

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 615.849

УСТРОЙСТВО ВВОДА МОЩНОСТИ ДЛЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ S-ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА УСТАНОВКИ РАДИАЦИОННОЙ ТЕРАПИИ

© 2023 г. Р. А. Збруев^а, *, А. А. Батов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: romanzbruev@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Приведены результаты разработки ускоряющей структуры с устройством ввода мощности для установки радиационной терапии. Проведена настройка моделей, определены электродинамические характеристики.

Ключевые слова: бипериодическая ускоряющая структура, ввод мощности, электродинамические характеристики

DOI: 10.56304/S2079562922050554

ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов нашли широкое применение в науке, промышленности и медицинской сфере. Например, на базе АО “НИИТФА” разрабатывается комплекс лучевой терапии на энергию 6.3 МэВ.

В работе представлены результаты разработки компактной ускоряющей структуры с устройством ввода высокочастотной мощности для ускорителя электронов. Также рассмотрено влияние изменения геометрических параметров узла ввода мощности, проведено моделирование структуры при различных значениях электродинамических характеристик.

МОДЕЛЬ

Для терапевтических комплексов с ускорителем электронов, положение в пространстве которого изменяется при работе, требуется создание компактной ускоряющей структуры. Для решения этой задачи была выбрана бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи [1]. Модель полной ускоряющей структуры на стоячей волне содержит три ячейки группирователя и пять регулярных ячеек [2].

Устройство ввода мощности служит элементом тракта передачи электромагнитного поля от источника СВЧ-питания к ускоряющей структуре через прямоугольный волновод сечением 72 · 34 мм. К ячейке устройства ввода мощности также подсоединяется второй волновод сечением 34 · 34 мм,

служащий для симметризации электромагнитного поля, также через него будет проводиться откачка системы.

Была разработана и смоделирована ускоряющая структура с вводом мощности; узел ввода мощности размещается на пятой или седьмой ячейке. Модели представлены на рис. 1.

Вариант с вводом мощности на пятой ячейке выглядит более предпочтительным с точки зрения вакуумной откачки. Однако вариант с вводом на седьмой ячейке позволяет решить ряд конструктивных проблем — размещение магнитной системы в условиях повышенных требований к компактности установки.

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ВОЛНОВОДОМ

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 [2]:

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

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

Для эффективного погонного шунтового сопротивления $r_{\text{sh-eff}} = 70.4 \text{ МОм/м}$, длины структу-

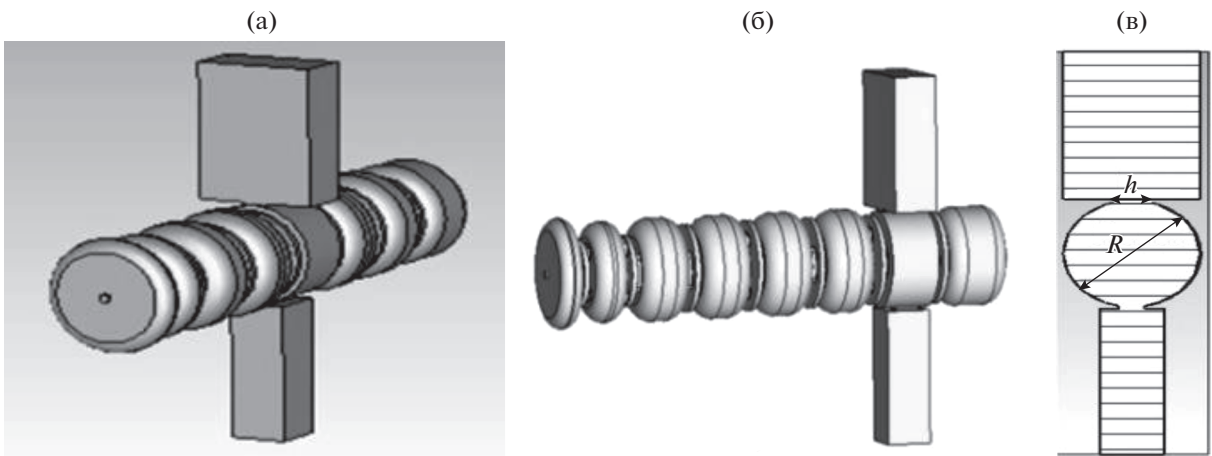


Рис. 1. Моделирование ускоряющей структуры: (а), (б) рассматриваемые варианты, (в) параметры ввода мощности.

ры $L = 0.3665$ м, мощности генератора $P_g = 2.7$ МВт, и тока $I_0 = 0.25$ А получены следующие значения коэффициента связи волновода и модуля коэффициента отражения: $\beta_0 = 2.127$, $S_{11} = 0.360$.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ОКНА СВЯЗИ ПИТАЮЩЕГО ВОЛНОВОДА

Настройка проводилась изменением двух параметров – радиуса ячейки с вводом мощности R и ширины согласующей щели h . В качестве начального условия для радиуса ячейки с вводом мощности берется значение, равное значению радиуса ячеек регулярной части.

Ниже представлены результаты настройки для обоих вариантов ввода ускоряющей структуры с вводом мощности. На рис. 2а, 3а показаны распределения продольной составляющей электрического поля, на рис. 2б, 3б – зависимости модуля коэффициента отражения в полосе частот для ввода мощности на пятой и седьмой ячейке соответственно.

Таблица 1. Характеристики структуры и значения геометрических параметров настроенной структуры с вводом мощности

№ ячейки с вводом	f , МГц	S_{11}	R	h
5	2998.7	0.359	36.08	13.76
7	2998.7	0.358	36.07	13.72

Исходя из распределений 2а и 3а, можно заметить, что в ячейках с вводом мощности наблюдается небольшое “провисание” электрического поля. Величина “провисания” составляет менее 4%, что является допустимым значением (при разработке закладывалось величина просадки не более 10%).

В табл. 1 представлены результаты настройки. Видно, что погрешность настройки модуля коэффициента отражения S_{11} составила порядка 1%.

НАСТРОЙКА НА ДИАПАЗОН ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ ВОЛНОВОДА С УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ

В рамках исследования работы структуры при различных значениях параметров была проведена серия расчетов и моделирований, целью которой служило получение оптимизированной 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. 2

Таблица 2. Сводная таблица настройки модели полной ускоряющей структуры с вводом мощности

№	β_0	S_{11}	R	h
1	1.7	0.258	36.04	14.40
2	1.9	0.309	36.05	14.05
3	2.1	0.355	0.354	36.07
4	2.3	0.394	0.394	36.08

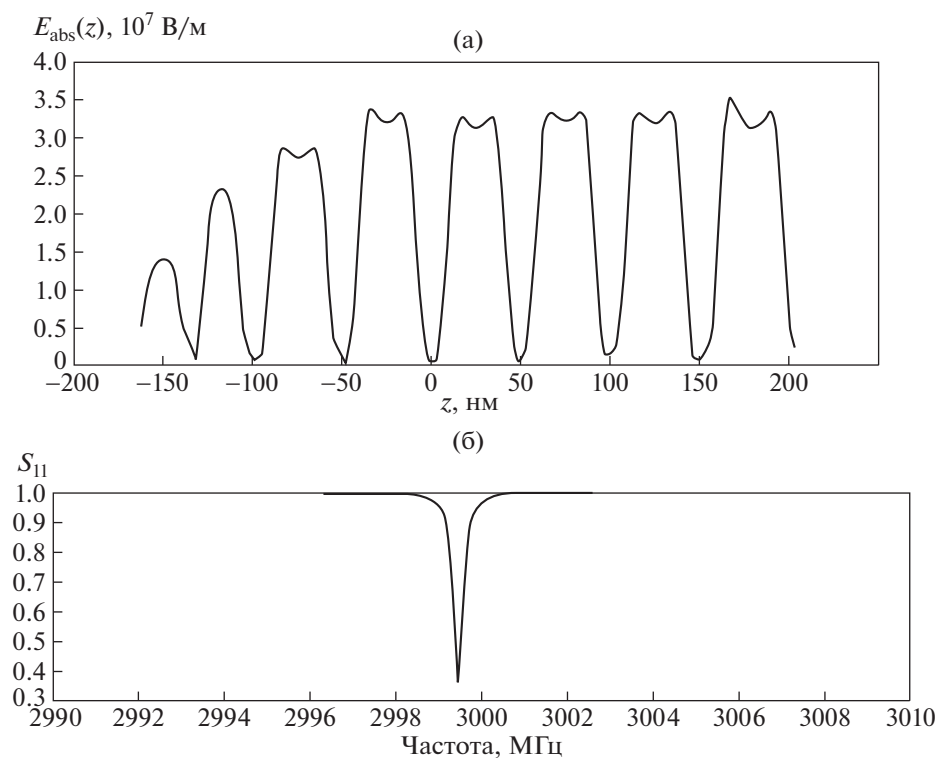


Рис. 2. Распределение продольной составляющей электрического поля (а) и зависимость модуля коэффициента отражения в полосе частот (б) для ввода мощности на пятой ячейке.

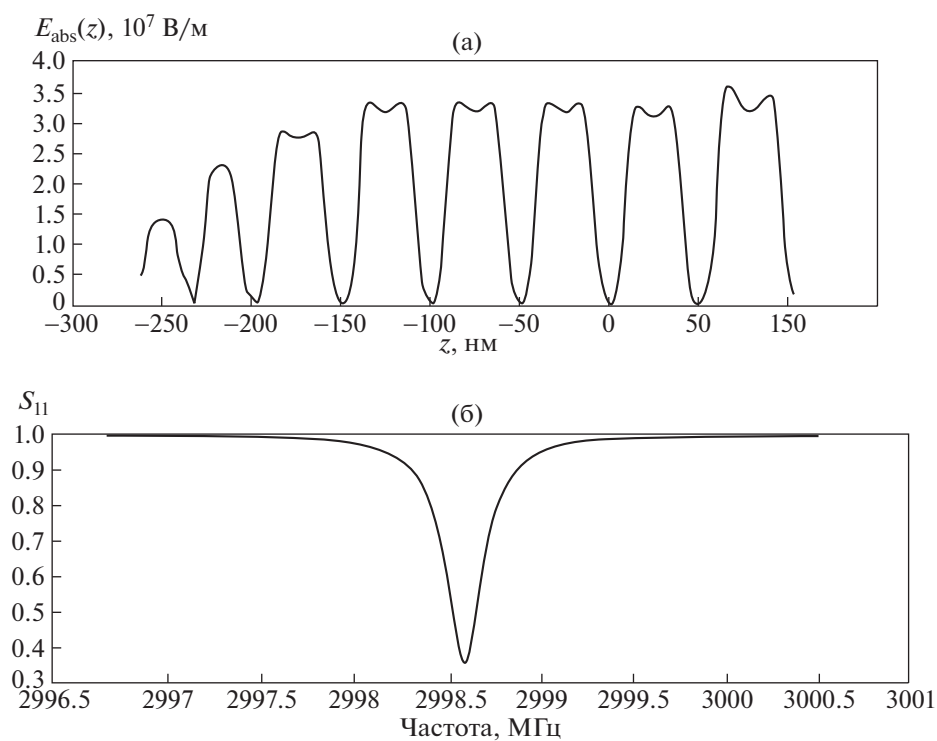


Рис. 3. Распределение продольной составляющей электрического поля (а) и зависимость модуля коэффициента отражения в полосе частот (б) для ввода мощности на пятой ячейке.

Таблица 3. Влияние изменения геометрических параметров на характеристики структуры

Варьируемый параметр	Δ , мм	f , МГц	S_{11}	Δf , МГц	ΔS_{11}
R	+1	2990.1	0.711	−9.4	+0.317
R	−1	3009.1	0.653	+9.6	+0.259
h	+1	2999.0	0.249	−0.5	−0.145
h	−1	3000.0	0.533	+0.5	+0.139

Далее, было проведено исследование влияния изменения радиуса ячейки с узлом ввода мощности R и ширины согласующей щели h на рабочую частоту f и коэффициент отражения S_{11} . Геометрические параметры были поочередно изменены на 1 мм, а результаты моделирования занесены в табл. 3. В табл. 4 представлено исследование влияния h на более широком диапазоне значений. В качестве начальной модели была взята модель № 4 из табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование и расчет для ускоряющей структуры с вводом мощности установки для радиационной терапии. Рассмотрены два возможных варианта конструкции для данного узла ускорителя. Полученные в результате моделиро-

Таблица 4. Влияние изменения величины ширины согласующей щели h на характеристики структуры

Δ , мм	f , МГц	S_{11}	Δf , МГц	ΔS_{11}
+1	2999.0	0.249	−0.5	−0.145
+2	2998.5	0.109	−1.0	−0.285
+3	2997.8	0.045	−1.7	−0.349
−1	3000.0	0.533	+0.5	+0.139
−2	3000.4	0.660	+0.9	+0.266
−3	3000.8	0.768	+1.3	+0.374

вания значения удовлетворяют требованиям, накладываемым на электродинамические характеристики структуры. Помимо этого, проведено исследование влияния геометрических параметров на работу системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Savin E.A., Sobenin N.P. // Tech. Phys. 2013. V. 58 (5). P. 760–765.
<https://doi.org/10.1134/S1063784213050198>
2. Lalayan M.V., Batov A.A., Gusarova M.A. et al. // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 186–188.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA42>.
3. Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П. Ускоряющие структуры и СВЧ устройства. 2006. Москва: МИФИ.

**Input Coupler of S-Frequency Range Accelerating Structure
for the Radiation Therapy Facility**

R. A. Zbruev¹, * and A. A. Batov¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: romanzbruev@mail.ru*

Received July 20, 2022; revised July 20, 2022; accepted July 25, 2022

Abstract—An accelerating structure with an input coupler for a radiation therapy facility has been developed. Models were adjusted and electrodynamic characteristics have been determined.

Keywords: biperiodic accelerating structure, input coupler, electrodynamic characteristics