

УДК 621.384.6.(075)

## РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 40 МэВ

© 2013 г. А. А. Завадцев, Д. А. Завадцев, К. И. Никольский\*, Е. А. Савин\*, Н. П. Собенин\*

ООО “Нано Инвест”

Россия, 111394, Москва, ул. Полимерная, 8а

\*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

E-mail: es-abyss@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.12.2012 г.

Расчитан линейный ускоритель электронов РЭЛУС-6 на энергию 40 МэВ и импульсный ток 100 мА. Ускоритель на стоячей волне с бипериодической ускоряющей структурой состоит из четырех секций и питается от двух клистронов с импульсной мощностью 6 МВт каждый. Рабочая частота 2856 МГц. Полная длина ускорителя 2.73 м. Проведены расчеты по выбору протяженности первых трех ячеек первой секции и напряженности электрического поля в них для обеспечения ширины энергетического спектра на выходе ускорителя 2%. Рассчитана геометрия структуры и вводов высокочастотной мощности. По результатам моделирования изготовлены четыре ускоряющие секции. Проведена настройка секций на рабочую частоту, заданное распределение ускоряющего поля и определенное значение коэффициента связи питающего волновода с ускоряющей секцией.

DOI: 10.7868/S003281621305011X

### УСКОРИТЕЛЬ РЭЛУС-6

Ускоритель состоит из четырех секций, каждая из которых включает в себя 12 ускоряющих ячеек. В первой секции три ячейки из двенадцати являются группировочными. Каждая пара секций питается от клистронов мощностью 6 МВт через трехдецибелльный волноводный мост. Расстояние между центрами крайних ячеек соседних секций составляет  $L_{dr} = 131.25$  мм, что соответствует 1.25 длины волны в свободном пространстве. Схема ускорителя представлена рис. 1.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЯЮЩИХ СЕКЦИЙ

#### Расчет динамики пучка

Расчет динамики пучка электронов в ускорителе состоит из нескольких этапов. На первом

этапе рассчитаны распределение поля в одиночных ускоряющих ячейках и динамика электронов в ускорителе. В результате получены геометрия ускоряющих ячеек, напряженность поля в них, энергетический спектр, энергия, ток и другие параметры пучка на выходе ускорителя.

При расчете электронной пушки учитывались следующие требования: кроссовер пучка должен находиться в зазоре между кончиком первой пролетной трубки и центром ускоряющего зазора первой ячейки; радиус пучка в кроссовере должен быть минимальным. Изменялись форма анода и прикатодного фокусирующего электрода. На рис. 2 изображены эквипотенциальные линии электрического поля в пушке при энергии инжекции 56 кВ, а на рис. 3 приведен радиальный срез пучка в электронной пушке.

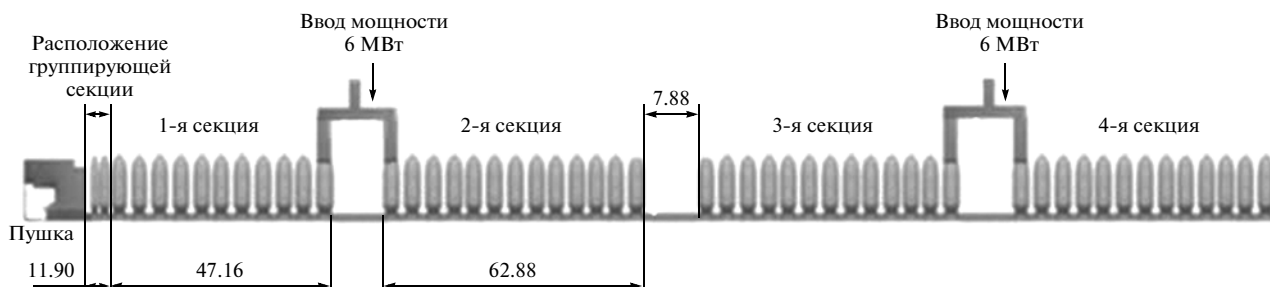


Рис. 1. Схема ускорителя РЭЛУС-6 (размеры даны в сантиметрах).

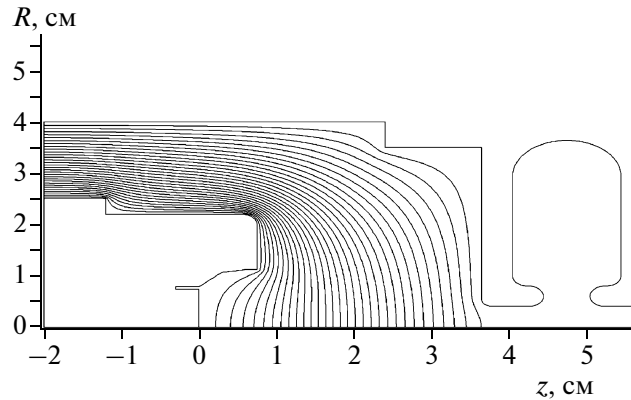


Рис. 2. Эквипотенциальные линии электрического поля в пушке.

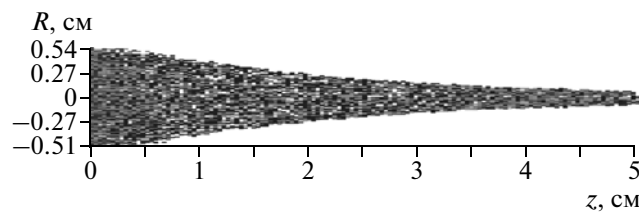


Рис. 3. Радиальное распределение частиц в пучке.

При расчете группирователя были использованы результаты расчета первых двух ячеек ускорителя All Secure [1]. На рис. 4. изображены профиль и силовые линии электрического поля трех ячеек группирователя и регулярной ячейки.

Длина третьей группирующей ячейки  $L_3$  такова, что размеры ускоряющей полуячейки и полуячейки связи составляют половину этой длины. При выборе длины  $L_3$  и напряженности электрического поля в этой ячейке исходили из условия достижения минимальной ширины энергетиче-

ского спектра. На рис. 5 представлены энергетические спектры пучка после прохождения трех ячеек группирователя при длине третьей ячейки 48 и 50 мм. Очевидно, что во втором случае пропадает нежелательный второй пик, и спектр становится уже.

Расчет динамики пучка во всем ускорителе выполнялся в следующей последовательности. Сначала была смоделирована первая секция, состоящая из трех ячеек группирователя и девяти регулярных ячеек. Входной ток и напряженности

Таблица 1. Данные расчета динамики линейного ускорителя электронов на энергию 40 МэВ

Секция	$E_1$ , МВ/м	$E_2$ , МВ/м	$E_3$ , МВ/м	$E_4$ , МВ/м	$K_3$ , %	$I_{\text{вых}}$ , А	$W_{\text{макс}}$ , МэВ	$W_{\text{ср}}$ , МэВ	$P_{\text{п}}$ , МВт	$P_{\text{ст}}$ , МВт	$P_{\text{сум}}$ , МВт
1	6.00	10.00	18.0	20.9	56.0	0.112	8.11	6.98	1.49	1.53	3.02
2	19.2	19.2	19.2	19.2	53.5	0.107	16.58	14.45	2.95	3.05	6.00
3	19.2	19.2	19.2	19.2	52.5	0.105	25.05	22.05	4.4	4.59	8.99
4	19.2	19.2	19.2	19.2	52.0	0.104	33.56	29.81	5.866	6.15	12.01

Примечание.  $E_{1-4}$  – напряженность поля в ячейках;  $P_{\text{п}}$  – мощность ускоренного пучка;  $P_{\text{ст}}$  – мощность потерь в стенках;  $P_{\text{сум}}$  – суммарная входная мощность;  $W_{\text{макс}}$  – максимальная энергия на выходе ускорителя;  $W_{\text{ср}}$  – средняя энергия;  $I_{\text{вых}}$  – выходной ток;  $K_3$  – коэффициент захвата.

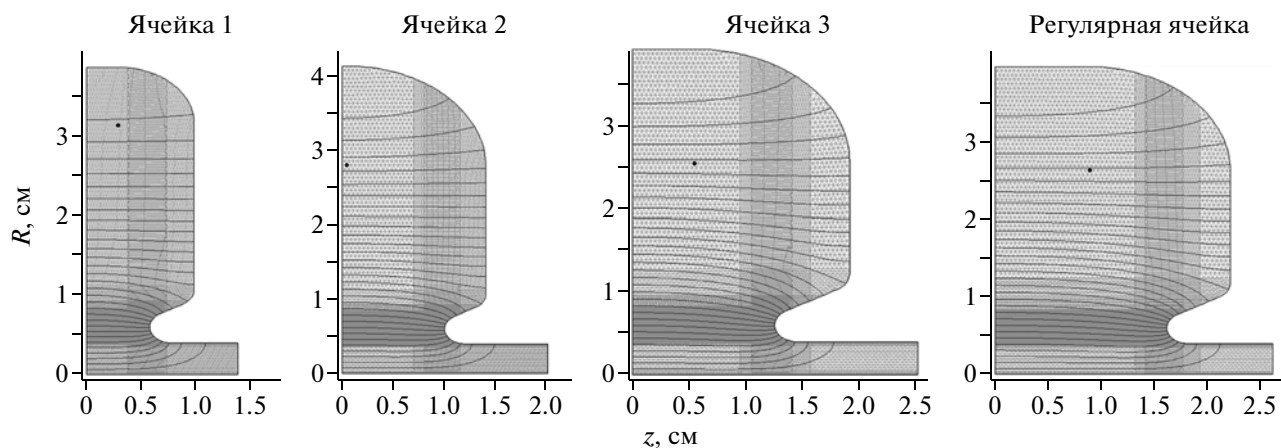


Рис. 4. Профиль и силовые линии электрического поля трех ячеек группирователя и регулярной ячейки.

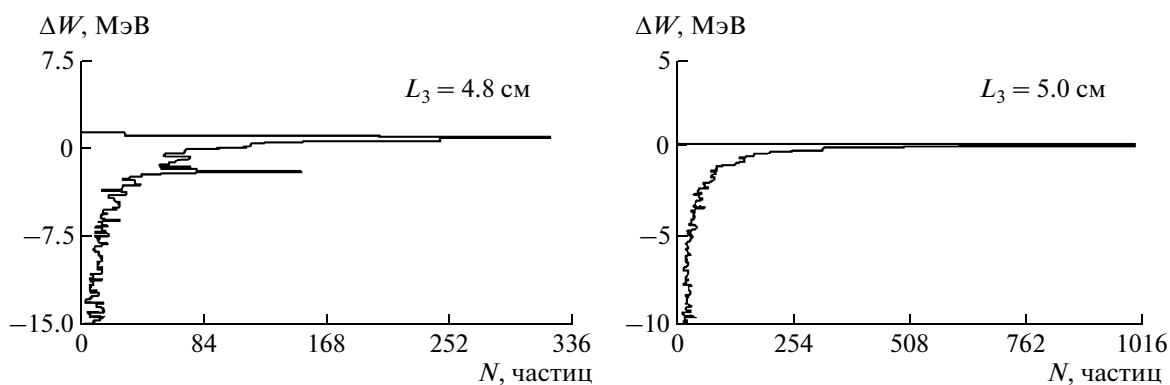


Рис. 5. Энергетические спектры при различных длинах  $L_3$  третьей ячейки.

полей в регулярной ячейке и ячейках группирователя были выбраны таким образом, чтобы мощность потерь в стенках и мощность ускоряемого пучка в сумме составляли входную мощность для этой секции (3 МВт), т.е. был сведен баланс мощности.

Далее были добавлены трубка дрейфа длиной  $L_{dr} = 78.8$  мм и вторая секция ускорителя. Фаза на входе второй секции уменьшена на  $90^\circ$ , так как питание осуществлялось через трехдецибелльный мост.

Аналогично были настроены остальные ускоряющие секции.

Изменением входного тока и перерасчетом напряженностей поля во всех ячейках баланс мощности был сведен таким образом, чтобы максимальная выходная энергия электронов составляла 40 МэВ при суммарной мощности клистронов 12 МВт. При этом также контролировался выходной энергетический спектр пучка. Он должен быть максимально узким и иметь один пик. Соответ-

ствующие данные приведены в табл. 1. Входной ток инжекции при этих расчетах составил 0.2 А.

Ширина энергетического спектра на выходе ускорителя составила 2%.

На рис. 6 приведены рассчитанные на выходе ускорителя фазоэнергетический спектр (рис. 6а), распределение частиц в поперечном сечении (рис. 6б), фазовый спектр (рис. 6в) и энергетический спектр (рис. 6г).

#### Расчет геометрии структуры

По результатам расчета динамики была смоделирована и оптимизирована геометрия структуры. Подобрана оптимальная геометрия ускоряющих ячеек, ячеек связи, окон связи между ними, узла ввода мощности в структуру.

На рис. 7 показана геометрия бипериодической ускоряющей структуры (б.у.с.), состоящей из двух ускоряющих полуячеек и ячейки связи с

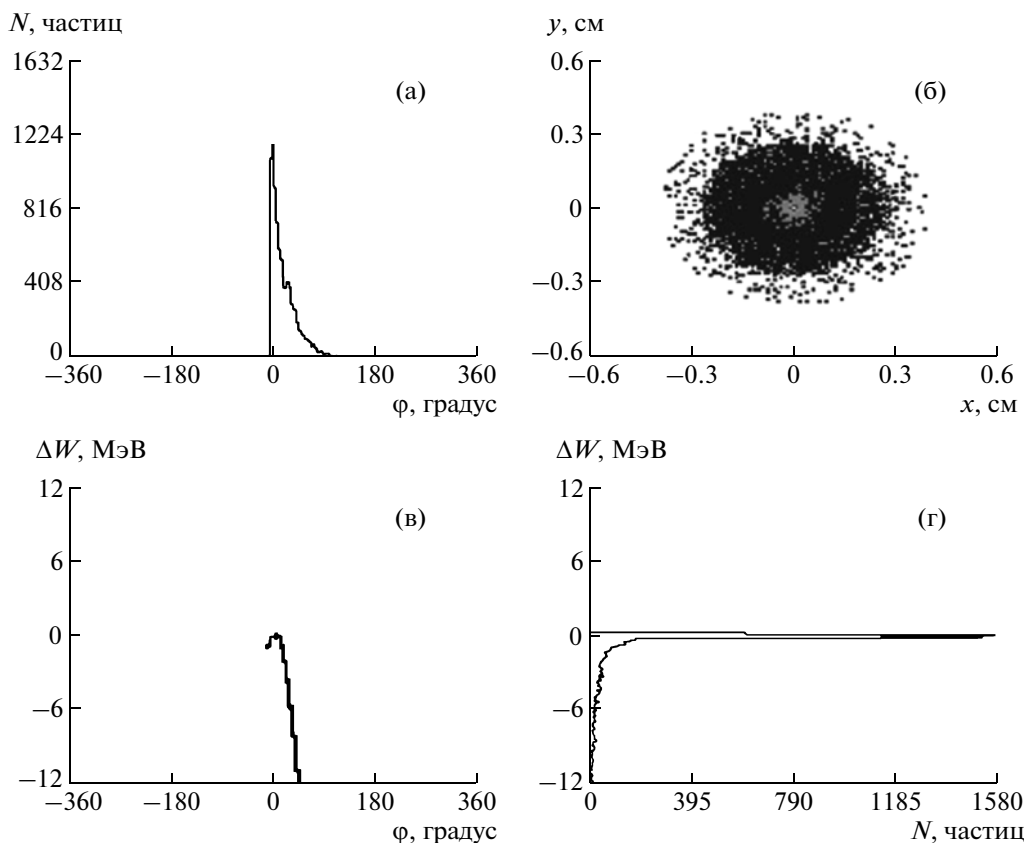


Рис. 6. Параметры пучка на выходе из ускорителя: а – фазоэнергетический спектр; б – распределение частиц в поперечном сечении; в – фазовый спектр; г – энергетический спектр.

указанием их размеров. Ячейки настраивались на частоту 2856 МГц на рабочем виде колебаний  $\pi/2$ .

Настройка проводилась по известной схеме [2] путем изменения радиуса ячейки  $r_{ac}$ , угла раствора щели  $\phi$  и радиуса ячейки связи  $r_{cc}$  с использованием электрических и магнитных граничных условий на торцах резонансного макета. Критериями настройки являлись: минимальное электрическое поле на оси ячейки связи и нужное соотноше-

ние напряженностей поля в соседних ускоряющих ячейках структуры. Требуемое соотношение напряженностей полей в соседних ячейках достигалось правильным выбором размеров и положения щелей связи (размер отверстия в диафрагмах оставался неизменным по всей длине структуры). При изменении коэффициента связи важным условием было отсутствие перекрытия щелей в соседних диафрагмах.

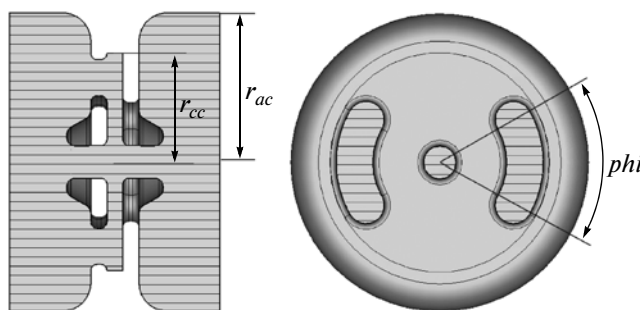
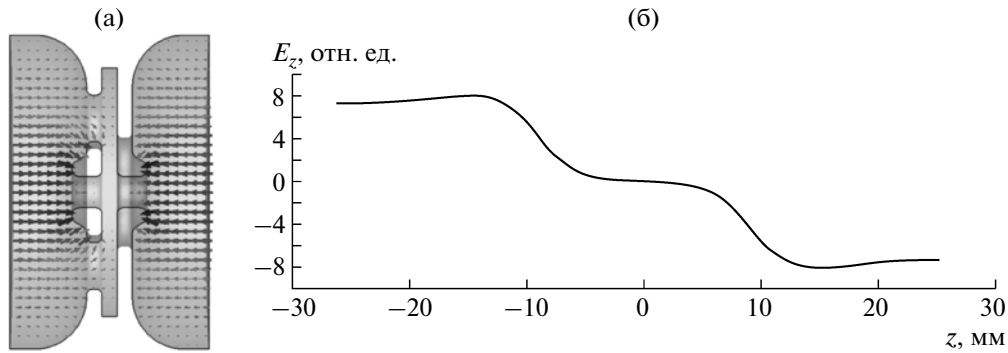
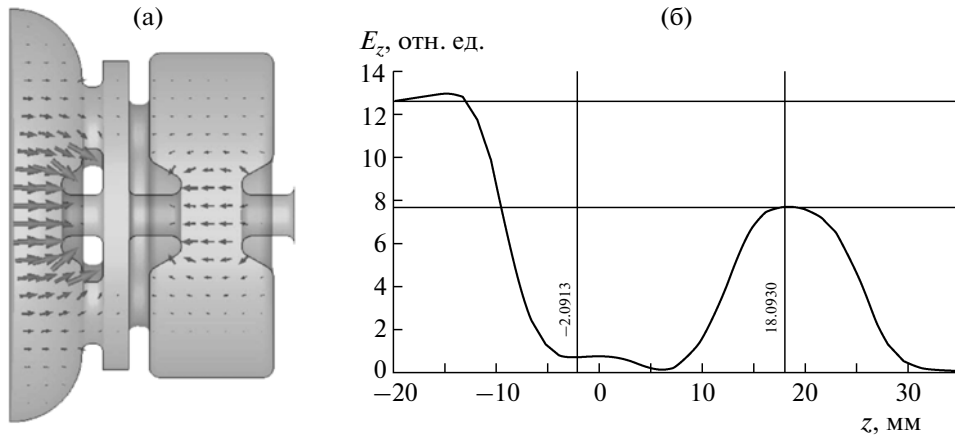


Рис. 7. Геометрия бипериодической ускоряющей структуры с указанием радиусов ускоряющей ячейки  $r_{ac}$  и ячейки связи  $r_{cc}$ , а также угла раствора щели связи  $\phi$ .



**Рис. 8.** Силовые линии электрического поля для вида колебаний  $\pi/2$  (а) и изменение продольной компоненты электрического поля по длине структуры (б).



**Рис. 9.** Силовые линии электрического поля для вида колебаний  $\pi/2$  (а) и изменение продольной компоненты электрического поля по длине структуры при настройке ячейки № 1 группирователя (б).

На рис. 8а изображены силовые линии электрического поля на виде колебаний  $\pi/2$  в резонансном макете для структуры с относительной фазовой скоростью  $\beta_{\phi} = 0.999$ , а на рис. 8б показано изменение продольной компоненты электрического поля на оси по длине настроенной структуры. Согласно рис. 8б, в ячейке связи поле отсутствует.

Для настройки третьей ячейки собирался резонансный макет с половиной уже настроенной регулярной ячейки № 4, половиной ячейки № 3 и с ячейкой связи между ними № 4–3.

При настройке второй ячейки группирователя резонансный макет должен включать половину настроенной ячейки № 3, половину ячейки № 2 и ячейку связи № 3–2.

На рис. 9 показаны картина электрического поля и изменение продольной компоненты электрического поля по длине при настройке ячейки

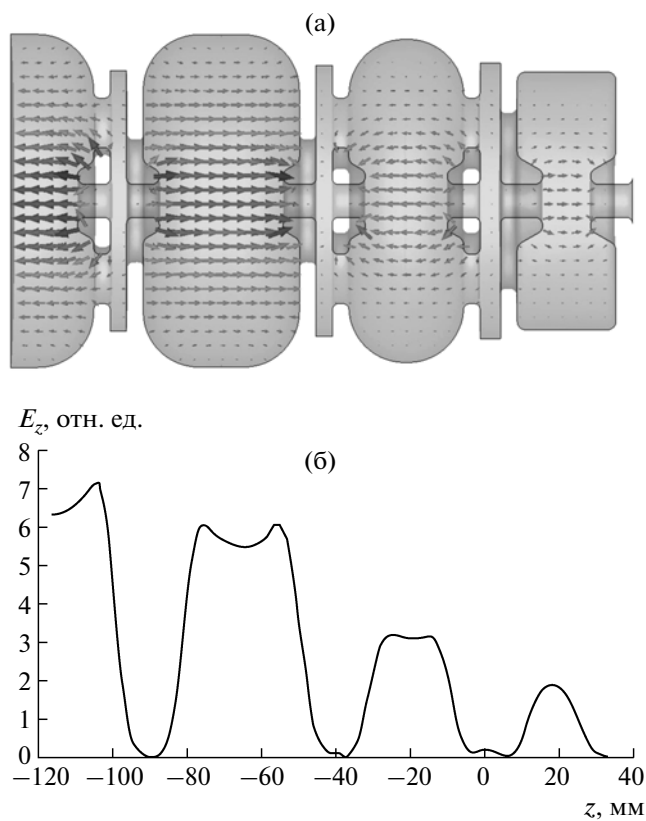
№ 1 группирователя. После настройки соотношение полей в ячейках № 1 и № 2 составило 0.609.

Далее был проведен расчет макета, состоящего из настроенных ранее ячеек. Картина поля в полученной структуре на частоте 2856.3 МГц представлена на рис. 10.

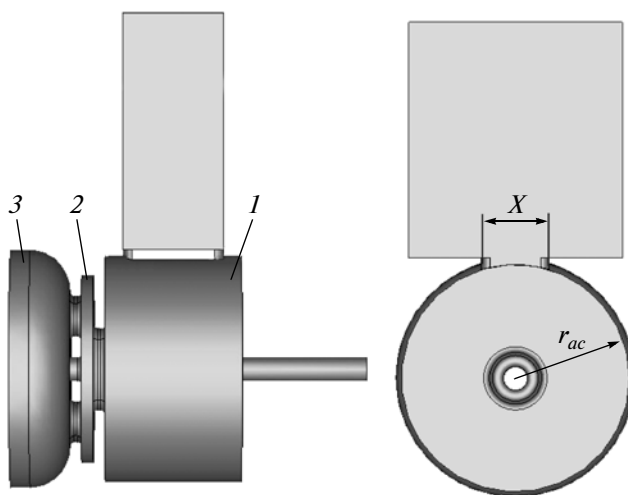
#### *Расчет ввода мощности*

При настройке ввода мощности использована методика, изложенная в работе [3]. Для рассматриваемой б.у.с., состоящей из 12 ячеек (с учетом ячейки ввода мощности), рассчитывался оптимальный коэффициент связи подводящего волновода с б.у.с. по формуле

$$\rho_{\text{опт}} = \left( \frac{I_0}{2} \sqrt{\frac{r_{\text{ш}} \varepsilon_{\text{эф}} l}{P_0}} + \sqrt{1 + \frac{I_0^2 r_{\text{ш}} \varepsilon_{\text{эф}} l}{4 P_0}} \right)^2,$$



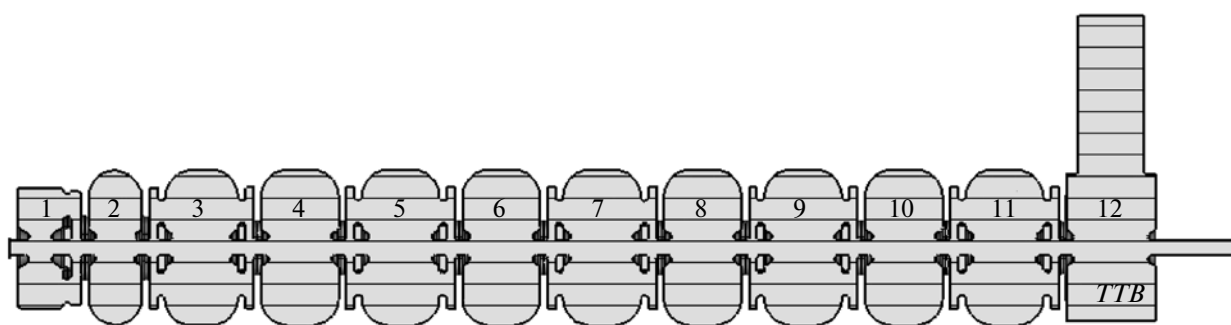
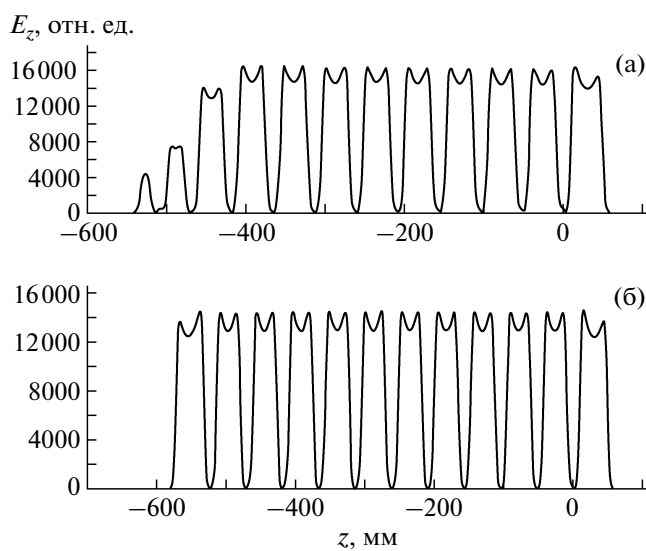
**Рис. 10.** Силовые линии электрического поля для вида колебаний  $\pi/2$  (а) и изменение продольной компоненты электрического поля по длине структуры, состоящей из трех ячеек группирователя и половины ускоряющей ячейки (б).



**Рис. 11.** Схема исследуемого макета, состоящего из ячейки ввода мощности (1), ячейки связи (2) и половины ускоряющей ячейки (3);  $x$  – ширина окна связи;  $r_{ac}$  – радиус ячейки ввода мощности.

**Таблица 2.** Частотные характеристики, МГц, ускоряющих секций

Мода	Секции			
	1	2	3	Группирующая
Предыдущая	2884.101	2881.619	2881.488	2891.424
$\pi/2$	2856.397	2856.173	2856.099	2856.171
Следующая	2834.330	2832.900	2832.066	2827.188
Несимметричность	5.637	2.173	1.356	6.27

**Рис. 12.** Группирующая секция из 12 ячеек. ТТВ – ячейка связи (трансформатор типа волны).**Рис. 13.** Распределение ускоряющего поля по оси группирующей секции (а) и по оси регулярной секции (б).  $E_z$  – продольное электрическое поле на оси структуры.

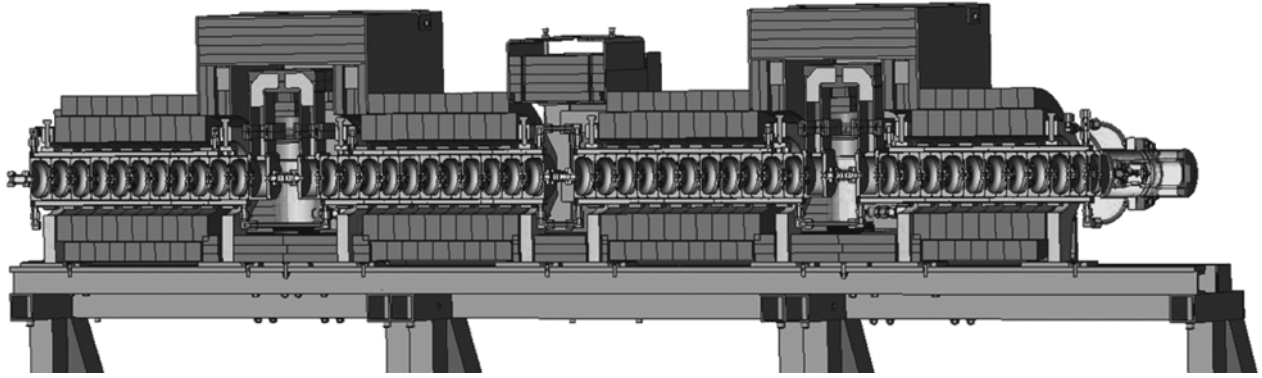


Рис. 14. Макет конструкции ускорителя в разрезе.

где  $I_0$  — ток пучка;  $P_0$  — импульсное значение мощности питания одной секции;  $l$  — длина одной секции;  $r_{\text{ш эфф}}$  — погонное шунтовое сопротивление ячеек в секции. В случае группирующей секции при  $I_0 = 0.1$  А,  $P_0 = 3$  МВт,  $r_{\text{ш эфф}} = 73$  МОм/м,  $l = 0.5925$  м получаем  $\rho_{\text{опт}} = 1.46$ , что соответствует значению  $|S_{11}| = 0.19$ . С учетом нагрузки током связь с волноводом устанавливалась чуть больше,  $|S_{11}| = 0.29$ .

Вначале настройка проводилась на макете, изображенном на рис. 11, путем изменения ширины щели связи  $X$  и радиуса обечайки  $r_{ac}$  ячейки ввода мощности. Поскольку этот макет по величине запасенной энергии отличался от реального, состоящего из 12 ячеек, то с учетом этого макет настраивался на значение коэффициента связи  $\rho = 23.12$ , т.е. на значение  $|S_{11}| = 0.91$ .

Распределение ускоряющего поля в секции с группирователем (рис. 12) показано на рис. 13. Во всех секциях угол раствора щелей магнитной связи в ячейке связи  $ТТВ$  (трансформатор типа вол-

ны) уменьшен до значения  $\phi = 49^\circ$  для выравнивания уровня поля в середине ячейки ввода мощности.

Аналогично были настроены вводы мощности в однородные структуры, состоящие из 12 регулярных ячеек. Распределение продольной составляющей электрического поля для такой настроенной структуры изображено на рис. 13б.

#### НАСТРОЙКА И ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗГОТОВЛЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Макет конструкции ускорителя в разрезе показан на рис. 14.

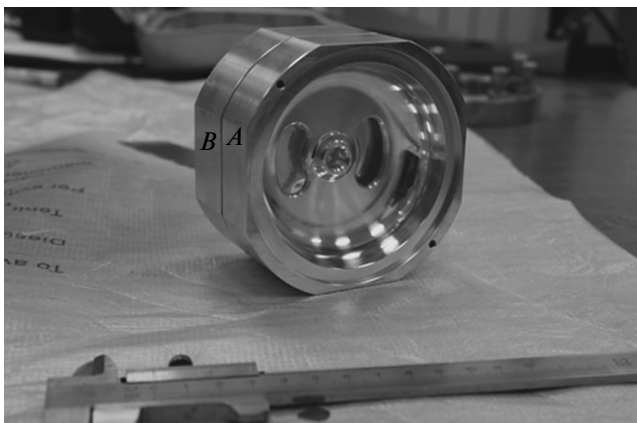


Рис. 15. Модель для измерения ускоряющих ячеек, состоящая из ячеек типа  $A$  и  $B$  и ячейки связи между ними.

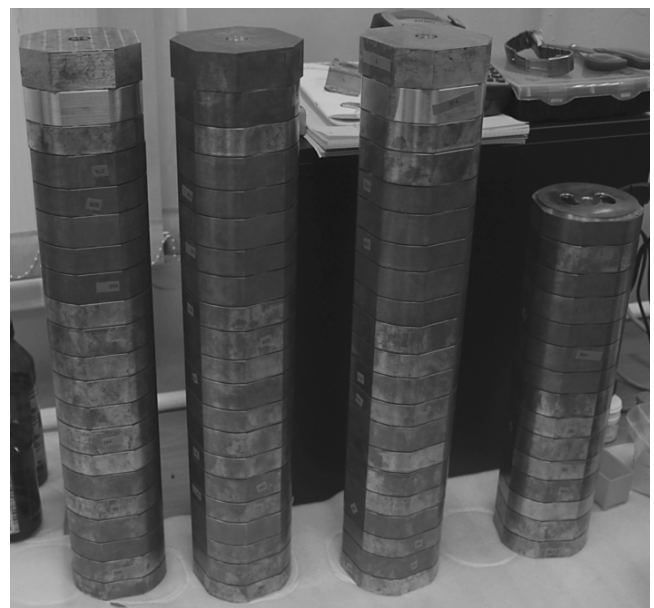


Рис. 16. Ускоряющие секции с установленными торцевыми ячейками.



**Измерения ускоряющих ячеек** проводились на модели, состоящей из двух ячеек разного типа (*A* и *B* на рис. 15). Процесс измерения проходил следующим образом: на стенд устанавливалась ячейка одного типа, после чего в паре с ней измерялись все ячейки другого типа. Измерения проходили при давлении 100 Па, также учитывалось влияние температуры макета на его частоту, поскольку измерения занимали длительное время.

Разброс измеренных частот ячеек составил  $\sim 0.5$  МГц. Чтобы добиться одинаковой частоты во всех четырех секциях, компоновка ячеек проводилась следующим образом: ячейка *A* с наибольшей частотой соединялась с ячейкой *B* с наименьшей частотой и т.д.

Частоты ускоряющей моды  $\pi/2$ , а также двух соседних мод ( $8\pi/18$  и  $10\pi/18$  – для ускоряющих секций;  $6\pi/14$  и  $8\pi/14$  – для группирующей) приведены в табл. 2. По ним определена несимметричность дисперсионной характеристики.

**Измерения трех торцевых ячеек** проводились аналогично измерениям ускоряющих ячеек. Каждая из трех ячеек поочередно измерялась в макете вместе с одной и той же полуячейкой типа *B*. Измеренные частоты макетов представлены в табл. 3. После измерения для каждой ячейки была выбрана секция. В таблице также дана резонансная частота ускоряющего вида колебаний в секциях с торцевыми ячейками. На рис. 16 приведена фотография макетов с торцевыми ячейками.

**Измерение ячеек группирувателя.** Измерялись частоты моды  $\pi/2$  для трех группирующих ячеек (рис. 17). Измерения проводились со следующими макетами: “первая ячейка + половина второй”; “половина второй + половина третьей”; “половина третьей + половина ускоряющей”; целый макет.

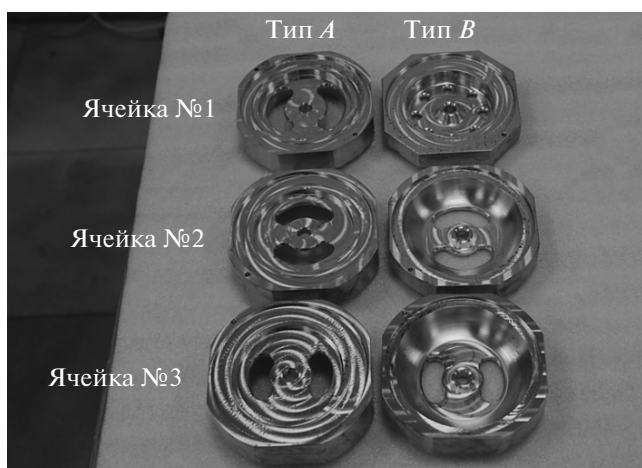


Рис. 17. Элементы трех группирующих ячеек.

Таблица 3. Частотные характеристики торцевых ячеек и компоновка их с ускоряющими секциями

Номер ячейки	$F\pi/2$ , МГц	Номер секции	Частота секции с торцевой ячейкой, МГц
1	2856.019	2	2856.129
2	2855.700	1	2856.131
3	2856.005	3	2856.080

Таблица 4. Резонансные частоты основного пика для разных ячеек ввода мощности

Номер <i>ТТВ</i>	Частота пика, МГц
1	2856
2	2855.963
3	2855.838
<i>ТТВ</i> группирувателя	2855.984

Для макета, показанного на рис. 10, резонансная частота составила 2855.778 МГц, что соответствует расчетам.

**Измерения ячеек ввода мощности** проводились на полных ускоряющих макетах, один из которых показан на рис. 18. В процессе измерения к волноводу присоединялся адаптер (прямоугольный волновод), и рассматривался пик отражения. Количество измеряемых ячеек ввода мощности (*ТТВ*) соответствует количеству секций в ускорителе. Для ускоряющих секций их размеры идентичны, для группирувателя – отличаются. Частота пика соответствовала резонансной частоте моды  $\pi/2$ . По-

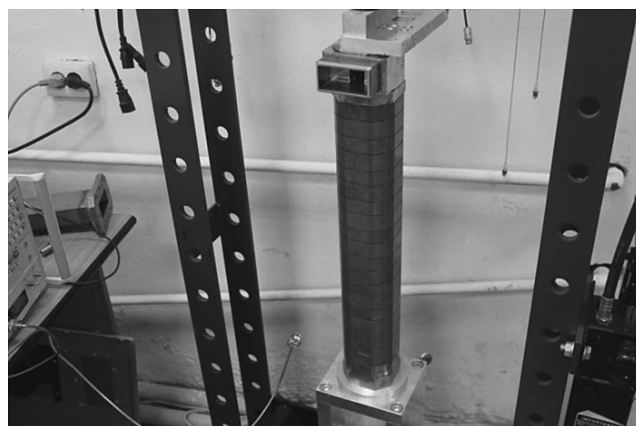


Рис. 18. Макет полной ускоряющей секции для измерения коэффициента отражения.

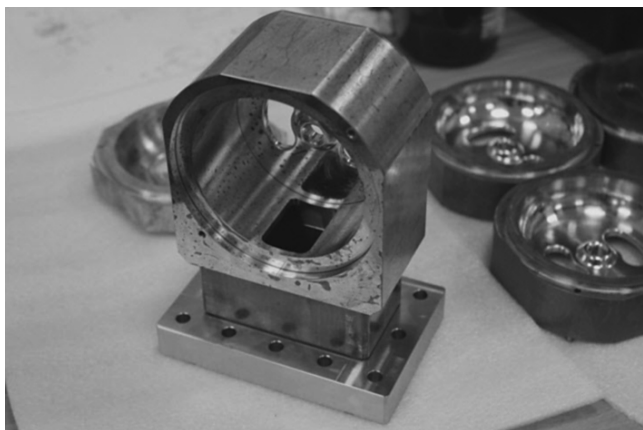


Рис. 19. Ячейка ввода мощности.

скольку добротность спаянного макета будет больше, чем измеряемого, глубина пика в неспаянном макете отличалась от расчетной величины, поэтому на данном этапе рассмотрены только частоты пиков. Они занесены в табл. 4. Ячейка ввода мощности показана на рис. 19.

**Измерение поля в секциях.** Критерием настройки ускоряющей секции является отсутствие поля в ячейках связи и однородность поля в ускоряющих ячейках. В группирователе должно соблюдаться расчетное соотношение поля в трех торцевых, группирующих и ускоряющих ячейках. Поле возмущалось продольным металлическим телом, проведенным вдоль оси структуры.

Движение возмущающего тела осуществлялось с помощью шагового двигателя. На каждом шаге двигателя измерялись амплитудное и комплексное значения коэффициента отражения на рабочей частоте, затем с учетом значения коэффициента отражения до и после прохождения телом структуры рассчитывалось значение поля.

На рис. 20а приведена продольная компонента ускоряющего поля вдоль оси однородной ускоряющей секции при длине возмущающего тела 5 мм. Согласно рисунку, поле однородно, и в ячейках связи оно равно нулю. Для подтверждения того, что смещение нуля на графике обусловлено только временным дрейфом, связанным с внешними факторами, проведено измерение поля в точках, соответствующих центрам ускоряющих и группирующих ячеек (рис. 20б).

Таким же способом было измерено поле в группирующей секции (рис. 20в). Согласно рисунку, распределение поля соответствует рассчитанному (см. рис. 13а).

Таким образом, полученные в ходе измерения изготовленных секций данные находятся в соот-

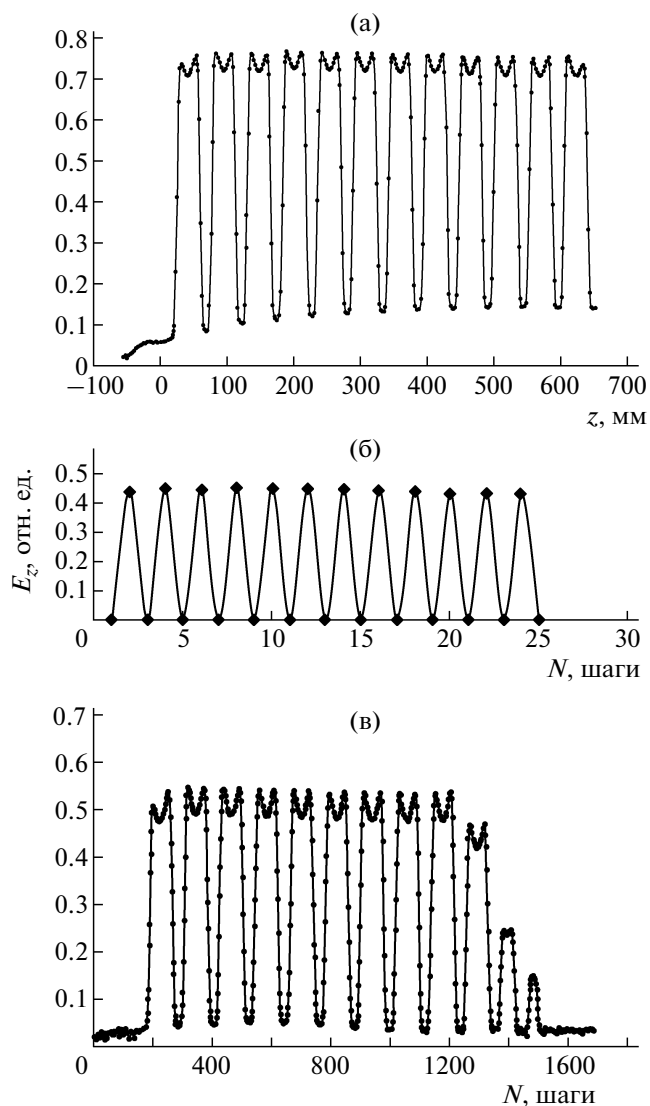


Рис. 20. Продольное поле вдоль оси ускоряющей секции (а), в центрах ячеек (б), вдоль оси группирующей секции (в).

ветствии с результатами их численного моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завадцев А.А., Завадцев Д.А., Краснов А.А. и др. // ПТЭ. 2011. № 2. С. 101.*
2. *Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П. Ускоряющие структуры. М.: МИФИ, 2005.*
3. *Sobenin N., Zverev B. Electrodynamic Characteristics of Accelerating Cavities. Foundation for International Scientific and Education Cooperation. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers S.A., 1999; Собенин Н., Зверев В. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993.*