

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА И УСТРОЙСТВА ВВОДА МОЩНОСТИ УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

*А. А. Батов¹, Т. В. Бондаренко, Р. А. Збруев, М. А. Гусарова,
М. В. Лалаян, Я. В. Шашков, С. М. Полозов*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Представлены результаты разработки ускоряющей структуры и устройства ввода мощности для компактного линейного ускорителя электронов, предназначенного для работы в составе установки радиационной терапии. Получены оптимизированная геометрия и электродинамические характеристики структуры.

The results of the development of an accelerating structure and a power input device for a compact linear electron accelerator designed to operate as part of a radiation therapy unit are presented. The optimized geometry and electrodynamic characteristics of the structure are obtained.

PACS: 29.20.–с

ВВЕДЕНИЕ

Для комплексов радиационной терапии необходимы компактные линейные ускорители электронов. Такой комплекс разрабатывается совместно коллективами НИЯУ «МИФИ» и АО «НИИТФА». В данной статье описывается разработка линейного ускорителя электронов с энергией пучка 6,3 МэВ для комплекса томотерапии. Ускоряющая секция установки построена на базе бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи, спроектированной ранее в НИЯУ «МИФИ» для технологических ускорителей [1–3]. Необходимо было настроить рабочую частоту структуры для согласования с системой СВЧ-питания. Кроме того, требовалось получить высокие значения коэффициента связи по магнитному полю между ячейками и эффективного шунтового сопротивления структуры в условиях ограниченных размеров компактного ускорителя. Структура включает в себя группирователь, состоящий из трех ускоряющих ячеек, а также регулярную часть (пять ускоряющих ячеек) [4]. После настройки ускоряющей структуры была произведена настройка ввода мощности и его согласование со структурой.

¹E-mail: Batov23@Gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ЯЧЕЕК

Для настройки ячеек регулярной части использовалась модель, состоящая из двух ускоряющих полужеек и ячейки связи. Настройка на рабочую частоту проводилась путем изменения диаметра ячеек. После настройки рабочей частоты изменением положения и площади окон связи осуществлялась настройка коэффициента связи и эффективного шунтового сопротивления. При оптимизации окон связи удалось достичь требуемых показателей ЭДХ ускоряющей структуры. Результаты проведенной оптимизации представлены на рис. 1 и в табл. 1.

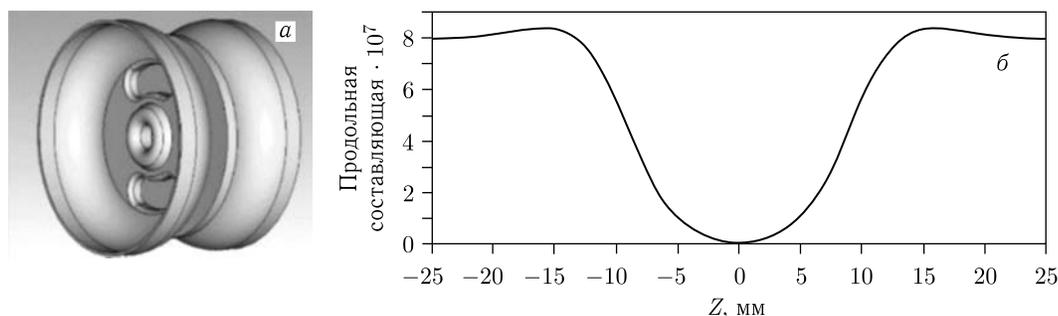


Рис. 1. Геометрия модели регулярного периода структуры (а) и распределение продольной составляющей электрического поля на оси структуры (б)

Таблица 1. Электродинамические характеристики регулярной ячейки

Коэффициент связи, %	Частота, МГц	Собственная добротность	Коэффициент перенапряжения по электрическому полю	Эффективное шунтовое сопротивление, МОм/м
8,1	2997,8	15300	2,3	79

НАСТРОЙКА ЯЧЕЕК ГРУППИРОВАТЕЛЯ

Настройка группирователя, фазовая скорость волны в ячейках которого монотонно нарастает, проводилась путем установления требуемых соотношений полей между соседними ячейками, определенных в ходе моделирования динамики пучка, с сохранением рабочей частоты структуры. Моделирование динамики пучка в секции показало, что соотношение амплитуд электромагнитных полей между соседними ячейками группирователя находится в диапазоне $[0,4-1,0]$. Вторая и третья ячейки настраивались аналогично регулярным, а модель первой ячейки группирователя была изменена — в ней удалены «носик» на диафрагмах для установления необходимого соотношения полей, как можно видеть на рис. 2.

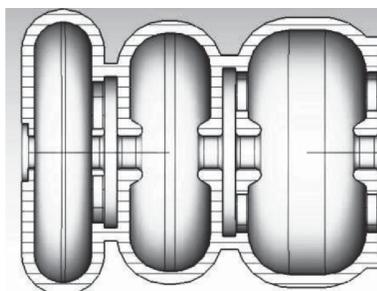


Рис. 2. Ячейки группирователя

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА В СБОРЕ

На завершающем этапе настройки была собрана полная параметрическая модель ускоряющей структуры. Отдельное внимание на финальном этапе уделялось настройке первой и последней ячеек структуры, так как они отличаются отсутствием с одной стороны окон связи. Результаты настройки полной структуры и полученные электродинамические характеристики представлены на рис. 3 и в табл. 2.

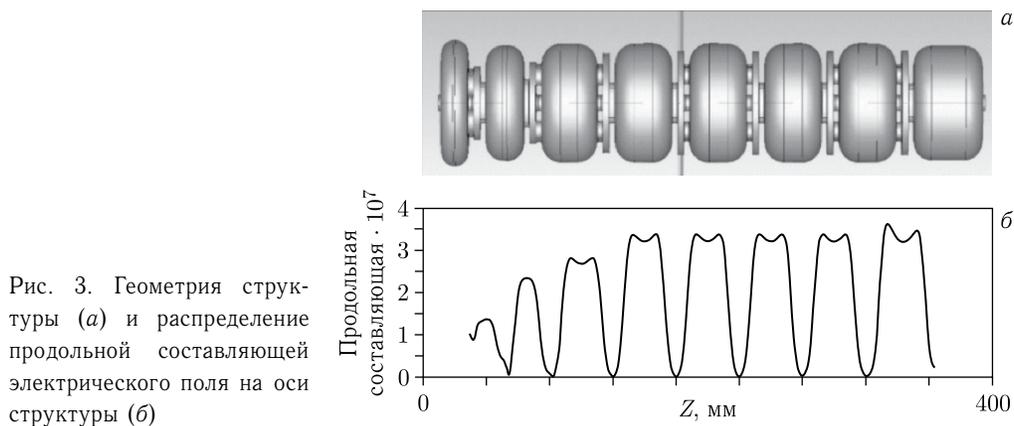


Рис. 3. Геометрия структуры (а) и распределение продольной составляющей электрического поля на оси структуры (б)

Таблица 2. Электродинамические характеристики полной структуры

Коэффициент связи, %	Потери в стенках структуры, МВт	Собственная добротность	Коэффициент перенапряжения по электрическому полю	Эффективное шунтовое сопротивление, МОм/м
9,85	1,23	15300	2,6	70,5

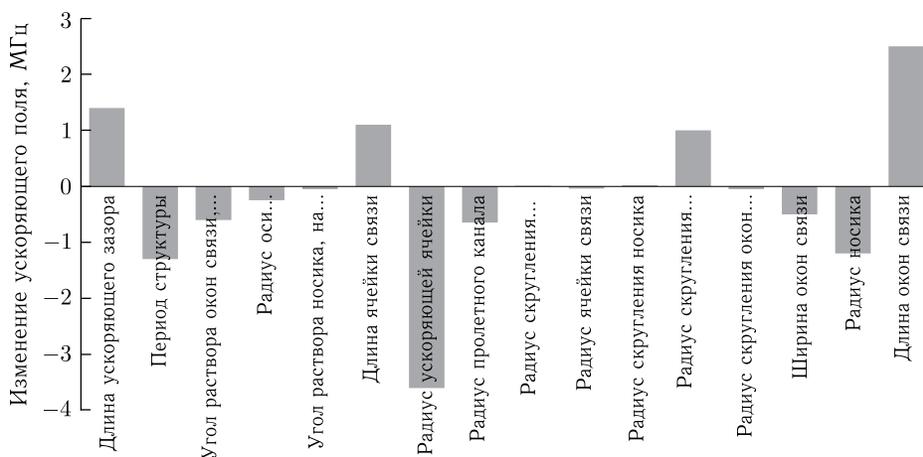


Рис. 4. Влияние изменения на 0,1 мм параметров модели на частоту ускоряющего поля

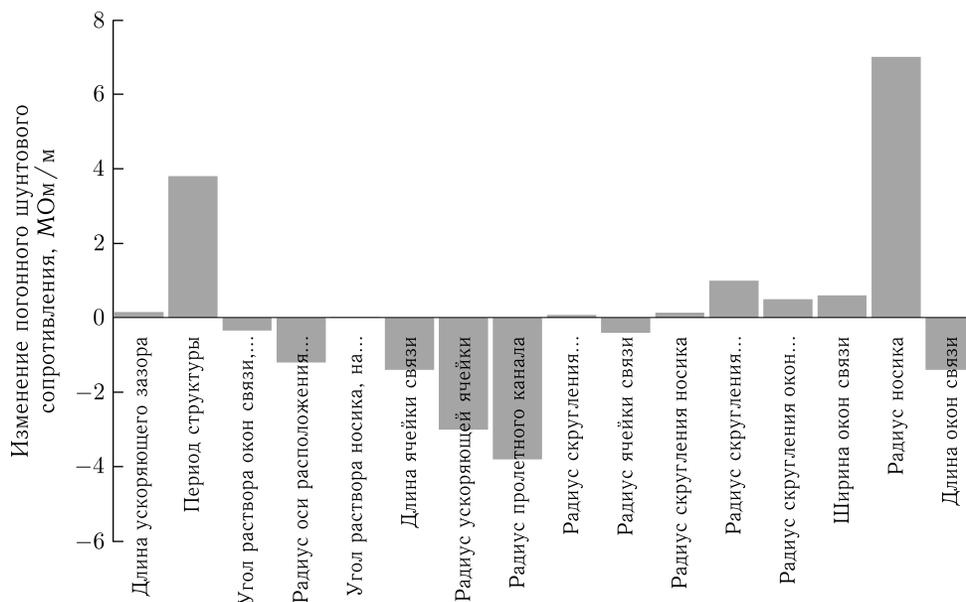


Рис. 5. Изменение погонного шунтового сопротивления при изменении значения параметра на 1 мм

Для определения допусков на изготовление опытного образца ускорителя рассмотрена чувствительность электродинамических характеристик к изменению параметров модели. Построены вариационные характеристики (рис. 4, 5), определены допуски на изготовление опытного образца ускоряющей структуры.

МОДЕЛЬ С ВВОДОМ МОЩНОСТИ

Устройство ввода мощности служит элементом тракта передачи электромагнитной энергии от источника СВЧ-питания (в данном случае — магнетрона с импульсной мощностью 3,5 МВт) к ускоряющей структуре, в тракте используется прямоугольный волновод сечением 72×34 мм. Для симметризации электромагнитного поля к ячейке ввода мощности также подсоединяется запредельный волновод сечением 34×34 мм, который также используется для присоединения вакуумной системы. Была разработа-

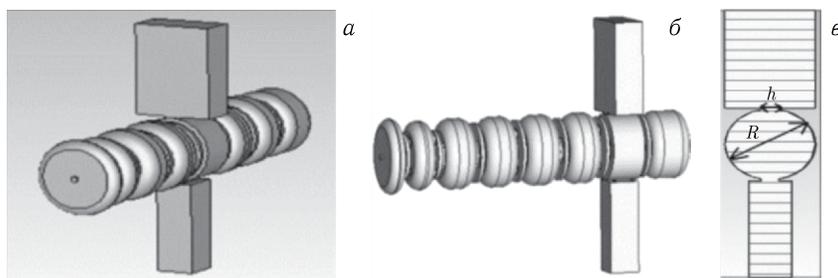


Рис. 6. Моделирование ускоряющей структуры: а, б) рассматриваемые варианты; в) варьируемые размеры ввода мощности

на и смоделирована ускоряющая структура с вводом мощности; узел ввода мощности размещался на пятой или седьмой ячейке [4]. Модели представлены на рис. 6.

Вариант с вводом мощности на пятой ячейке предпочтителен с точки зрения вакуумной откачки секции. Однако вариант с вводом на седьмой ячейке решает ряд конструктивных проблем, таких как размещение фокусирующей магнитной системы в условиях повышенных требований к компактности установки. Значения оптимального коэффициента связи волновода с ускоряющей структурой β_0 и модуля коэффициента отражения S_{11} , при которых в заданном режиме связь будет критической, определяются соотношениями [5]

$$\beta_0 = \left(\frac{I_0}{2} \sqrt{\frac{r_{sh_eff} L}{P_g}} + \sqrt{1 + \frac{I_0^2 r_{sh_eff} L}{4P_g}} \right)^2, \quad (1)$$

$$S_{11} = \left| \frac{\beta_0 - 1}{\beta_0 + 1} \right|. \quad (2)$$

Для эффективного погонного шунтового сопротивления $r_{sh_eff} = 70,5$ МОм/м, длины структуры $L = 0,3665$ м, мощности генератора $P_g = 2,7$ МВт и тока пучка $I_0 = 0,25$ А получены следующие значения коэффициента связи волновода и модуля коэффициента отражения: $\beta_0 = 2,127$, $S_{11} = 0,360$. Настройка проводилась изменением двух параметров — радиуса ячейки с вводом мощности R и ширины согласующей щели h . В качестве начального условия для радиуса ячейки берется радиус ячеек регулярной части. Ниже представлены результаты настройки для обоих вариантов ускоряющей структуры с устройством ввода мощности. На рис. 7, а и 8, а показаны

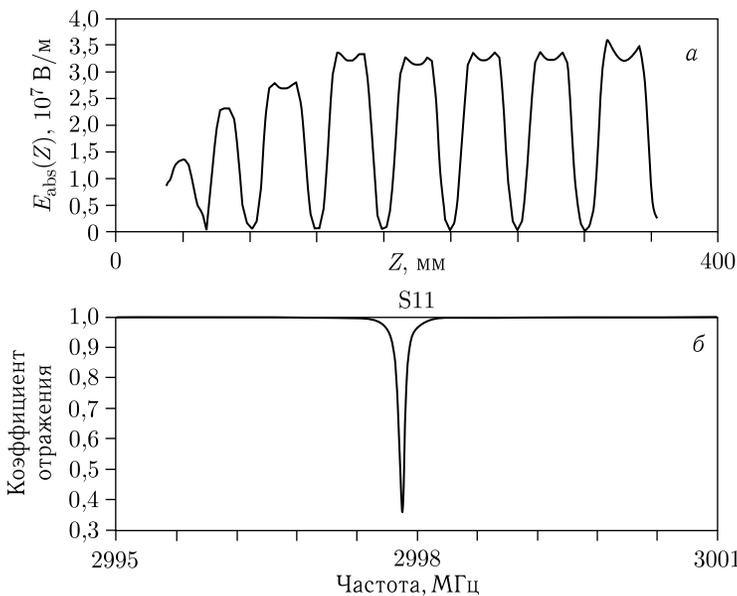


Рис. 7. Распределение продольной составляющей электрического поля (а) и зависимость модуля коэффициента отражения в полосе частот (б) для ввода мощности на пятой ячейке

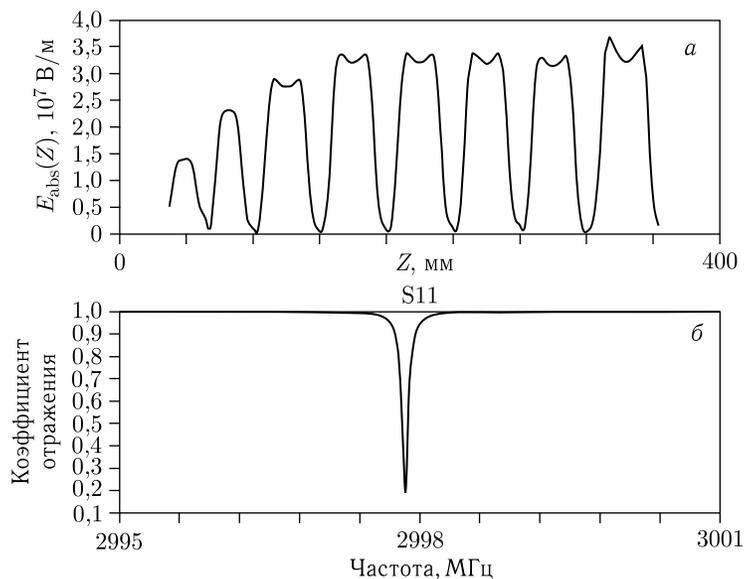


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, для ввода мощности на седьмой ячейке

Таблица 3. Характеристики структуры и значения геометрических параметров настроенной структуры с вводом мощности

Номер ячейки с вводом мощности	f , МГц	S_{11}
5	2997,8	0,359
7	2997,8	0,358

Таблица 4. Сводная таблица настройки модели полной ускоряющей структуры с вводом мощности

β_0	S_{11}	ΔR , мм	Δh , мм
1,7	0,258	-0,04	0,64
1,9	0,309	-0,03	0,29
2,1	0,354	-0,01	-0,01
2,3	0,394	0	-0,28

распределения продольной составляющей электрического поля, а на рис. 7, б и 8, б — зависимости модуля коэффициента отражения в полосе частот для ввода мощности в пятой и седьмой ячейках соответственно.

В табл. 3 представлены результаты настройки структуры с вводом мощности. Видно, что погрешность настройки модуля коэффициента отражения S_{11} составила порядка 1%. Распределение амплитуды электрического поля и модуля коэффициента отражения одинаковы для обоих вариантов расположения ввода.

В рамках исследования структуры при различных значениях рабочих параметров проведена серия расчетов, целью которых являлась оптимизация ускоряющей структуры с вводом мощности в седьмой ячейке, настроенной на разные значения коэффициента связи волновода с ускоряющей структурой. Диапазон значений β_0 лежит в пределах 1,7–2,3. Результаты моделирования представлены в табл. 4, изменения радиуса ячейки с устройством ввода мощности ΔR и ширины согласующей щели Δh указаны относительно полученных значений данных параметров при настройке модели с вводом в седьмой ячейке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование и расчет ускоряющей структуры с вводом мощности для установки радиационной терапии. Настроены соотношения полей в ячейках группирователя. Рассмотрены два возможных варианта конструкции устройства ввода мощности. Полученные в результате моделирования значения удовлетворяют требованиям, накладываемым на электродинамические характеристики структуры. Помимо этого проведено исследование влияния геометрических параметров на работу системы. На новую ускоряющую структуру разработан комплект рабочей конструкторской документации, начато изготовление опытного образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polozov S. M., Rashchikov V. I., Demsky M. I.* Beam Dynamics in New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 493–495.
2. *Bondarenko T. V. et al.* New 10 MeV High-Power Electron LINAC for Industrial Application // Proc. of the 7th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'16), Bexco, Busan, Korea, May 8–13, 2016. P. 1794–1796.
3. *Basyl D. S. et al.* Commissioning and First Tests of the New Standing Wave 10 MeV Electron Accelerator // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 173–175.
4. *Lalayan M. V., Batov A., Gusarova M. et al.* Compact S-Band Accelerating Structure for Medical Application // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021.
5. *Kaminsky V. I., Lalayan M. V., Sobenin N. P.* Accelerating Structures and Microwave Devices. 2006.

Получено 18 ноября 2022 г.