

## 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<sup>а</sup>, \*, А. А. Батов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный 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  $\beta_0$  и модуля коэффициента отражения  $S_{11}$ , при которых в заданном режиме связь будет критической, определяются соотношениями [2]:

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

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

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

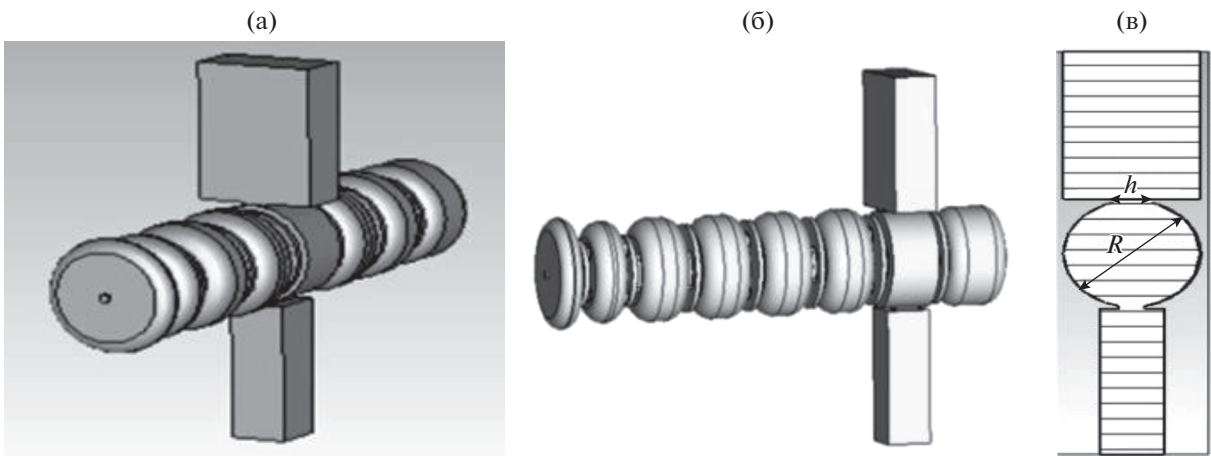


Рис. 1. Моделирование ускоряющей структуры: (а), (б) рассматриваемые варианты, (в) параметры ввода мощности.

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 значение просадки не более 10%).

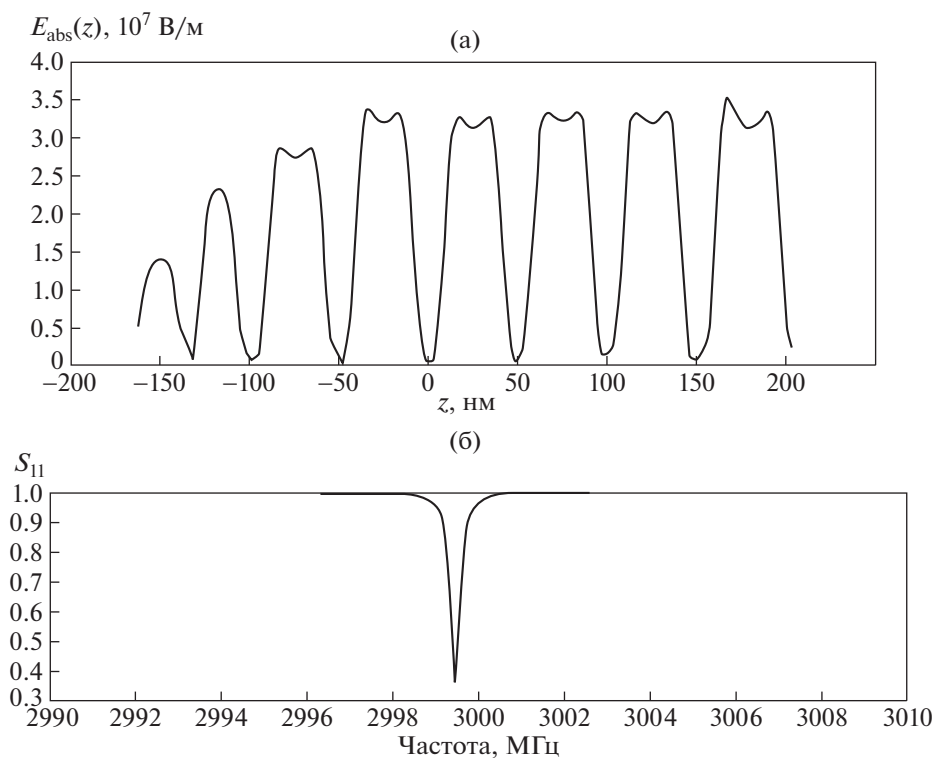
В табл. 1 представлены результаты настройки. Видно, что погрешность настройки модуля коэффициента отражения  $S_{11}$  составила порядка 1%.

НАСТРОЙКА НА ДИАПАЗОН ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ ВОЛНОВОДА С УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ

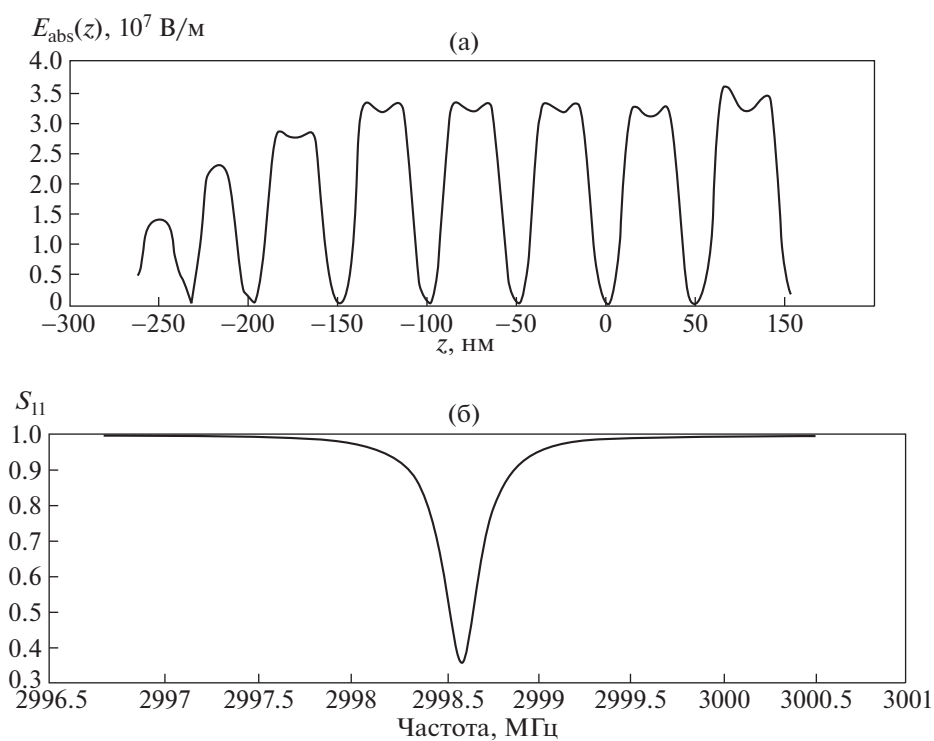
В рамках исследования работы структуры при различных значениях параметров была проведена серия расчетов и моделирований, целью которой служило получение оптимизированной ускоряющей структуры с вводом мощности в седьмой ячейке, настроенной на разные значения коэффициента связи волновода с ускоряющей структурой. Диапазон значений  $\beta_0$  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

№	$\beta_0$	$S_{11}$	$R$	$h$
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	$\Delta$ , мм	$f$ , МГц	$S_{11}$	$\Delta f$ , МГц	$\Delta S_{11}$
$R$	+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

$\Delta$ , мм	$f$ , МГц	$S_{11}$	$\Delta f$ , МГц	$\Delta S_{11}$
+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. Zbruev<sup>1</sup>, \* and A. A. Batov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*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