрического поля на оси ячеек ускоряющей структуры использованы в дальнейшем для проведения настройки и оптимизации ускоряющей структуры и вводов высокочастотной мощности.

### НАСТРОЙКА УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

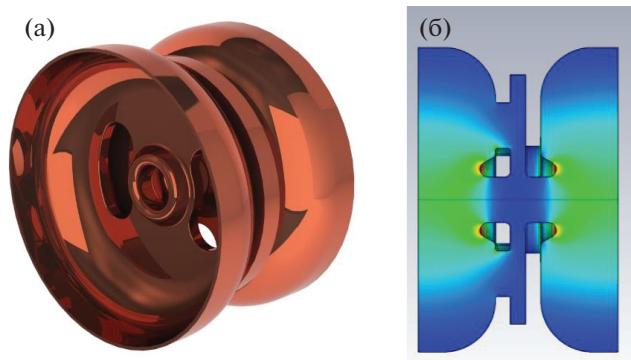
Настройка геометрии ускоряющей секции начиналась с регулярной ячейки. Она проводилась с целью максимизации добротности, коэффициента связи между соседними ячейками, минимизации коэффициента перенапряженности в структуре. Геометрия регулярной ячейки и топография электрического поля в ней представлены на рис. 4.



**Рис. 3.** Распределение продольной компоненты электрического поля.

Основная задача при проектировании данной ускоряющей структуры состояла в поддержании баланса между электродинамическими характеристиками (ЭДХ) с учетом сравнительно большого радиуса апертуры – 6 мм при радиусе ячейки 40 мм. Это добавило определенных сложностей при работе на следующем этапе – расчете группирователя, состоящего из 6 ячеек, где необходимо было настроить соотношения значений электрического поля на оси структуры в соседних ячейках в пределах от 0.6 до 1.0 (рис. 5).

Проблема заключается в том, что площадь окон связи увеличивается к началу группирователя, при этом внешний радиус ячейки уменьшается. Так как модели нужно было сделать технологически реализуемыми, необходимо было учесть зазоры между окнами связи и апертурой при проектировании. Путем увеличения объема ячеек связи и уменьшения носиков структуры удалось разработать соответствующую технологическим возможностям модель, получить искомые соотношения полей в группирователе и высокие значения ЭДХ



**Рис. 4.** Макет регулярной ячейки ускоряющей структуры (а) и топография электрического поля в ней (б).

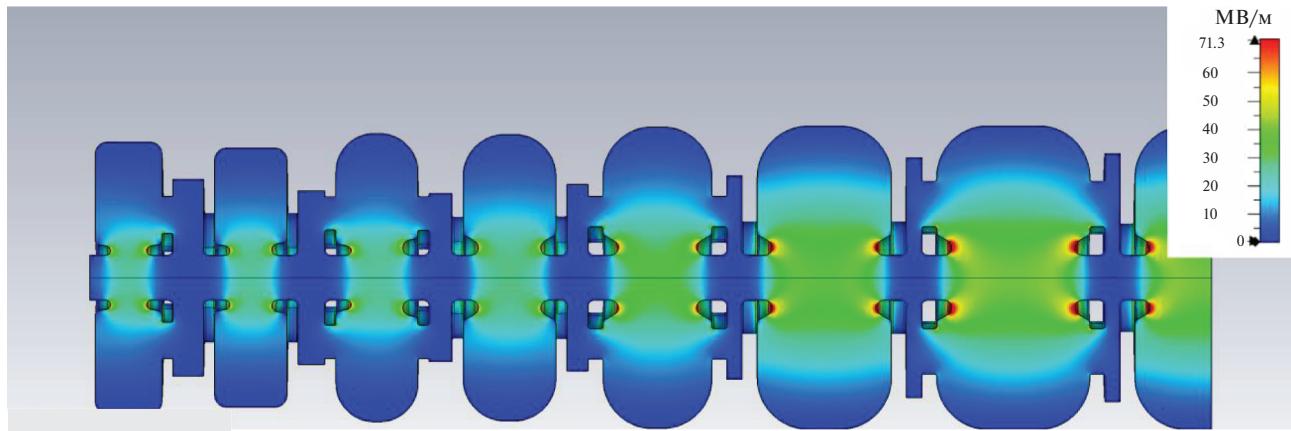


Рис. 5. Топография электрического поля в группирователе.

резонаторов (см. табл. 1). Коэффициент перенапряженности электрического поля в первых ячейках также удалось удержать на приемлемом уровне не более 2.5. Некоторые параметры ускоряющих структур представлены в табл. 1.

Отдельно настраивались первая и последняя ячейки каждой секции. Они не имеют окон связи с одной из сторон, поэтому без дополнительной настройки оказывают влияние на распределение полей во всей секции. Удалось сохранить выбросы поля в этих ячейках на требуемом уровне менее 5%.

Была также проведена дополнительная подстройка ячеек, содержащих симметричный ввод мощности с целью сохранения просадки поля в этих ячейках на уровне не более 5%. Распределение поля во второй ускоряющей секции, состоящей из 8 ячеек, представлено на рис. 6.

#### РАСЧЕТ ВАРИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕЙКИ СТРУКТУРЫ

После настройки секции и верификации полученных результатов с расчётами динамики были

получены вариационные характеристики основных параметров структуры (рис. 7). Таким образом можно будет оперативно отследить неточности при производстве и доработать методику изготовления с использованием заранее промоделированных возможностей компенсации возникших неточностей.

В процессе настройки структуры, используя опыт изготовления предыдущих ЛУЭ [2, 5, 10], была проведена работа по определению оптимальной геометрии скругления носиков структуры и окон связи. Данные размеры тяжело контролировать в процессе изготовления, а ошибки в исполнении этих размеров дают большое расхождение в соотношении электрических полей в соседних ячейках группирователя.

Для скругления носиков структуры нужно было найти оптимальный радиус, который дает больше пространства для увеличения ширины окон связи, но при этом не приводит к увеличению значения коэффициента перенапряженности. Зависимость изменения коэффициента перенапряженности по электрическому полю от радиуса скругления носика представлена на рис. 8.

Таблица 1. Параметры ускоряющих структур линейного ускорителя электронов прикладного назначения

Секция	Секция 1	Секция 2
Собственная добротность	16000	15200
Эффективное шунтовое сопротивление, МОм/м	79	78
Коэффициент связи между ячейками, %	10.6	10.6
Коэффициент перенапряженности	2.5	2.3

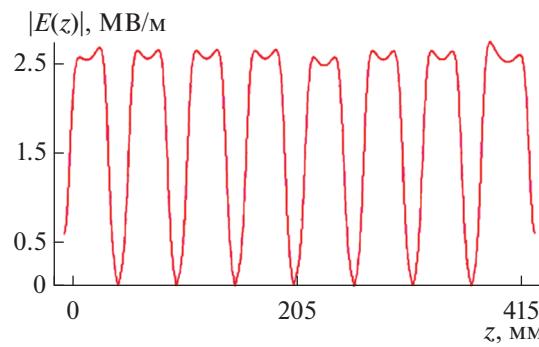


Рис. 6. Распределение модуля продольной составляющей электрического поля на оси 8-ми ячеекной структуры.

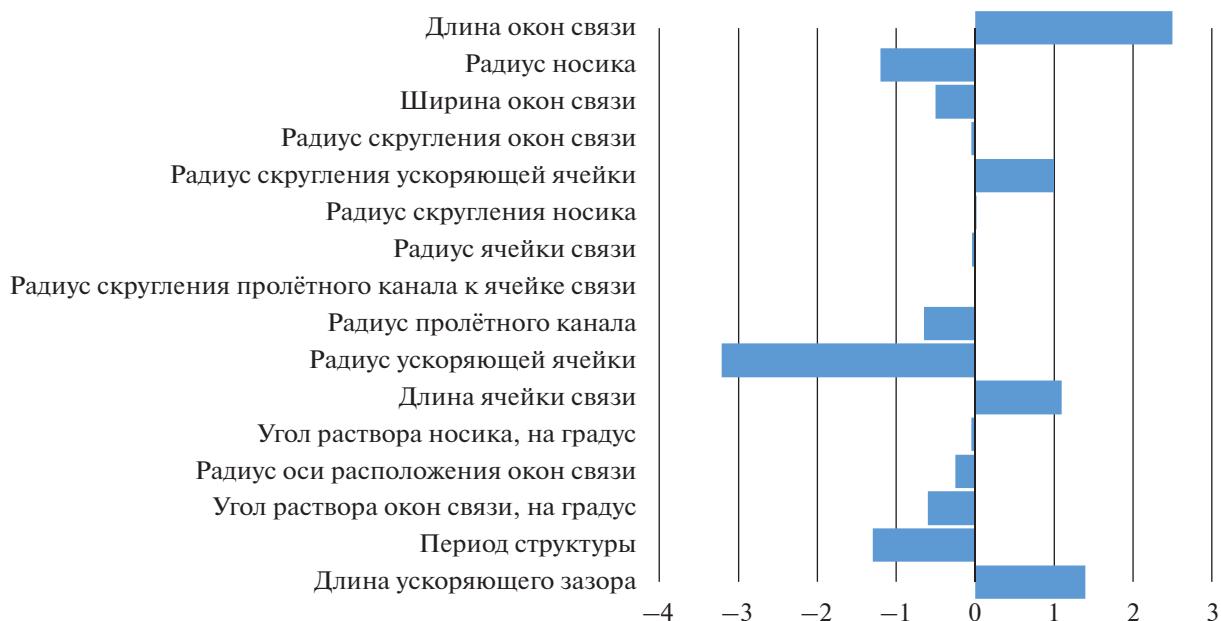


Рис. 7. Изменение частоты при изменении значения одного из геометрических размеров ячейки на 0.1 мм, МГц.

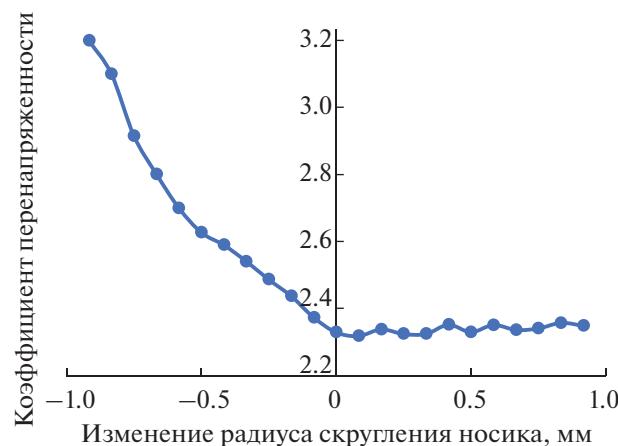
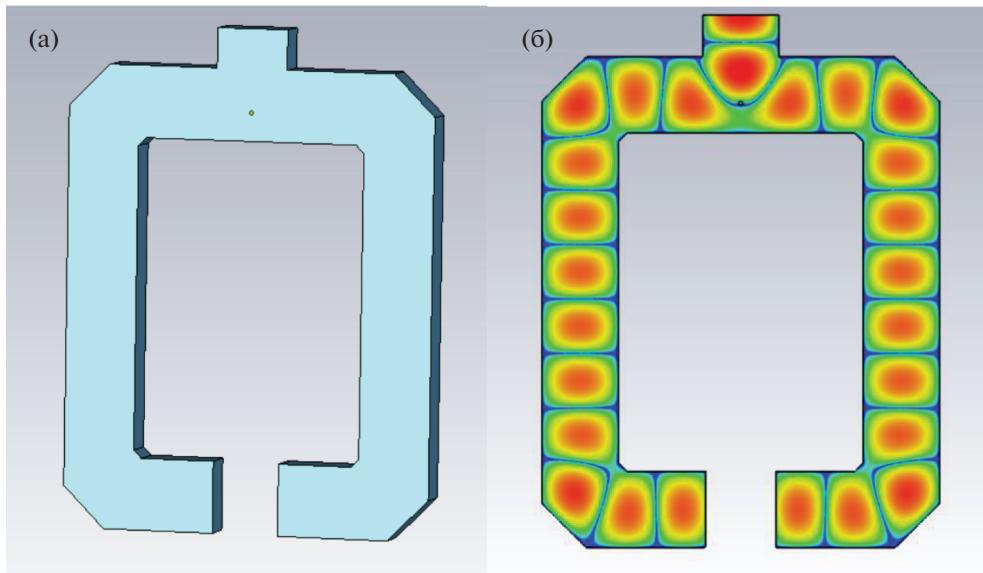
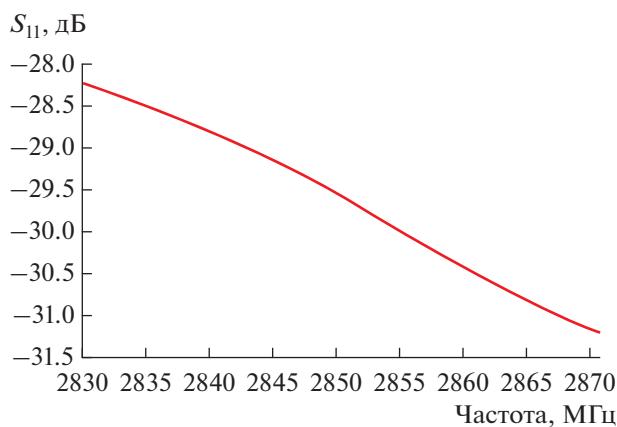


Рис. 8. Зависимость коэффициента перенапряженности по электрическому полю от изменения радиуса скругления носика структуры.



**Рис. 9.** Модель устройства ввода высокочастотной мощности (а) и топография электрического поля (б).

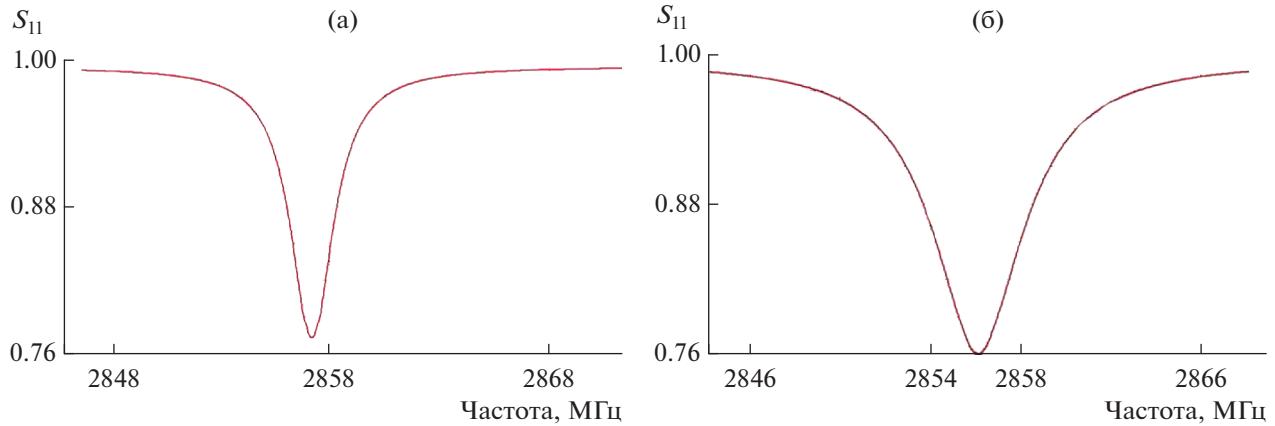


**Рис. 10.** Зависимость коэффициента отражения в полосе частот для трехплечевого устройства.

### НАСТРОЙКА ВВОДА МОЩНОСТИ

В ходе разработки ускоряющей секции проводилась настройка и создание моделей симметричных устройств ввода мощности для ускоряющих секций. Ввод мощности представляет собой прямоугольный волновод с размерами поперечного сечения  $90 \times 45$  мм с согласующей диафрагмой. Особое внимание в процессе настройки уделялось оптимизации трехплечевого устройства на основе прямоугольных волноводов, так как от положения и размера согласующего штыря зависит то, насколько эффективно будет передаваться мощность далее – в плечи устройства и к ускоряющей структуре.

На рис. 9 представлены модель устройства и результаты настройки. Как можно видеть из рис. 10, с помощью согласующего штыря и опти-



**Рис. 11.** Зависимости модуля коэффициента отражения в полосе частот для ускоряющей структуры из восьми ячеек (а) и двенадцати ячеек (б).

мизации его положения удается добиться необходимого значения коэффициента отражения в устройстве и, таким образом, корректного режима ввода мощности в ускоряющую структуру.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разработки проекта нового линейного ускорителей электронов прикладного назначения.

Рассмотрены основные этапы выбора параметров, настройки и оптимизации ускоряющей секции с устройствами ввода высокочастотной мощности: расчет динамики пучка электронов, получение параметров, необходимых для дальнейших этапов создания ускорителя; разработка ячеек ускоряющей структуры, устройств ввода мощности; расчет электродинамических характеристик моделей; получение вариационных характеристик структур по геометрическим параметрам. Модель ускорителя скорректирована с учетом конструктивных требований и может быть использована для дальнейшего создания опытного образца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

- Polozov S.M., Rashchikov V.I., Demsky M.I. // Proc. 25th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2016). St. Petersburg, Russia. 2016. Geneva: JACoW Publ. P. 493–495.*
- Polozov S.M. et al. // Proc. 25th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2016). St. Petersburg, Russia. 2016. Geneva: JACoW Publ. P. 173–175.*  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2016-TU-CASH02>
- Polozov S.M. et al. // Proc. 7th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16). Busan, Korea. May 8–13, 2016. Geneva: JACoW Publ. P. 1788–1790.*  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOW021>
- Batov A.A. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20 (4). P. 699–703.*
- Батов А.А. и др. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (5). С. 473–477 [Batov A.A. et al. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (11). P. 2411–2415].*
- Самароков Н.Ю. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (4). С. 368–371 [Samarokov N.Yu. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (10). P. 2271–2274].*
- Masunov E.S., Polozov S.M. // Proc. EPAC-2004. Lucerne, Switzerland. 2004. P. 731–733.*  
<https://accelconf.web.cern.ch/e04/PAPERS/MO-PLT081.PDF>
- Masunov E.S. et al. // Proc. HB2010. Morschach, Switzerland. 2010. P. 123–125.*  
<https://accelconf.web.cern.ch/HB2010/papers/mopd28.pdf>
- Бондаренко Т.В., Масунов Е.С., Полозов С.М. // Вопр. атом. науки техн. Т. 46. С. 114–118.*
- Rybakov I.V. et al. // Proc. IPAC2021. Campinas, SP, Brazil. 2021. Geneva: JACoW Publ. P. 4139–4141.*

## Development of a Two-Section 8 MeV Linear Electron Accelerator for Applied Purposes

R. A. Zbruev<sup>1</sup>, \*, A. A. Batov<sup>1</sup>, T. V. Bondarenko<sup>1</sup>, S. M. Polozov<sup>1</sup>, and M. V. Lalayan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: romanzbzbruev@mail.ru

Received May 15, 2024; revised May 30, 2024; accepted June 10, 2024

**Abstract**—The paper considers the design features of a 8 MeV linear electron accelerator related to the development of a two-sectional accelerating structure and MW power coupler devices. The electron beam dynamics was simulated using BEAMDULAC-BL code. The model of the accelerating structure with the couplers were adjusted using the simulation results. The desired values of the electrodynamic characteristics were obtained.

**Keywords:** biperiodic accelerating structure, electrodynamic characteristics, linear electron accelerator, S-band frequency linac, input coupler device, electron beam dynamics