ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ
Институт теоретической и экспериментальной физики

ITEP- 22-96

ITEP-22-96

В.С.АРТЕМОВ Н.Н.ВИНОГРАДСКИЙ В.Л.ГАНЕЛИН
А.Ю.ДЯДИН А.Б.ЗАРУБИН Б.К.КОНДРАТЬЕВ
Г.Н.КРОПАЧЕВ В.В.КУШИН С.Б.МАНУСАДЖЯН
Н.Н.МИУСОВ И.О.ПАРШИН В.И.ТУРЧИН

МНОГОЛУЧЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ

Fermilab Library
0 1160 0040675 5

FERMILAB
AUG 27 1996
LIBRARY

Москва 1996

УДК 621.3.038.625 М-16

МНОГОЛУЧЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ: Препринт ИТЭФ 22-96/
В.С.Артемов, Н.Н.Виноградский, В.Л.Ганелин и др. - М., 1996 - 20с.

В работе рассмотрены перспективы и пути развития многолучевых ускорителей заряженных частиц. Приведено описание экспериментальной ускорительной установки, описаны конструкция и методика настройки резонатора и высокочастотной системы. Дана методика тренировки структуры в условиях мультипакторного эффекта. Приведено описание инжекционной системы и результаты ее автономных испытаний. Рассмотренны также результаты, полученные при ускорении 19 пучков протонов до энергии 530 кэВ с использованием короткофокусной и длиннофокусной ионной оптики.

Рис. - 7, список лит. - 3 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 1996

ВВЕДЕНИЕ

В линейных резонансных ускорителях предельный ток, как известно,[1] зависит от ряда параметров, таких как энергия инжекции, диаметр апертуры, длина периода фокусировки, рабочая частота.

$$I^{\infty}_{\text{пред}} = \frac{1}{2} j_o V_к \qquad (1)$$

В этом выражении j_o - характеристическое значение двумерной фазовой плотности пучка, выраженное в А/см.мрад и равное

$$j_o = \frac{\beta_s^2 \gamma_s^2}{L} \mu I_o \ , \qquad (2)$$

где $\gamma_s = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_s^2}}$ - Лоренц-фактор, $I_o = 4 \pi \varepsilon \frac{m_o c^2}{e}$,

для протонов $I_{op} = 3{,}13\ 10^9$ А.

$V_к$ - пропускная способность канала

$$V_к = \beta_s \gamma_s \frac{\nu a^2}{L} , \qquad (3)$$

где a - радиус апертуры канала.

Перепишем формулу (1) в следующем виде [2]:

$$I^{\infty}_{\text{пред}} = \frac{\mu \nu}{2} \frac{a^2}{L} \beta^3 \gamma^3 I_o \qquad (4)$$

В связи с тем, что пучок сгруппирован в сгустки, максимально возможное значение тока есть

$$I_m = I^{\infty}_{\text{пред}} B , \qquad (5)$$

где $B = 1{,}4 \frac{\varphi_s}{\pi}$ - коэффициент группировки пучка.

Если выбрать напряжение инжекции порядка 70 кВ, то получается, что для ускорения протонов на частоте 148,5 МГц в ускоряющей структуре с АФПФ расстояния между трубками дрейфа в начальной части ускорителя составляют около 8 мм. При таких параметрах ускорителя значение максимального тока, полученное по формуле (5), не превышает 50 мА. Для повышения максимального тока необходимо увеличивать диаметр апертуры, однако при этом необходимо увеличивать и расстояния между трубками дрейфа, чтобы избежать "провисания" полей. Увеличение расстояний между трубками дрейфа в начальной части требует увеличения энергии инжекции, причем расстояние прямо пропорционально корню квадратному из напряжения инжекции. С инженерной точки зрения напряжение инжекции ограничено электрической прочностью ускорительной трубки, опорных изоляторов, разделительного трансформатора, а также появлением короны на воздухе.

Естественным способом повышения выходного тока ускорителя можно считать увеличение числа ускоряющих каналов. В самом деле, если расположить каналы в трубках дрейфа достаточно далеко друг от друга, чтобы ослабить взаимное влияние пучков, можно значительно повысить ток ускорителя. Препятствием на этом пути являются неравномерность ВЧ полей по радиусу трубок дрейфа и неравномерность параметров пучка, поступающего из инжекционной системы по радиусу пучка. Первая проблема не является принципиально неразрешимой, поскольку для получения продольного ВЧ поля, постоянного по радиусу, можно использовать трубки дрейфа достаточно большого диаметра, причем расстояние от крайней апертуры до края трубки дрейфа должно быть не менее длины соответствующего зазора. Увеличение диаметра трубок дрейфа приводит к возрастанию емкости ускоряющей структуры и, следовательно, к уменьшению ее шунтового сопротивления, что требует лишь дополнительной ВЧ мощности, и то на начальном этапе ускорения, т.е. на небольшом участке ускорителя. Далее каналы могут быть объединены в один и ускорение может продолжаться традиционным образом.

Вторая проблема является основной при создании многолучевых

ускоряющих систем. Существуют специальные приемы для получения широких параллельных пучков, такие как установка диэлектрического шарика напротив эмиссионного отверстия в экспандере, формирование специальной границы плазмы в ускоряющем зазоре и др. Известно также [3], что если равномерный по радиусу пучок с током I разбить на n пучков с токами I/n каждый, то при том же общем токе фазовая плотность каждого пучка уменьшится в $\sqrt{n}$ раз, что позволяет получать более качественные пучки с меньшей расходимостью.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для экспериментальной проверки и изучения приведенных выше положений была создана экспериментальная ускорительная установка. Схема установки показана на рис. 1. Установка содержит инжектор (1), резонатор (2), систему ВЧ питания, вакуумную систему, систему наблюдения за пучком и технологические системы - УБС, охлаждения и др.

Инжектор представляет собой ускоритель прямого действия с энергией инжекции до 70 кВ, он содержит источник дуоплазматронного типа. Оптика однозазорная, вытягивающий электрод накоротко соединен с анодом источника. Вакуумный объем инжектора отделяется от резонатора затвором и имеет собственную метрику для проведения автономных работ на инжекторе с целью получения пучка с заданными параметрами.

Система ВЧ питания состоит из импульсного модулятора (3), цепочки каскадов независимого возбуждения (4) и задающего генератора (5). Три последние каскада собраны на лампе ГИ-27-АМ по схеме с общей сеткой. Модулятор выполнен по классической схеме с двойной линией, в качестве разрядника используется водородный тиратрон ТГИ1-50/5000. Длительность импульса модулятора около 100 мкс, сопротивление нагрузки 100 Ом, импульсная мощность модулятора до 16 МВт.

Вакуумная система содержит форвакуумный насос (6), два турбомолекулярных насоса (7), три магниторазрядных насоса (8) и вакуумный затвор (9), разделяющий инжекционную и ускорительную

части, что позволяет автономно вести работы на установке.

Системы УБС, охлаждения, электропитания и др. являются технологическими и обеспечивают проведение работ на установке в заданном режиме.

Резонатор (см. рис.2) включает в себя собственно ускоряющую структуру (1), группирователь (2) и согласующий канал (3). Структура содержит четыре четвертьволновых вибратора, выполненных в виде незамкнутых колец с держателем и трубкой дрейфа, расположенной в центре полукольца. Свободным концом вибратор крепится к основанию структуры. Магнитный поток охватывает все четыре вибратора, таким образом образуется единая резонансная система. Для подавления паразитных "противофазных" частот синфазные точки вибраторов соединены медными перемычками, что упрощает настройку стуктуры. Настройка проводилась следующим образом. Сначала в каждой трубке дрейфа было сделано одно центральное отверстие, через которое в процессе настройки проходил шарик. Измерение полей проводилось классическим методом малых возмущений. Выходным сигналом являлась фазовая расстройка резонатора, полученная с фазометра ФК2-12, пропорциональная квадрату полей в структуре. Для получения полей заданной величины концы держателей двигались по кольцевому вибратору вокруг центра - отверстия трубки дрейфа. После получения заданных полей структура настраивалась на рабочую частоту удлиннением свободного конца вибратора. После окончательной настройки в трубках дрейфа сверлились остальные 18 апертур во всей структуре в сборе. В зазоры вставлялись прокладки, служившие опорами при сверлении, по мере сверления трубки дрейфа снимались вместе с держателями и вибраторами. После изготовления всех трубок сборка производилась в обратном порядке, причем точность сборки 0,1 мм обеспечивалась установкой вибраторов на основание с помощью штифтов. После сборки структуры проводились повторные измерения полей и радиотехнических параметров. Величина добротности оказалась 1200, резонансная частота 148,42 МГц, ВЧ мощность, необходимая для создания расчетных полей, около 250 кВт. Расчетные значения полей приведены в таблице 1, экспериментально полученные квадраты полей - на рис.3.

Таблица 1.

N	Поле в зазоре, кВ/см	Длина зазора, мм	Длина трубки дрейфа, мм
1	3.00	5.00	6.70
2	3.40	4.40	223.00
3	50.00	7.70	15.00
4	58.00	6.50	7.70
5	100.00	7.90	17.50
6	101.30	7.80	13.30
7	150.00	9.00	24.40
8	159.10	8.50	22.90
9	190.00	12.00	32.90
10	190.00	12.00	4.00

Для увеличения ускоренного тока перед ускоряющей структурой установлен группирователь. Он представляет собой двухзазорный резонатор с ВЧ напряжением на трубке дрейфа около 1,5 кВ. Возбуждение группирователя автономное, по отдельному кабелю, что позволяет изменять величину и фазу ВЧ напряжения в процессе настройки.

Между группирователем и структурой в пространстве дрейфа размещен согласующий канал, который предотвращает поперечное рассеяние пучка и обеспечивает требуемые параметры частиц на входе в структуру. Согласующий канал представляет собой набор однопотенциальных линз, т.е. чередующиеся по длине заземленные и потенциальные пластины. Расчетное значение напряжения линз согласующего канала-7 кВ.

Для измерения параметров пучка на установке предусмотрена следующая метрика (рис.2). На выходе из инжектора установлен индукционный датчик (4), измеряющий полный ток инжектора. Затем на пути пучка в измерительной камере (5) установлены две подвижные

пластины (6) со щелями и цилиндром Фарадея, позволяющие проводить измерения эмиттанса пучка. На входе в структуру установлен ЦФ 7 с отверстиями, расположенными по осям апертур структуры и являющимися коллиматорами для пучка. Этот ЦФ измеряет полный ток за вычетом 19 пучков, поступающих на вход ускоряющей структуры и необходим для контроля стабильности работы инжектора в процессе исследований. Для точного измерения входных токов каждого из 19 каналов перед резонатором установлен подвижной блок (8) из 19 ЦФ. Каждый ЦФ имеет диаметр 7 мм и установлен на оси своего пучка. Блок ЦФ имеет вакуумный привод, который позволяет ставить его на пути пучка и убирать его в процессе работы без нарушения рабочего вакуума. Для измерения тока ускоренного пучка на выходе ускорителя установлены 19 ЦФ 9 , причем 7 центральных имеют в центре отверстия, которые пропускают половину пучка. За ними установлена фольга (10) толщиной 3 мкм, рассчитанная на энергию 500 кэВ. За фольгой расположены 7 ЦФ 11, позволяющие измерять ускоренный ток каждого из 7 каналов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Работа на установке началась с получения хорошего пучка. Основным параметром является эмиттанс пучка, который должен быть минимальным. Кроссовер пучка должен находиться приблизительно в зоне группирователя. Для получения пучка с такими параметрами подбираются режимы работы источника, такие как напряжение модулятора дуги, ток магнита, давление газа в рабочей камере. В процессе настройки контролируется общий ток и эмиттанс пучка. Положение кроссовера регулируется положением земляной сетки, которая образует ускоряющий зазор, длина которого изменяется снаружи через вакуумный привод в процессе работ.

Работы с ускоряющей структурой начинаются с тренировки ее электрической прочности. По достижении рабочего вакуума порядка $0,5 \cdot 10^{-6}$ Торр. включается система ВЧ питания. Тренировка проводится в режиме разовых импульсов с частотой следования 0,2 Гц. Пробои контролируются по форме огибающей ВЧ из резонатора, по ухудшению вакуума, по форме падающей и отраженной

волн в ВЧ фидерах, а также визуально через смотровой фланец. В процессе тренировки пробои наблюдались в ускоряющих зазорах, также наблюдались искрения в местах контактов у основания серпов, особенно в тех местах, где меднение стальных деталей было нарушено. Для устранения пробоев и искрений приходилось вскрываться и заполировывать неисправные места. После механического устранения дефекта тренировка продолжалась, пока уровень ВЧ в структуре не достиг расчетного уровня. Нормальным считался процесс тренировки, при котором пробои наблюдались в различных зазорах структуры и чередовались с нормальными импульсами без пробоев. В процессе тренировки наблюдался мультипакторный эффект, который заключался в следующем. На уровнях ВЧ мощности до 0,3-0,4 от номинального ВЧ в структуру не вводилась вообще, а при более высоком анодном напряжении появлялась скачком, и сразу же наблюдался пробой. Преодолеть эту трудность удалось улучшением вакуума и небольшими изменениями частоты в пределах полосы резонатора. В результате тренировки удалось выйти на уверенную работу структуры на уровне напряженности поля 200 кВ/см, при максимальной напряженности поля в последних зазорах 190 кв/см. Из-за мультипакторного эффекта возникли проблемы с группирователем, который начинал возбуждаться с уровня, в несколько раз выше номинального. Для подавления мультипактора в группирователе пришлось в 8 - 10 раз уменьшить его добротность. Тогда только электронная нагрузка не стала заметна на фоне потерь в меди и мультипакторный эффект пропал.

Работы по получению ускоренного пучка проводились в следующем порядке. На вход резонатора подавался пучок с энергией 60 кэВ. С помощью метрики измерялся ток на входе и на выходе структуры в каждом канале. По полученным данным проводилась юстировка структуры относительно инжектора. Для этой цели между инжектором и резонатором была установлена механическая развязка - сильфон, а дальний конец фермы резонатора имел возможность плавного перемещения по полу в вертикальном и горизонтальном направлениях. В результате юстировочных работ было найдено положение резонатора, при котором показания датчиков тока на входе и выходе структуры оказались симметричны относительно

центрального канала и максимальны. Это положение было принято за рабочее, при этом считалось, что ось структуры совпадает с осью пучка.

В процессе исследований была попытка юстировки пучка с помощью электростатических корректоров - пары отклоняющих пластин, на которые подавались потенциалы для создания поперечного поля. Отклонение пучка измерялось с помощью подвижных пластин со щелями, которыми измерялся эмиттанс пучка. Напряжение на отклоняющих пластинах изменялось плавно от 0 до 3 кВ положительной и отрицательной полярности. Однако положительного результата получено не было, движения пучка не обнаружено. При увеличении отклоняющего напряжения до 1,5 - 2,0 кВ общий ток уменьшался в 2-3 раза, причем при подаче отрицательного напряжения в инжекторе происходил пробой в ускоряющем зазоре инжектора.

Получение ускоренного пучка происходило в следующем порядке. На вход группирователя подавался пучок протонов с расчетной энергией 60 кэВ, причем величина полного тока все время контролировалась с помощью ЦФ с отверстиями, а входные токи по каждому из 19 каналов - с помощью подвижного блока ЦФ. На выходе структуры перед фольгой также наблюдался неускоренный ток. Величина токов по каждому из 19 каналов на входе и выходе приведена в таблице 2

Таблица 2

Номер канала	1	2	3	4	5	6	7	8
Вх. ток (мА)	6,0	6,0	14,0	12,0	12,0	8,0	9,0	10,0
Вых. ток (мА)	0,2	0,1	0,35	1,10	0,6	0,7	-	1,10

9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
9,0	6,0	2,2	4,0	11,0	10,0	15,0	15,0	13,0	6,0	12,0
-	0,22	0,05	0,15	0,2	0,25	1,2	1,6	1,2	0,08	0,3

Затем в ускоряющую структуру вводилась ВЧ мощность, величина ее контролировалась по напряжению линии модулятора и по сигналу с петли из резонатора. При достижении уровня ВЧ, близкого к расчетному, на выходе ускорителя на ЦФ за фольгой появляется сигнал, показывающий наличие ускоренного тока. Далее плавным изменением уровня ВЧ и напряжения инжекции было получено максимальное значение ускоренного тока на выходе, распределение токов по каждому из 7 внутренних каналов приведено в таблице 3.

Таблица 3.

Номер канала	13	14	15	16	17	18	19
	1,5	2,5	4,0	3,8	3,2	1,6	3,2

Исследование группирователя проводилось следующим образом. Предварительно откалибровавнная петля возбуждения устанавливалась в выходной каскад ВЧ-генератора в среднее положение. Вращением петли изменялась величина напряжения группирователя, вращением рукоятки раздвижной линии, включенной последовательно в цепь - фаза этого напряжения. Методом последовательных приближений - поочередным движением петли и раздвижной линии - был получен максимальный ускоренный ток на выходе ускорителя. Оказалось, что включение группирователя увеличивает ускоренный ток приблизительно в два раза.

При включениии согласующего канала напряжение на его линзах поднималось плавно от 0 до 14 кВ положительной и отрицательной полярности. Максимальное значение ускоренного тока было получено при напряжении 10 кВ.

В результате всех описанных выше действий был получен пучок ускоренных протонов с энергией 530 кэВ. Непосредственно измерялся ускоренный ток на выходе семи внутренних каналов после фольги, его величина оказалась 20 мА. Ускоренный ток на выходе остальных двенадцати каналов не измерялся из-за отсутствия фольги достаточно большого размера. Оценка полного тока проводилась по

распределению пучка на входе ускорителя. Отношение полного тока 19 каналов на входе к току на 7 внутренних каналах оказалось равным 2,4. Если считать параметры пучка по радиусу постоянными, то выходной ускоренный ток получается 48 мА. Однако, учитывая экспериментальные данные по неравномерности пучка по радиусу, можно предположить, что величина полного ускоренного тока была около 40 мА.

В процессе исследований снимались зависимости ускоренного тока на выходе ускорителя от напряжения инжекции, от уровня ВЧ мощности в структуре, от напряжения согласующего канала, величины и фазы напряжения группирователя. Проводились измерения параметров пучка на входе в резонатор, а также зависимость ускоренного тока от длины ускоряющего зазора инжектора. Экспериментально полученные зависимости приведены на рис.4-7.

В проведенных выше экспериментах расстояние от заземленной сетки инжектора до резонатора составляло приблизительно 1,2 м. Существовало мнение, что значительная часть частиц теряется на этом расстоянии, поэтому был проведен следующий опыт. Вакуумный кожух инжектора, камера наблюдения и вакуумный затвор были демонтированы, а источник был установлен на изолирующем фланце на вакуумном кожухе резонатора, т.е. расстояние между инжектором и резонатором было уменьшено до 200 мм. На этом модернизированном стенде были проведены все основные эксперименты, описанные выше. Вопреки ожиданиям, увеличения входного и выходного ускоренного тока получено не было, а были получены прежние данные. Такой результат, по-видимому, можно объяснить тем, что пучок, полученный из инжектора, содержит столько электронов, что является компенсированным и частицы не теряются на расстоянии 1,2 м. Более того, пучок, сфокусированный на начало резонатора с расстояния 1,2 м, является более параллельным и лучше подходит для ускорения в многолучевом резонаторе.

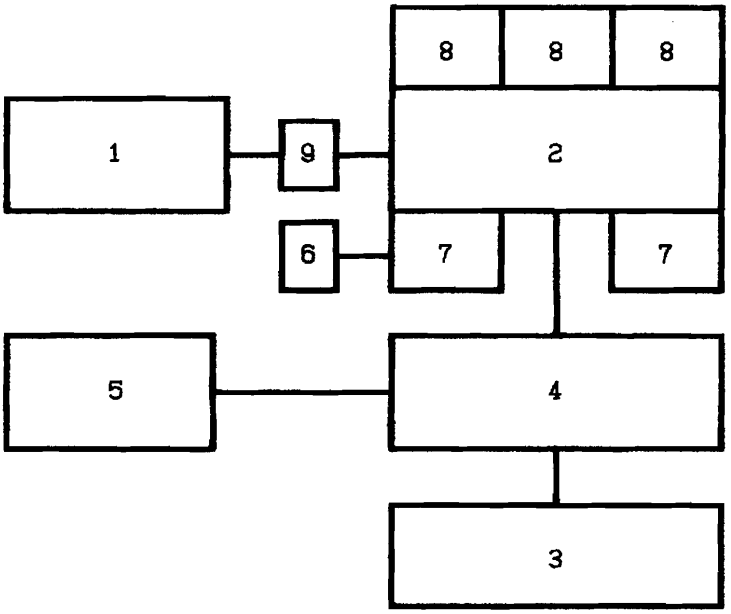

РИС. 1. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

1 - ИНЖЕКТОР
2 - РЕЗОНАТОР
3 - ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР
4 - УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ
5 - ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР
6 - ФОРВАКУУМНЫЙ АГРЕГАТ АВР-150
6 - ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС ТМН-500
7 - МАГНИТОРАЗРЯДНЫЙ НАСОС НМД-400
8 - ВАКУУМНЫЙ ЗАТВОР

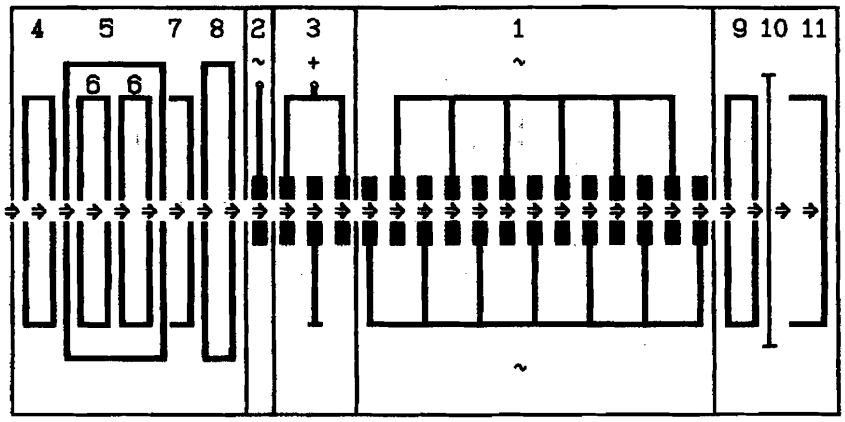

РИС. 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР

1 - УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

2 - ГРУППИРОВАТЕЛЬ

3 - СОГЛАСУЮЩИЙ КАНАЛ

4 - ИНДУКЦИОННЫЙ ДАТЧИК

5 - ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ КАМЕРА

6 - ПЛАСТИНЫ СО ЩЕЛЯМИ

7 - ЦИЛИНДР ФАРАДЕЯ С ОТВЕРСТИЯМИ

8 - ПОДВИЖНЫЙ БЛОК ИЗ 19 ЦИЛИНДРОВ ФАРАДЕЯ

9 - БЛОК ВЫХОДНЫХ ЦИЛИНДРОВ ФАРАДЕЯ

10 - ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ФОЛЬГА

11 - ЦИЛИНДР ФАРАДЕЯ ЗА ФОЛЬГОЙ

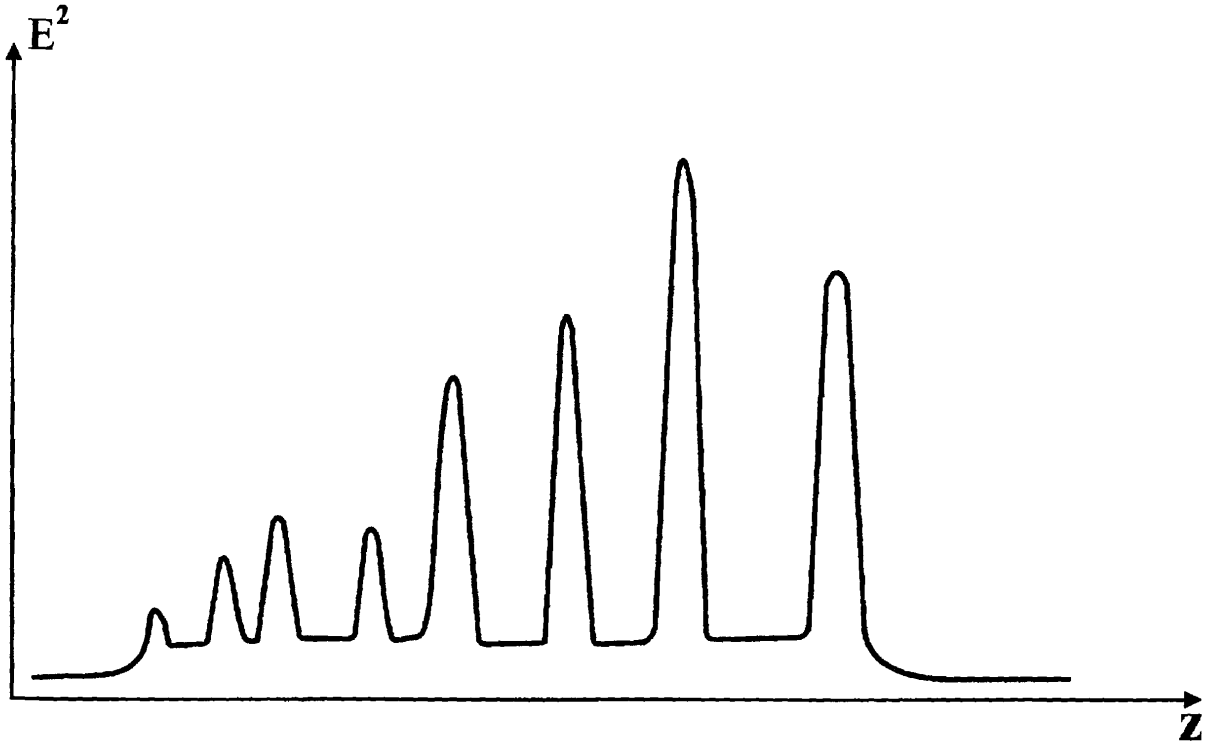

Рис. 3. КВАДРАТЫ ПОЛЕЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

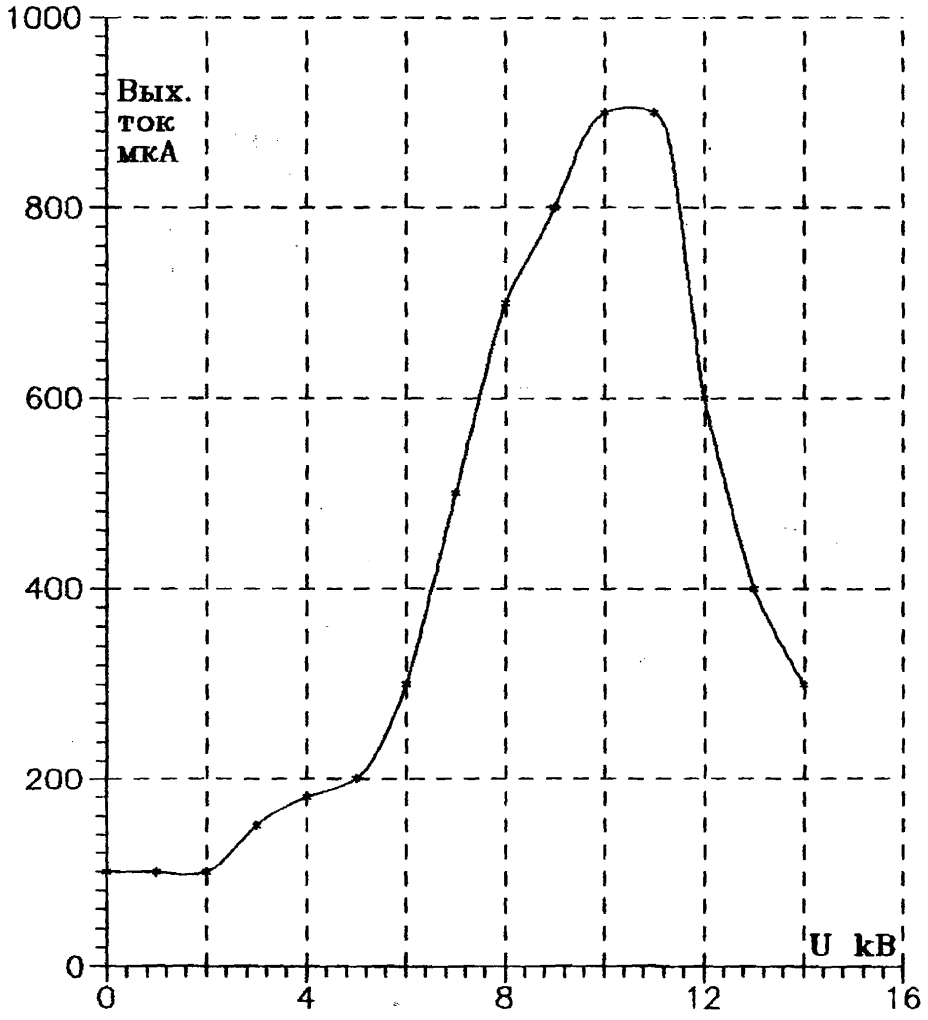

Рис.4. Зависимость ускоренного тока от напряжения согласующего канала.

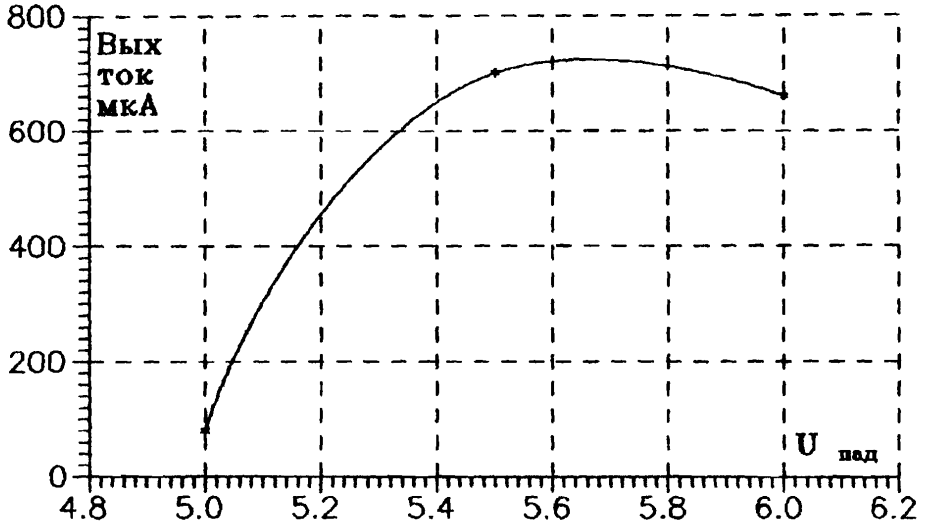

Рис.5 а. Зависимость ускоренного тока от уровня ВЧ мощности.

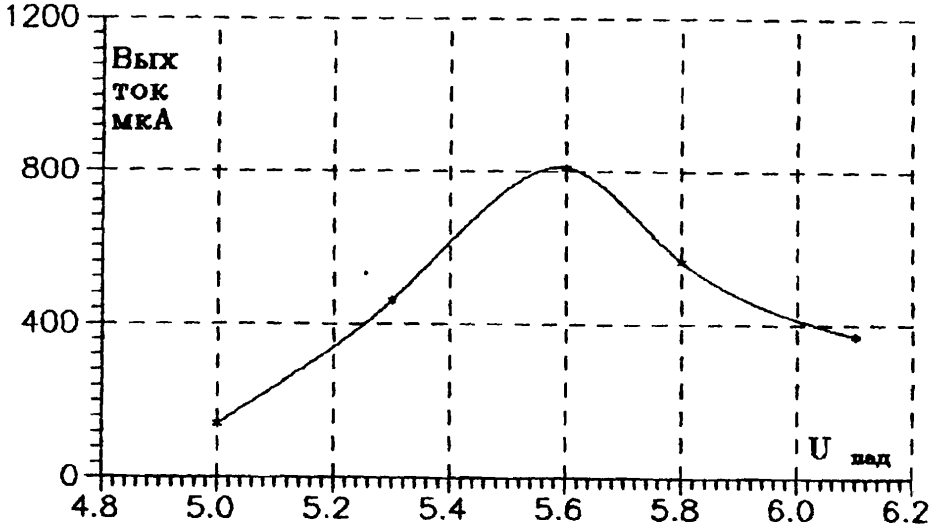

Рис.5.б. Расчетная зависимость ускоренного тока от уровня ВЧ мощности.

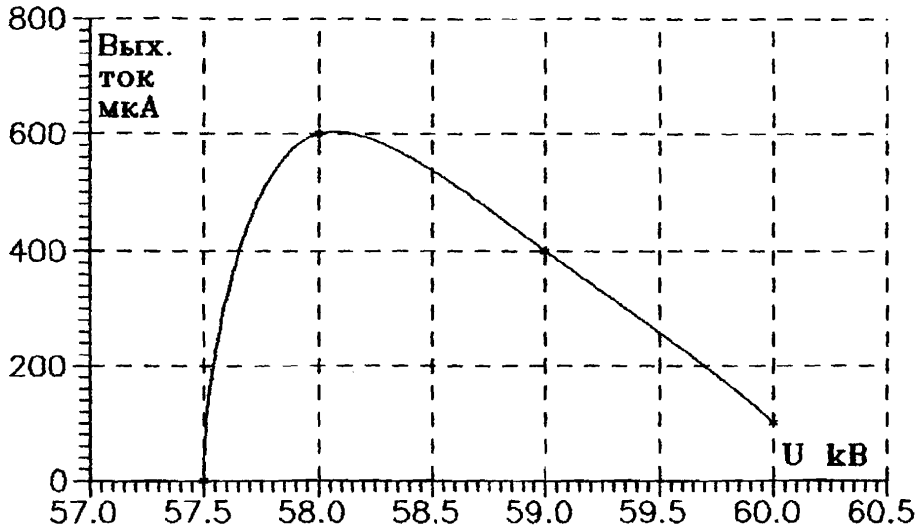

Рис.6 а. Зависимость ускоренного тока от напряжения инжекции.

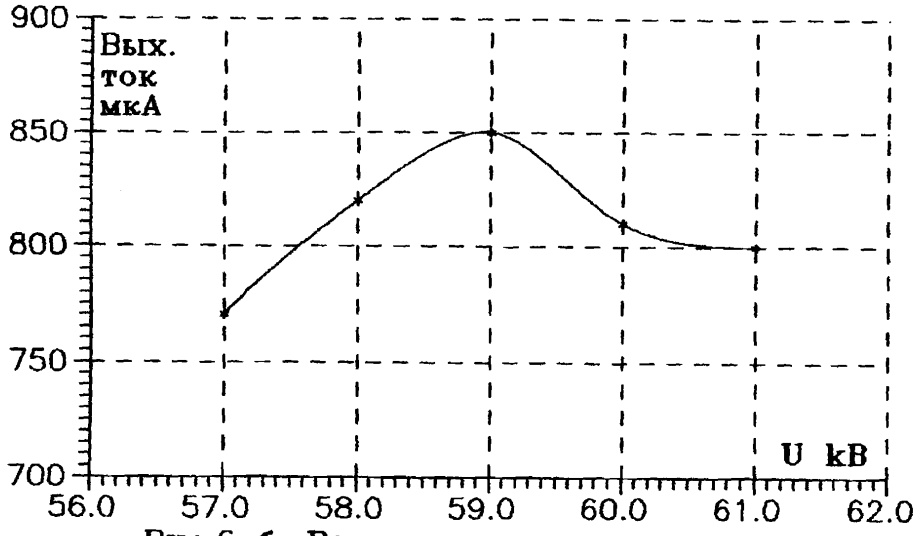

Рис.6 б. Расчетная зависимость ускоренного тока от напряжения инжекции.

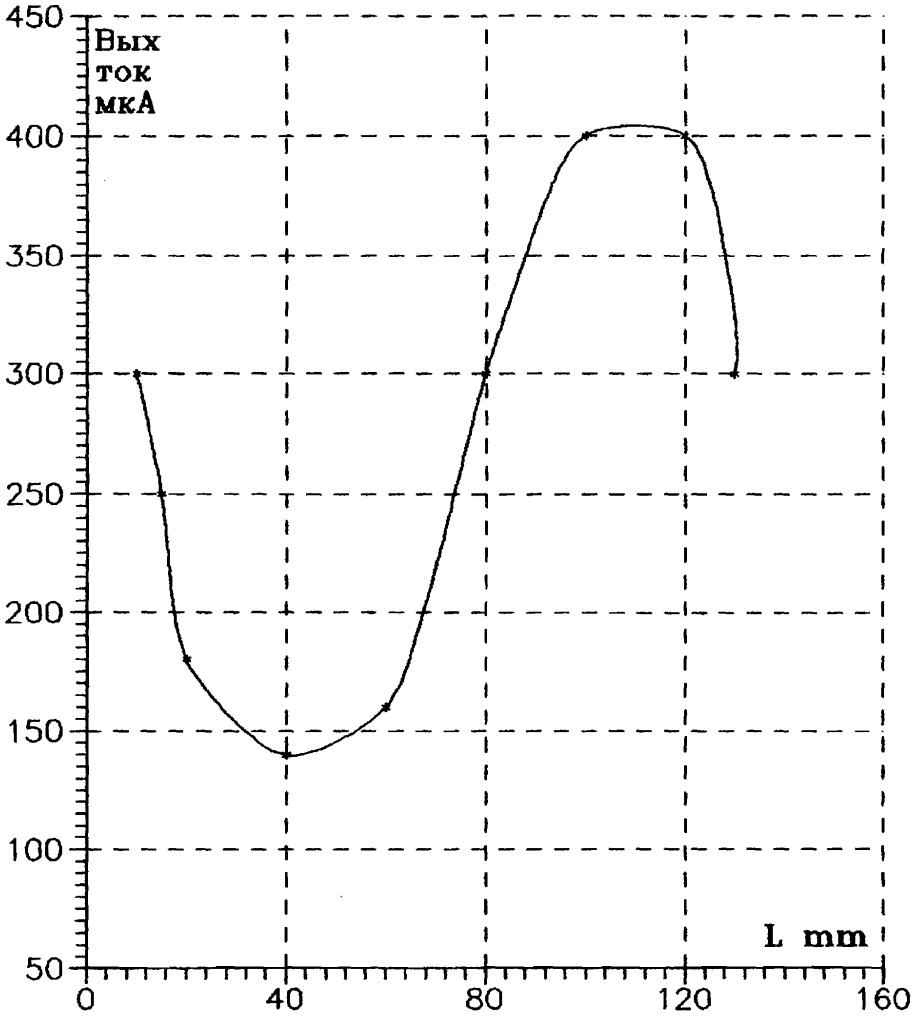

Рис.7. Зависимость ускоренного тока от длины линии (фазы) группирователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966.

2. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.

3. Кушин В.В. Ускорение ионов в системах с асимметричной фазопеременной фокусировкой: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.,1979