

**УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 60 МЭВ С ТОКОМ
В ИМПУЛЬСЕ 1 АМПЕР**

Р. М. ВОРОНКОВ, В. А. БОЙКО, М. В. ФИЛИППОВА, Б. В. РОМАНОВ,
Н. П. СОБЕНИН, И. С. ЩЕДРИН, В. М. СВЕТЛОВ, Б. В. ЗВЕРЕВ,
В. А. ПАВЛОВСКИЙ, В. Н. ПОДШИВАЛОВ

*Радиотехнический институт АН СССР, Москва
Докладчик. Р. М. Воронков*

Ускоряющая структура предназначена для линейного ускорителя электронов на энергию 60 Мэв с током 1а в импульсе длительностью от 0,01 мксек до 5,5 мксек [1]. При выборе параметров ускоряющей системы учитывалось, что получение энергии 60 Мэв при токе 1а и длительности импульса 5,5 мксек представляет значительную трудность, обусловленную явлением «укорочения импульса». Анализ работ, посвященных этому явлению, позволил сформулировать ряд дополнительных требований к ускоряющей структуре сильноточного ускорителя, которые можно представить в следующем виде:

1. Увеличение рабочей длины волны.
2. Использование структуры с видом колебаний $2\pi/3$.
3. Использование ускоряющей структуры с переменным импедансом.
4. Уменьшение общей длины ускорителя за счет увеличения напряженности электрического поля.
5. Разрезание дисков диафрагмированного волновода. Описываемая ускоряющая структура была спроектирована с учетом этих дополнительных требований.

Ускоряющая структура содержит шесть секций диафрагмированного волновода, к каждой из которых подводится мощность 20 Мвт в импульсе при среднем значении мощности 18 квт. Рабочая длина волны 16,5 см.

Первая секция представляет собой группирователь, обеспечивающий получение сгустка с фазовой протяженностью не более 10° . Напряжение инжекции составляет 120 кв, энергия электронов на выходе группирователя 5 Мэв. Группирователь состоит из отрезка диафрагмированного волновода с переменной фазовой скоростью и отрезка волновода с фазовой скоростью, равной скорости света, соединенных между собой согласующими ячейками. Для обеспечения указанных параметров пришлось использовать быстропеременное и местами скачкообразное изменение фазовой скорости и амплитуды ускоряющей волны вдоль оси первого отрезка.

Остальные пять секций представляют собой отрезки диафрагмированного волновода с фазовой скоростью, равной скорости света, длиной 1,7 м. Волновод имеет переменный импеданс, рабочий вид колебаний $\frac{2\pi}{3}$, на дисках имеются две пары взаимно перпендикулярных разрезов. Групповая скорость от начала секции к концу убывает с 0,023 до 0,012с, время заполнения составляет 0,3 мксек. Напряженность поля при токе равном 0 нарастает к концу волновода от 95 кв/см до 129 кв/см, а при токе 1,1а спадает от 95 кв/см до 62 кв/см, прирост энергии электронов на секции составляет 18,3 Мэв в холостом режиме и 13,6 Мэв при токе 1,1а.

Конструктивно секция состоит из трех отдельных узлов: трансформатора типа волны (TTB), диафрагмированного волновода и оконечной нагрузки (рис. 1). Для обеспечения герметичности при соединении узлов применены индиевые уплотнения.

С целью уменьшения влияния TTB на радиальное движение электронов конструкция его выбрана таким образом, что высокочастотное электрическое поле в полости TTB в приаксиальной области симметрично. Эпюра напряженности электрического поля в TTB приведена на рис. 2 где ось OZ совпадает с направлением движения электронов, ось ОХ—с осью прямоугольного волновода, подводящего ВЧ мощность к TTB.

Диафрагмированный волновод состоит из 29 чашек, из которых первая конструктивно входит в TTB, а 29-я в нагрузку. Чашки изготовлены из бескислородной меди. На все основные размеры приняты односторонние допуски 10 мкм. Заготовки чашек изготавливались из круглых дисков методом горячей штамповки и протачивались до заданных размеров с припуском 0,1 мм в несколько операций с двумя промежуточными отжигами в вакуумной печи. Окончательная обработка проводилась алмазными резцами, чистота поверхности получалась не хуже 9 класса. Результаты измерений основных геометрических размеров чашек (диаметр волновода $2b$, диаметр отверстия в дисках— $2a$, толщина диска t , глубина чашек— d) представлены в виде гистограмм на рис. 3 из которых видно, что большинство чашек имеет отклонение не более 7 мкм. Волновод имеет рубашку охлаждения. Секция охлаждается терmostатированной водой с температурой $35 \pm 1^\circ\text{C}$. Расход воды выбран

так, чтобы перепад температуры вдоль секции не превышал 2°C. Оконечная нагрузка имеет такую же конструкцию, как и диафрагмированный волновод, и состоит из 7 чашек. Внутренняя поверхность последних шести чашек нагрузки покрыта поглощающим материалом (альсифер). Площадь покрытия выбрана такой, чтобы в каждой чашке рассеивалась одинаковая мощность. Затухание мощности вдоль нагрузки плавно возрастает от 0,8 дБ в первой чашке до 3 дБ в последней. Общее затухание 10 дБ в одном направлении. Нагрузка имеет отдельную рубашку охлаждения.

Перед пайкой секций были проведены измерения собственных частот на резонансном макете по методике, описанной в работе [2]. В процессе измерений учитывалось влияние соседних чашек. Чашки с одинаковыми номерами в разных комплектах имеют разброс по частоте менее $\pm 0,1$ МГц.

Настройка ТТВ осуществлялась по стандартной методике с использованием подвижной поглощающей нагрузки [3]. В настроенном ТТВ измерялись составляющие электрического поля в аксиальной области. В случае недостаточной симметрии поля размеры ТТВ изменялись, а процедура настройки и измерения поля повторялась.

На рис. 4 приведены полосовая характеристика ТТВ (кривая 1), полосовая характеристика секции, снятая с подвижной нагрузкой (кривая 2) и полосовая характеристика секции с окончной рабочей нагрузкой (кривая 3). Как видно из этих кривых, величина КСВН не превышает 1,2 в диапазоне частот ± 2 МГц относительно рабочей частоты.

Измерения отражений в каждой ячейке секции, проведенные с помощью подвижной поглощающей нагрузки, показали, что коэффициент отражения нигде, включая и места спаев подсекций, не превышает 0,03.

Методом нерезонансных возмущений определен полный сдвиг фазы высокочастотного поля на различных частотах. В результате было найдено, что фазовая скорость волны равна скорости света на частоте 1818,7 МГц при температуре 35°C и в условиях вакуумирования волновода.

Экспериментальные данные на рабочей частоте о напряженности ускоряющего поля и сдвига фазы на каждую ячейку были получены при перемещении на оси волновода металлического цилиндра длиной 10 мм и диаметром 1,5 мм. Сдвиг фазы на ячейку с погрешностью, свойственной данному методу ($\pm 0,5^\circ$), оказался равным 120° . Значения напряженности поля, полученные упомянутым выше способом, совпали с расчетными с погрешностью $\pm 5\%$.

В заключение необходимо отметить, что дополнительные требования к ускоряющим секциям для больших импульсных токов не приводят к значительному усложнению технологии, при этом ВЧ параметры секций на рабочей волне получаются хорошими.

Принятые жесткие допуски на основные размеры чашек вполне се-

бя оправдывают, так как существенно сокращают время настройки секции и не приводят к заметному увеличению брака при изготовлении.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Воронков Р. М., Бойко В. А., Шмыгов А. М., Филиппова М. В. «Атомная энергия» т. 26, вып. 4, апрель 1969 г.
2. Павловский В. А., Собенин Н. П., сборник «Ускорители», выпуск 10, 93, 1968 г.
3. Вальднер О. А. и другие «Справочник по диафрагмированным воловодам», Атомиздат, 1969 г.

Д И С К У С С И Я

Loew: Is your accelerator now in operation?

Воронков: Ускоряющая структура изготовлена и проведены предварительные наладочные работы на стенде. Заканчиваются строительные работы, предшествующие началу монтажа.

Neal: Can you report any data about the beam blow-up in your accelerator?

Воронков: Есть пока предположения, основанные на данных других машин, что пучок в ускорителе с заданными параметрами не будет разваливаться.

Neal: I should like to get more detailed data. Nemely what are the values of limiting current with the slots in the discs and without them?

Воронков: На этот вопрос ответить не просто, т. к. в проекте ускорителя заложено пять мер по борьбе с развалом пучка. Нам кажется, что наиболее эффективным средством являются щели.

Loew: What is the pulse lenght in your linac?

Воронков: Длину импульса можно изменять в пределах от 0,01 мкsec до 5,5 мкsec. Имеются четыре фиксированных значения длительности импульса: 0,01; 0,05; 0,25; 5,5 мкsec.

Neal: How much does the peak field strength decrease due the presence of slots?

Воронков: Щели практически не влияют на градиент на волне E_{01} .

Серов: Какие фокусирующие устройства предполагается установить на ускорителе?

Воронков: На первой секции есть соленоид со спадающим полем от 800 до 400 эрстед. В других секциях фокусирующих устройств нет, однако в промежутках между ними имеются квадрупольные дублеты.

Loew: Is the HEM₁₁-wave of the forward or backward type?

Воронков: Эта волна обратного типа.

Haimson: I hope it will be helpful for Dr. Voronkov to know some data about high current linacs built in the last years. The linac for medical purposes in Washington consists of 5 section. It current is 4.5 amps and the pulse length is 10 μ sec. The only method to eliminate the beam blow-up is to vary the impedance along the waveguide. No other means are used to supress the HEM₁₁-wave. My opinion is that it would be better not cut discs. Moreover, a linacs with the slotted discs may have greater attenuation and after the long operation time sections may be seriously detuned.

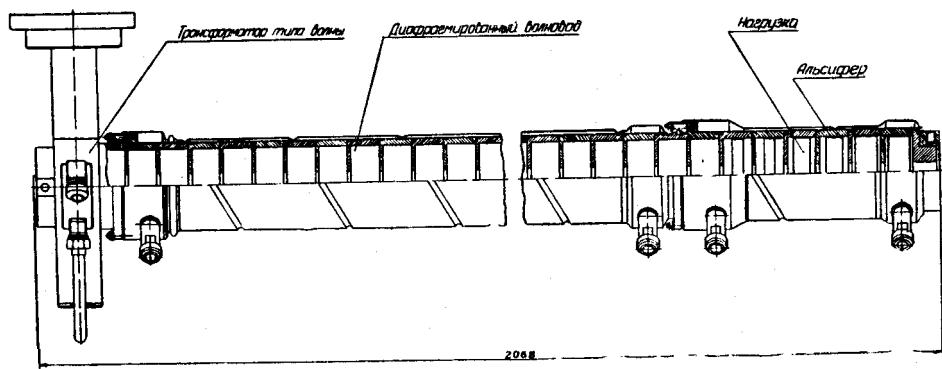


Рис. 1

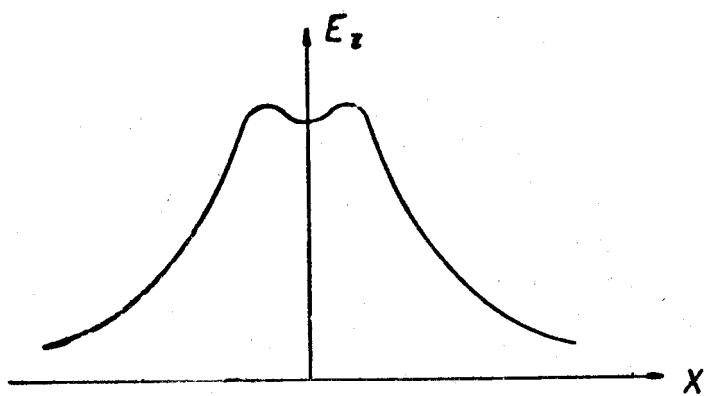


Рис. 2

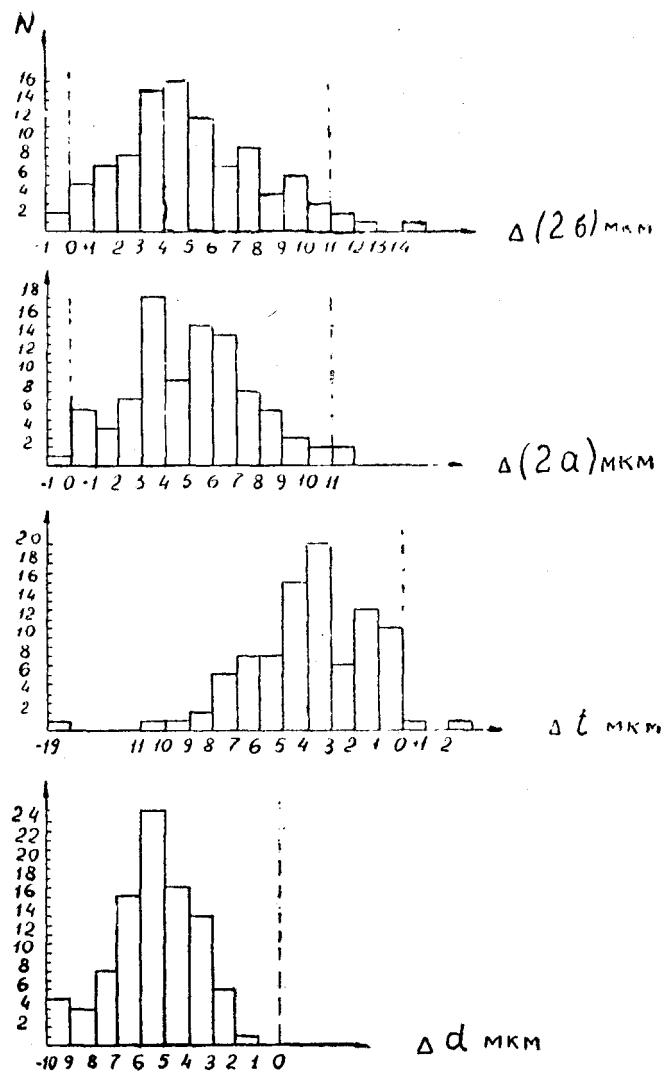
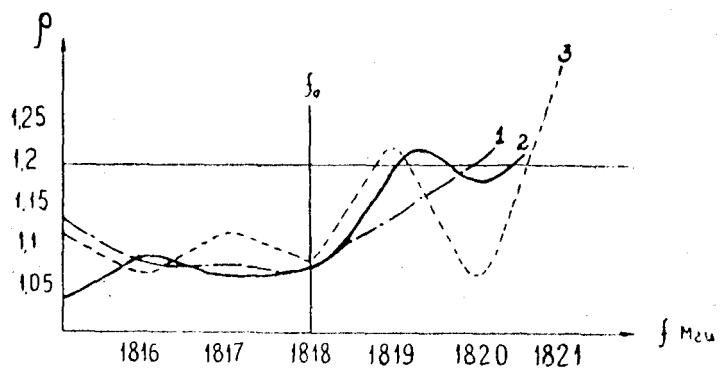


Рис. 3.



— КСВН трансформатора
— КСВН секции
--- КСВН секции с нагрузкой

Рис 4