

Проект сильноточного линейного ускорителя электронов

Р. М. ВОРОНКОВ, В. А. БОЙКО, А. М. ШМЫГОВ, М. В. ФИЛИППОВА

УДК 621.384.643

Радиотехнический институт АН СССР разрабатывает линейный ускоритель электронов, предназначенный для проведения исследовательских работ по физике твердого тела и по нейтронной спектроскопии, требующих интенсивных потоков излучений как по среднему, так и по импульсному значению.

Согласно техническому заданию, пучок ускоренных электронов на выходе установки должен иметь следующие основные параметры:

Энергия электронов в максимуме спектра	60 Мэв
Ширина спектра энергий по полуспаду тока	5%
Суточная нестабильность энергии	± 5
Точка пучка в импульсе	1а
Суточная нестабильность тока	$\pm 5\%$
Длительность импульса	5,5; 0,25; 0,05 и 0,01 мксек
Частота следования импульсов:	
при длительности 5,5 мксек	50—150 гц
при остальных длительностях	50—900 гц
Диаметр пучка по полуспаду тока	Не более 2 см
Продолжительность цикла непрерывной работы	4 суток

Получение ускоренных электронов с заданными параметрами пучка представляет значительную трудность, обусловленную явлением «укорочения импульса». В работах [1—7] было показано, что укорочение импульса обусловлено воздействием на пучок электронов одной из гармоник излучения, генерируемого самим пучком в ускоряющей структуре. Эта гармоника представляет собой гибридную волну типа EH_{11} с отрицательной дисперсией, возбуждающуюся на частоте приблизительно в 1,5 раза выше рабочей. Поперечная составляющая силы Лоренца, связанная с волной EH_{11} , остается конечной и для релятивистских скоростей, что приводит к нарушению радиальной устойчивости пучка вплоть до его разрушения. Установлено, что предельный ток пучка тем меньше, чем больше рабочая частота источника СВЧ-питания, длина секций (и ускорителя в целом) и длительность импульса.

Характеристика современного состояния техники линейных ускорителей электронов с интересующей нас точки зрения может быть представлена в виде диаграммы (рис. 1). На этой диаграмме некоторые из действующих и проектируемых ускорителей изображены в виде точек

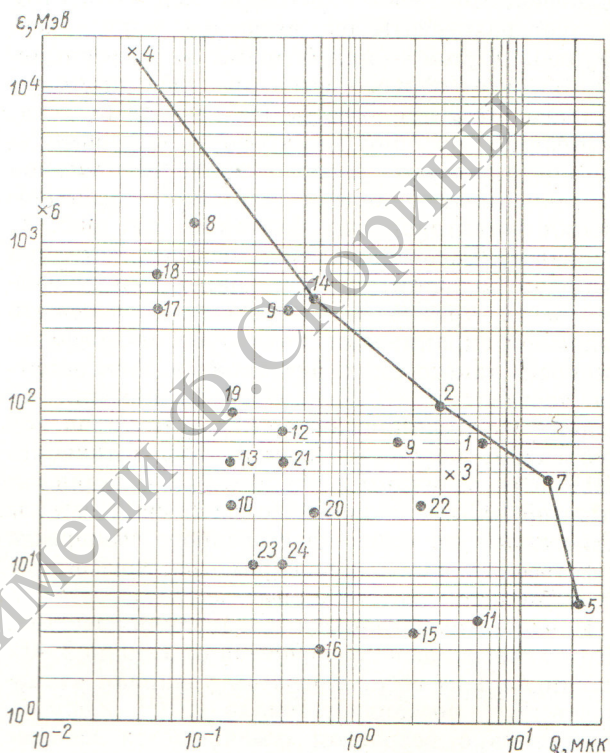


Рис. 1. Диаграмма зарядов в импульсе Q и выходных энергий ϵ различных ускорителей (крестики — ограничение тока явлением укорочения импульса).

с координатами Q и ϵ . Точки на диаграмме обозначены номерами в соответствии с таблицей.

Из диаграммы видно, что «фронт» простирается от ускорителя в Станфорде на энергию 16 Гэв при токе 25 ма и длительности импульса 1,5 мксек (заряд в импульсе 0,037 мкк) до ускорителя в Сиэттле с параметрами 6 Мэв; 2,7 а; 8 мксек; 21,6 мкк соответственно. Проектируемый ускоритель находится непосредственно на линии «фронта». При рассмотрении диаграммы и таблицы можно видеть, что на линии «фронта» или близко от нее находятся лишь не ускорители, в которых предусмотрены следующие меры по устранению явления укорочения импульса (см. таблицу):

- 1) увеличение рабочей длины волны;
- 2) использование ускоряющей структуры с видом колебаний $2\pi/3$;
- 3) использование ускоряющей структуры с переменными размерами с целью уменьшения протяженности участков, на которых поддер-

Параметры некоторых линейных ускорителей электронов

№ п/п	Страна	Город	Организация	Энергия, Мэв	Ток в импульсе, а	Длительность импульса, мксек	Заряд в импульсе, мкКл	Средства против укорочения импульса
1	СССР	Москва	Радиотехнический ин-т	60	1	5,5	5,5	1, 2, 3, 4, 5
2	США	Гейтерсбёрг	Нац. бюро стандартов	100	0,5	6	3	1, 2
3	»	Трой	Ренселерский политехнический ин-т	35	0,82 *	4,6	3,8	1, 4
4	»	Станфорд	Станфордский ун-т	16 000	0,025 *	1,5	0,037	{2, 3
5	»	Сизтл	«Боинг корпорейшн»	6	2,7	8	21,6	2, 3
6	СССР	Харьков	ФТИ АН УССР [8]	1 800	0,01 *	1	0,01	1, 4
7	США	—	Калифорнийский ун-т	35	0,5	30	15	—
8	Франция	Орсе	Высшая нормальная школа	1 300	0,08	1	0,08	3
9	Италия	Фраскати	Национальная лаборатория	400	0,1	3,2	0,32	2, 3, 5
				25	0,25	0,6	0,15	—
10	СССР	Москва	ИАЭ [9]	—	—	—	—	—
11	»	»	—	5	1	5	5	1, 3
12	Бельгия	Молль	Евратом	80	0,2	1,5	0,3	1, 3, 4
13	Франция	Сакле	КАЭ	46	0,085	2	0,17	3
14	»	»	»	500	0,05	10	0,5	2, 3
15	Англия	—	—	4	1	2	2	3
16	СССР	Москва	МИФИ [10]	3	0,18	3	0,54	3
17	»	Харьков	ФТИ АН УССР [11]	400	0,05	1	0,05	2, 4
18	США	Станфорд	Станфордский ун-т	630	0,05	1	0,05	—
19	Канада	Саскатун	Саскачеванский ун-т	98	0,158	1	0,158	2, 3
20	США	Ливермор	Калифорнийский ун-т	22	0,25	2	0,5	—
21	ФРГ	Гамбург	—	46	0,25	1,6	0,4	—
22	США	Сан-Диего	Лаборатория Гопкинса	25	0,5	4,5	2,25	—
23	»	—	Корнеллский ун-т	10	0,2	1	0,2	1
24	Япония	Токио	Токийский ун-т	10	0,15	2	0,3	—

* Наблюдается явление укорочения импульса.

живается когерентность поля обратной волны. Этот метод имеет множество вариаций от секций с различными параметрами до структур с плавно изменяющимися параметрами;

4) уменьшение длины ускорителя за счет увеличения напряженности поля;

5) наведение радиальных разрезов на дисках ускоряющей структуры.

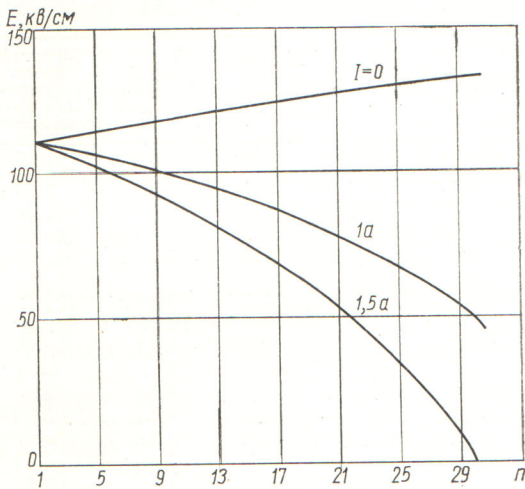
Следует отметить, что ни одна из перечисленных мер не находится в противоречии с какой-либо другой из них. В то же время ни одна из этих мер в отдельности не исключает полностью укорочение импульса. Поэтому представляется целесообразным применить в той или иной степени все эти меры.

В соответствии с изложенными соображениями в проектируемой установке ускоряющая структура представляет собой диафрагмированный волновод на длине волны 16,5 см с видом колебаний $2\lambda/3$ с переменными размерами (отношение a/λ изменяется от 0,12 в начале до 0,1 в конце секции, где a — радиус отверстия

в дисках, λ — длина волны) с длиной секции 1,7 м и двумя взаимно перпендикулярными радиальными разрезами на каждом диске.

В описываемом ускорителе средняя мощность пучка ускоренных электронов достигает 60 квт, поэтому энергетика машины представляет существенный интерес. В частности, весьма важен вопрос о к. п. д. преобразования энергии источника СВЧ-колебаний в энергию ускоренных электронов.

Известные методы энергетического расчета ускорителя применимы лишь к структурам с постоянными размерами. Для структур с переменными размерами аналитическое решение в общем виде не представляется возможным. Поэтому расчет проводили методом численного интегрирования, исходя из уравнения баланса мощностей. Результаты такого расчета приведены на рис. 2, где показано изменение напряженности СВЧ-поля (усредненной по периоду структуры) вдоль оси волновода при вводимой мощности 19 Мвт. Проинтегрировав соответ-



Р и с. 2. Зависимость напряженности поля E от порядкового номера ячейки n при различных значениях тока пучка I .

ствующую кривую, можно найти прирост энергии электронов на секции при данном токе.

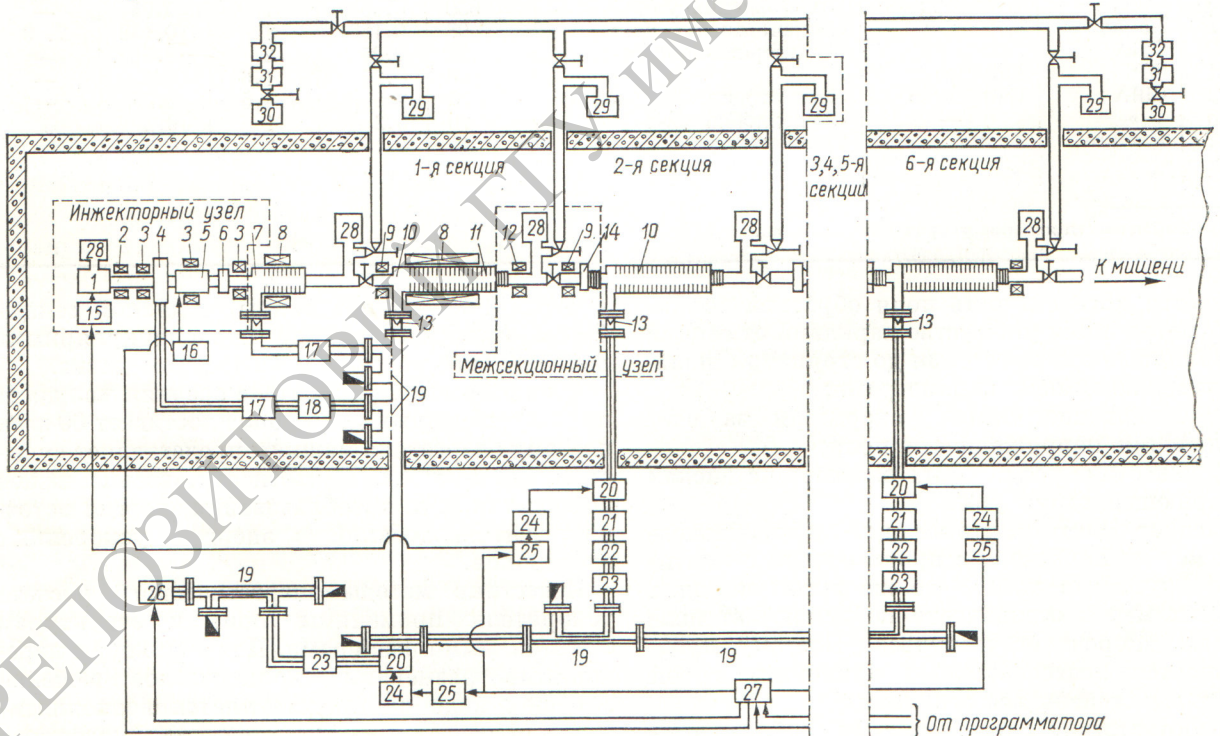
Для тока $1 a$ приобретаемая на секции энергия составляет $14,6 Mэв$ и к. п. д. около 75% .

На рис. 3 представлена упрощенная блок-схема ускорителя. Собственно ускоритель состоит из инжекторного узла, группирователя, шести секций диафрагмированного волновода и шести межсекционных узлов.

В состав инжекторного узла входят электронная пушка, чоппер, инфлектор и фокусирующие элементы.

Электронная пушка диодного типа имеет катод из гексаборида лантана, разогреваемый электронной бомбардировкой от вспомогательной пушки. Напряжение инжекции $120 кв$. Керамический изолятор пушки погружается в масляный бак повышающего импульсного трансформатора, на вход которого подается импульсное напряжение $40 кв$ с выхода модулятора клистрона второй секции.

Чоппер рассчитан на вырезание их электронного потока сгустков с протяженностью, соответствующей половине периода СВЧ-колеба-



Р и с. 3. Блок-схема ускорителя на $60 Mэв$:

- 1 — пушка; 2 — корректирующая катушка; 3 — линза; 4 — чоппер; 5 — инфлектор; 6 — отклоняющий магнит; 7 — группирователь; 8 — фокусирующая катушка; 9 — блок датчиков тока и положения пучка; 10 — диафрагмированный волновод; 11 — внутриволноводная нагрузка; 12 — квадрупольная линза; 13 — волноводное окно; 14 — ламельный датчик высаяживания пучка; 15 — импульсный трансформатор пушки; 16 — модулятор инфлектора; 17 — фазовращатель; 18 — аттенуатор; 19 — направленный ответвитель; 20 — клистрон; 21 — фазовращатель; 22 — ферритовый вентиль; 23 — аттенуатор; 24 — импульсный трансформатор клистрона; 25 — модулятор клистрона; 26 — возбудитель; 27 — таймер; 28 — высоковакуумный насос «Норд 10»; 29 — вакуумный агрегат ЦВА-1-2; 30 — вакуумный агрегат АВМ-50; 31 — фильтр цеолитовый; 32 — азотная ловушка.

ний. Вводимая в него для этого мощность составляет около 2 *квт* в импульсе.

Инфлектор служит для формирования требуемой длительности импульса ускоренных электронов из импульса модулятора клистрона. Напряжение коммутации пучка 4 *кв*. Отклоненная часть пучка от пушки высаживается на коллиматор, охлаждаемый водой. Фокусировка пучка в инжекторном узле осуществляется тремя тонкими магнитными линзами.

Для предварительного группирования электронов в сгустки с фазовой протяженностью около 30° используется отрезок диафрагмированного волновода длиной 33 *см* (шесть ячеек) с фазовой скоростью волны 0,8 *с*. СВЧ-мощность 2 *Мвт* подается в группирователь из тракта питания клистрона первой секции. Для получения в группирователе достаточно высокой напряженности поля (40 *кв/см*) отношение a/λ взято равным 0,4.

Каждая из шести основных секций ускоряющей структуры представляет отрезок диафрагмированного волновода длиной 1,7 *м* (31 ячейка), непосредственным продолжением которого служит внутриволноводная нагрузка для поглощения остаточной СВЧ-мощности. Она состоит из шести ячеек, аналогичных последней ячейке волновода, но покрытых изнутри сильно поглощающим материалом (альсифер). Съем тепла с диафрагмированного волновода и нагрузки осуществляется раздельно. Для охлаждения диафрагмированного волновода подается термостатированная вода, стабилизированная с точностью $\pm 1^\circ$ *С*. СВЧ-мощность на вход каждой ускоряющей секции подается от отдельного прелетного усилительного клистрона, дающего в номинальном эксплуатационном режиме выходную мощность 20 *Мвт* в импульсе длительностью 6 *мксек* при частоте следования 150 *гц*, т. е. среднюю мощность 18 *квт*. В испытательном режиме импульсная мощность составляет 30 *Мвт*, что обеспечивает запас электрической прочности клистрона и срок службы 2000 *ч*. Коэффициент усиления клистрона не менее 35 *дб* и к. п. д. не менее 35%. Канализация СВЧ-мощности от клистрона ко входу соответствующей секции ускорителя производится с помощью волновода прямоугольного сечения 130 \times 57 *мм*, заполненного сжатым азотом под давлением 6 *кг/см²*. Длина волновода около 15 *м*, и полные потери в нем составляют около 5%, т. е. 1 *Мвт*. В состав каждого такого волноводного тракта входят измеритель проводящей мощности типа «поглощающей стенки» и направленный ответвитель для системы бло-

кировки по СВЧ-пробоям. В тракт первого клистрона входят также ответвители для питания чоппера и группирователя. Мощность для раскачки первого клистрона поступает от возбуждителя с кварцевой стабилизацией частоты, обеспечивающего суточную нестабильность частоты не более $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. В выходном каскаде возбуждителя используется прелетный импульсный клистрон с большим коэффициентом усиления (не менее 60 *дб*) и импульсной выходной мощностью 100 *квт*.

Мощность на вход каждого из пяти остальных клистронов подается из общей коаксиальной линии возбуждения, питаемой от выхода первого клистрона.

Группирующая секция и первая секция ускорителя снабжены фокусирующими катушками галетного типа с водяным охлаждением. Максимальная напряженность магнитного поля составляет около 500 *э* на расстоянии 0,4 *м* от начала секции и плавно убывает к концу секции. Для компенсации влияния магнитного поля Земли и расположенных около ускорителя ферромагнитных масс на каждой секции ускорителя помещаются корректирующие катушки, дающие регулируемое смещение пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях.

В промежутках между каждыми двумя смежными секциями помещаются межсекционные узлы, присоединяемые к секциям через сифоны. В этих узлах располагаются квадрупольные линзы, высоковакуумное оборудование и датчики тока и положения пучка. Квадрупольные линзы располагаются после первой, третьей и пятой секций. В конструктивном отношении все линзы выполнены идентично и имеют градиент поля около 300 *гс/см*. Вакуум порядка $1 \cdot 10^{-6}$ *мм рт. ст.* обеспечивается электроразрядными насосами с водяным охлаждением анода со скоростью откачки 10 *л/сек* (по два насоса в каждом межсекционном узле). Для облегчения обезгаживания ускоряющих секций, их откачки и поиска возможных течей во всех межсекционных узлах устанавливаются прямопролетные вентили с металлическим уплотнением по заслонке, допускающие прогрев до 200° *С*. Предварительная откачка ускорителя производится агрегатами типа Рутса и цеолитовыми агрегатами, расположенными в помещении под галереей ускорителя. В каждом межсекционном узле располагается манометрический блок, содержащий датчики форвакуума, высокого вакуума и блокировки с металлическим уплотнением на фланцах.

Для контроля тока и положения пучка в межсекционных узлах устанавливаются датчики магнитно-индукционного типа, а также ламельные датчики высаживания пучка, имеющие вид коллиматора с круглым отверстием диаметром 20 мм, разрезанного на четыре изолированных друг от друга сектора, имеющих водяное охлаждение. При попадании хотя бы на одну из ламелей какого-либо из датчиков тока пучка, превышающего заранее установленный допустимый предел, ускоритель автоматически переводится в наладочный режим с пониженной частотой следования импульсов (5 μ с для импульсов 5,5 мксек и 15 μ с для остальных импульсов).

Большая средняя мощность пучка (около 60 квт) заставляет уделить особое внимание вопросам радиационной стойкости конструктивных элементов, для обеспечения чего сокращено до минимума количество элементов, имеющих органическую изоляцию в галерее ускорителя. Значительная часть проводов и кабелей применена в радиационнстойком исполнении. Для намотки фокусирующих и других катушек используются провода в изоляции из стекловолокна с проклейкой эпоксидной смолой. В конструкции собственно ускорителя полностью исключены неметаллические уплотняющие

прокладки (используются прокладки только из меди и в исключительных случаях — из индия).

Поступила в Редакцию 11/1 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Kelliher, R. Beadle. Nature, 187, No. 4743, 1099 (1960).
2. M. Crowley-Milling et al. Nature, 191, No. 4748, 483 (1961).
3. M. Bell, P. Bramham, B. Montague. Nature, 198, No. 4877, 277 (1963).
4. G. Saxon, T. Jarvis, J. White. Proc. IEE, 110, No. 8, 1365 (1963).
5. T. Jarvis, G. Saxon, M. Crowley-Milling. Proc. IEE, 112, No. 9, 1795 (1965).
6. H. Hirakawa. Japan J. Appl. Phys., 3, No. 1, 27 (1964).
7. Г. В. Воскресенский, В. И. Короза, Ю. Н. Серебряков. «Атомная энергия», 20, 3 (1966).
8. А. К. Вальтер и др. Международная конференция по ускорителям (Дубна, 1963). М., Атомиздат, 1964, стр. 420.
9. Р. М. Воронков и др. «Атомная энергия», 13, 327 (1962).
10. О. А. Вальднер. В сб. «Ускорители». Вып. III. М., Госатомиздат, 1962, стр. 5.
11. А. К. Вальтер и др. Международная конференция по ускорителям (Дубна, 1963). М., Атомиздат, 1964, стр. 435.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. А. М. ГОРЬКОГО