

13

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

М.М. Карлинер, В.Ф. Ключев, А.В. Кожемякин,
П.Б. Лысянский, О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко,
Р.А. Салимов, Г.В. Сердобинцев, Б.М. Фомель,
В.П. Яковлев, Г.И. Яснoв

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ
УСКОРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСА ВЭПП-4.
ДИНАМИКА ПУЧКА**

ПРЕПРИНТ 82 - 18



Новосибирск

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ
КОМПЛЕКСА ВЭП-4. ДИНАМИКА ПУЧКА

М.М.Карлинер, В.Ф.Клюев, А.В.Кожемякин,
П.Б.Лысянский, О.А.Нежевенко, Г.Н.Острейко,
Р.А.Салимов, Г.В.Сердобинцев, Б.М.Фомель,
В.П.Яковлев, Г.И.Яснов

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты численного моделирования движения сильноточных пучков в ЛУ с учетом распределения электромагнитного поля в структуре и собственного поля пучка. Численное моделирование позволило выбрать оптимальную схему электронно-оптического тракта ЛУ, обеспечившую получение минимального поперечного размера пучка на выходе ускорителя при предельных ускоряемых токах. Результаты численного расчета сравниваются с экспериментальными данными.

В 1974 г. в Институте ядерной физики рассматривалось несколько вариантов источника позитронов, обеспечивающих необходимую светимость в накопителе ВЭП-4 [1]. В результате обсуждения был выбран вариант, в котором позитроны получают путем конверсии электронов, ускоренных в сильноточном линейном ускорителе (ЛУ) до энергии 30+70 МэВ. Последующее ускорение позитронов до энергии инъекции накопителя ВЭП-3 производится в синхротроне Б-4 [2].

К началу работы над ЛУ в Институте были проведены расчеты [3,4] и эксперименты [5] по конверсии электронов низкой энергии, показывающие возможность получения достаточно больших позитронных токов. Кроме того, в Институте была опробована модель мощного импульсного СВЧ генератора - гирокона, предложенного Г.И.Будкером в 1967 г. [6]. Использование гирокона позволило создать ЛУ с параметрами, соответствующими поставленной задаче.

1. Линейный ускоритель

Линейный ускоритель (рис.1) представляет собой бипериодическую цепочку связанных резонаторов, в которых на частоте 430 МГц, возбуждается стоячая волна вида $\pi/2$ [7]. ЛУ выполнен в виде двух отдельных секций, каждая из которых содержит по десять ускоряющих резонаторов I в промежутках между которыми расположены резонаторы связи (рис.2). Распределение электрического поля на оси ускоряющего резонатора приведено на рис.2. Возбуждается ускоряющая структура от гирокона через два одинаковых вакуумных волновода 3 со сдвигом фаз 90° . Для компенсации этого сдвига между секциями ЛУ предусмотрен промежуток 4, который используется также для размещения линзы 6, средств наблюдения за пучком и корректоров. Инжекция электронов в ЛУ производится из диодной пушки 5.

Для получения максимального выхода позитронов в заданном эмиттансе пучок ускоренных электронов необходимо сфокусировать на конвертор 8 в пятно минимального размера $1 \times 1,5$ мм [4]. Чтобы обеспечить такой размер пятна на конверторе пучок фокусируется дважды. Сначала длиннофокусной линзой электроны фокусируются так, чтобы получить минимальный размер пучка на выходе ускорителя (~ 1 см). Затем короткофокусной линзой 7 производят-

ся фокусировка пучка на конверторе 8.

Энергетический разброс электронов в ЛУ составляет $\Delta E/E \sim 25-30\%$. Двойная фокусировка, применяемая в ЛУ, позволяет получить отношение размера пучка на конвертере к размеру пучка в ЛУ $\sim (\Delta E/E)^2$ и является более эффективной, чем однократная фокусировка, при которой отношение указанных размеров не может быть лучше $\Delta E/E$.

Ускоряющие резонаторы имеют следующие параметры: добротность $2 \cdot 10^4$, шунтовое сопротивление 4 МОм, коэффициент пролета 0,84 [7].

Через две диаметрально расположенные щели в торцевых стенках ускоряющие резонаторы связаны с резонаторами связи (рис.2). Щели обеспечивают коэффициент связи $\sim 0,1$.

В первый резонатор ЛУ инжектируется негруппированный электронный пучок. Длительность импульса инжектируемого тока выбрана несколько меньшей времени одного оборота в синхротроне Б-4 (20-23 нсек), что обеспечивает эффективный однооборотный захват в Б-4. Вследствие этого ускорение электронов в ЛУ происходит за счет энергии, запасенной в резонаторах. Количество ускоряемых частиц выбрано таким, чтобы они при ускорении отбирали $\sim 30\%$ энергии, запасенной в резонаторах. Это приводит к уменьшению кинетической энергии электронов за время импульса инжекции на $\sim 15\%*$. Дальнейшее увеличение количества электронов не дает существенного роста количества позитронов, во-первых, из-за увеличения энергетического разброса электронов, а, во-вторых, вследствие ухудшения прохождения пучка через ускоряющую структуру.

В зависимости от длительности импульса инжекции принятая величина инжектируемого тока изменяется в пределах $\sim 150-250$ А.

В первом резонаторе ЛУ происходит разбиение негруппированного пучка на сгустки. Фазовая протяженность сгустка $\Delta \varphi \approx 120^\circ$,

* Ниже этот эффект будем называться "подсадкой".

причем почти все частицы из этого интервала фаз проходят до конца ускоряющей структуры.

Однако, в достаточно малое пятно на конвертере могут быть сфокусированы только те частицы, энергетический разброс которых $\Delta E/E \leq 30\%$, что соответствует интервалу фаз 60° (с учетом подсадки).

Можно показать, что на долю тех частиц, которые ускоряются, но дают малый вклад в выход позитронов, приходится $\sim 1/3$ энергии, уносимой из резонаторов всем ускоряемым пучком. Такие потери являются хотя и заметной, но все же приемлемой "платой" за выбранную для ЛУ простейшую схему инжекции. Создание же инжектора сгруппированного электронного пучка с пиковым током 150-250 А и фазовой протяженностью $\leq 60^\circ$ представляет серьезную проблему.

В пределах выбранной схемы инжекции рассматривалось два варианта. В первом из них, так называемой "внутренней инжекции", параллельный электронный пучок инжектируется непосредственно в резонатор из пушки Пирса, которая отделена от полости резонатора сеткой (рис.3). Динамика пучка в инжекционном резонаторе определяется формой входной стенки. В качестве первого приближения инжектора использовалась электронно-оптическая схема ИЛУ-2 [5,9]. В этом варианте можно варьировать в широких пределах ток пучка изменением расстояния катод-сетка.

Во втором варианте - "внешняя инжекция" - электронный пучок транспортируется на вход ЛУ по электронно-оптическому каналу (рис.4). На входе ЛУ имеется магнитная линза, с помощью которой можно оперативно изменять начальные параметры пучка. В этом варианте использовалась электронная пушка с микропервансом $P_\mu \approx 0,9$, описанная в [10]. Для получения необходимого тока в этой пушке необходимо сильно повышать напряжение. Изменение же тока за счет уменьшения зазора катод-анод сильно влияет на геометрические параметры пучка. Для питания электронных пушек разработан генератор на 200 кВ [11].

2. Программы для расчета динамики пучка в линейном ускорителе

На первом этапе проектирования линейного ускорителя, когда рассматривалось большое количество вариантов, была разработана система расчетных программ, удовлетворяющих требованиям

необходимой точности, простоты, оперативности и минимального времени счета.

Программы вычисляют движение частиц в переменном электромагнитном поле с учетом объемного заряда пучка. В результате счета выдаются траектории движения от 1 до 9 частиц с различными начальными условиями, а также - распределение частиц по радиусу, углу и энергии.

Рассмотрим подробнее вычислительную модель аксиально-симметричного пучка. Аналогичная модель использовалась в работах [12, 13].

Векторное уравнение движения частицы

$$\frac{d}{dt}(\vec{P}) = \vec{F} \quad (1)$$

в проекции на плоскость (z, z) переводится в систему уравнений

$$\frac{d}{dt}(m\gamma v_z) = F_z \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(m\gamma v_r) = F_r \quad (3)$$

где m - масса покоя частицы, $\gamma = (1 - \frac{v_z^2 + v_r^2}{c^2})^{-1/2}$ - релятивистский фактор, F_z, F_r - составляющие вектора силы \vec{F} . ВЧ-поля резонаторов рассматриваются в параксиальном приближении.

Продольная составляющая силы F_z определяется электрическим полем в пролетном зазоре резонатора

$$F_z = e E f(z) \cos \omega t \quad (4)$$

где e - заряд электрона, E - амплитуда напряженности электрического поля в центре зазора резонатора, ω - круговая частота основной гармоники, $f(z)$ - функция распределения электрического поля вдоль оси резонатора.

Функция $f(z)$ нормируется по условию

$$\frac{1}{D} \int_{z_1}^{z_2} f(z) dz = 1 \quad (5)$$

где D - длина ускоряющего зазора резонатора, $(z_2 - z_1)$ - интервал, на котором функция $f(z)$ отлична от нуля.

Функция $f(z)$ определялась путем аналогового моделирования рассматриваемых конструкций инжекторов и резонаторов в электролитической ванне с дифференциальным зондом. В программы функция $f(z)$ вводилась таблично по 20-50 точкам и затем подвергалась сплайн-интерполяции.

Радиальная составляющая силы F_r в рассматриваемой вычислительной модели определяется следующими факторами:

а) собственным полем пучка $F_{r1} + F_{r2} = \frac{e I (1 - \beta_z^2)}{2\pi r \epsilon_0 \beta_z c} \quad (6)$

б) фокусирующим ($df(z)/dz > 0$) или дефокусирующим ($df(z)/dz < 0$) действием радиальной составляющей высокочастотного электрического поля резонатора

$$F_{r3} = - \frac{e r U}{2D} \frac{df(z)}{dz} \cos \omega t \quad (7)$$

в) высокочастотным магнитным полем резонатора

$$F_{r4} = \frac{e U \beta_z r \omega}{2c D} f(z) \sin \omega t \quad (8)$$

В формулах (6-8) используются следующие обозначения: I - ток пучка в импульсе, r - радиус пучка, ϵ_0 - диэлектрическая постоянная, $\beta_z = \frac{v_z}{c}$, c - скорость света, U - амплитуда напряжения на резонаторе ($U = E \cdot D$).

В качестве переменной времени для уравнений движения пучка выбрана фаза высокочастотного поля в резонаторе. Вводом безразмерных переменных

$$\tilde{z} = \frac{z}{D}; R = \frac{r}{D}; \beta_z = \frac{v_z}{c}; \beta_r = \frac{v_r}{c}; \theta = \omega t \quad (9)$$

уравнения (2,3) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{z}}{d\theta} &= A \beta_z \\ \frac{dR}{d\theta} &= A \beta_r \\ \frac{d\beta_z}{d\theta} &= \frac{B}{r} [F_z (1 - \beta_z^2) - \beta_r \beta_z F_r] \\ \frac{d\beta_r}{d\theta} &= \frac{B}{r} [F_r (1 - \beta_r^2) - \beta_z \beta_r F_z] \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь введены следующие обозначения

$$\begin{aligned} A &= \frac{c}{\omega D}; B = \frac{e}{m c \omega}; F_z = k_1 f(z) \cos \theta; \\ F_r &= k_2 \frac{1 - \beta_z^2}{R \beta_z} + k_3 \frac{df(z)}{dz} \cos \theta + k_4 R \beta_z f(z) \sin \theta; \\ k_1 &= \frac{U}{D}; k_2 = \frac{I}{2\pi \epsilon_0 c D}; k_3 = -\frac{k_1}{2}; k_4 = \frac{\omega U}{2c} \end{aligned}$$

В систему расчетных программ, основанных на рассмотренной выше модели, входят следующие программы:

- FAST* - расчет движения пучка в I-м резонаторе,
- LONG* - расчет движения пучка в первой половине ускоряющей структуры,
- FINI* - расчет движения пучка во второй половине ускоряющей структуры.

Эти программы на этапе конструирования ускорителя позволили рассмотреть большое количество вариантов и выбрать достаточно оптимальную конструкцию.

В дальнейшем были разработаны программы *LANS* и *MASON* основанные на более точном вычислении электромагнитных полей в ВЧ-резонаторах и более точной динамической модели интенсивного релятивистского пучка.

Программа *LANS* [14] позволяет рассчитывать резонаторы с точностью до 10^{-4} для собственных частот и 10^{-3} - для электромагнитных полей. Вычисление резонансных симметричных мод сводится к решению задачи о возбуждении резонатора распределенным магнитным током на частоте, близкой к резонансной. Начальное распределение токов может быть довольно произвольным, но его спектр должен содержать искомую моду. В процессе итераций частотная фильтрация выделяет искомую собственную функцию. Для дискретной аппроксимации волнового уравнения применяется метод конечных элементов с неравномерной треугольной сеткой. Это дает высокую степень аппроксимации и позволяет достаточно точно учитывать геометрию стенок резонаторов.

В программе *MASON* [15] модулированный по плотности аксиально-симметричный пучок представляется набором цилиндрических макрочастиц. Собственные поля пучка находятся из решения уравнения Пуассона в заданных граничных условиях. Внешние электромагнитные поля вычисляются программой *LANS* и передаются в программу *MASON*. Обе программы используют одну и ту же треугольную сетку.

С помощью программы *MASON* были сделаны расчеты движения пучка в первом резонаторе ускорителя для различных исходных данных. Эти расчеты сравнивались с результатами счета по программе *FAST*. На рис.5 показаны зависимости угла разлета и радиуса пучка на выходе первого резонатора от фазы влета. Ана-

лиз результатов показал, что в случае "внутренней инжекции" динамика пучка существенно зависит от таких факторов, как влияние металлических стенок резонатора на собственное поле пучка и наличие продольной компоненты собственного поля пучка вблизи передней стенки резонатора. Для "внешней инжекции" результаты счета по программе *FAST* и *MASON* различаются меньше (рис.6). Из этого следует, что простая вычислительная модель, используемая в программе *FAST*, является здесь практически приемлемой.

Поскольку по сравнению с программой *FAST* программы *LANS* и *MASON* требуют много машинного времени, их трудно использовать оперативно. Поэтому было решено сохранить программы первой группы, но сделать в них изменения, учитывающие результаты счета по точным программам.

Поле на оси резонаторов было вычислено программой *LANS* и введено таблично в программу *FAST* вместо прежних значений, взятых из моделирования на электролитической ванне (смотри рис.2+4). Кроме того, была введена зависимость радиальной составляющей электрического поля резонатора E_R от радиуса R . В параксиальном приближении эта зависимость линейна

$$E_R(z, R) = \frac{\partial E_z(z, 0)}{\partial z} R \quad (12)$$

На рис.7 видны отклонения от этой линейной зависимости в двух, перпендикулярных оси плоскостях, где $E_R(z, 0)$ имеет максимум: вблизи края дрейфовой трубки (а) и в области входа пучка в инжекционный резонатор (б). Здесь же показана зависимость магнитного поля H_φ в плоскости (с) от радиуса R , которая является практически линейной (отклонение при $R = 2$ см составляет $\sim 1\%$).

Для учета нелинейности радиальное электрическое поле можно представить в виде степенного ряда по R . Ограничиваясь членом $\sim R^3$, получим

$$E_R(z, R) = \alpha(z) R + \beta(z) R^3 \quad (13)$$

где $\alpha(z) = \frac{\partial E_z(z, 0)}{\partial z}$

Перепишывая (13), получим

$$E_R(z, R) = \alpha(z) R (1 + \delta(z) R^2) \quad (14)$$

где $\delta(z) = \frac{\beta(z)}{\alpha(z)}$

На рис. 8 показана зависимость $\delta(z)$, полученная из счета программой *LANS*. Точка максимума $\delta(z)$ совпадает с точкой максимума $E_R(z, 0)$. Кривую можно аппроксимировать функцией

$$\delta_1(z) = \frac{0.165}{1 + (\Delta x / 0.6)^2} - 0.05$$

Здесь Δx — расстояние до точки максимума электрического поля.

Аналогичная аппроксимация проведена и для другого максимума. Обе аппроксимирующие функции введены в программу *FAST*.

Для учета влияния входной стенки резонатора на собственное поле пучка, коэффициент, определяющий действие радиального электрического поля, умножается на функцию, изображенную на рис. 9.

Внесенные поправки позволили получить с помощью скорректированной программы *FAST* результаты, мало отличающиеся от расчетов по программе *MASON* (рис. 5), при сохранении малого времени счета.

3. Результаты расчета динамики электронного пучка в линейном ускорителе

Целью расчетов была оптимизация параметров линейного ускорителя и инжектируемого пучка для получения на выходе ЛУ пучка электронов диаметром < 1 см при энергетическом разбросе $\leq 30\%$. Такие выходные параметры обеспечивают максимальное использование пучка электронов для получения позитронов.

Прежде чем перейти к изложению результатов, следует заметить, что из большого числа рассчитанных вариантов, здесь будет представлен вариант близкий к рабочему в настоящий момент (энергия пучка ~ 50 МэВ, амплитудный ток инжекции 200 А при энергии инжекции 200 КВ). Кроме того, при оптимизации угла влета вариант "внешней инжекции" практически совпадает с вариантом "внутренней инжекции", поэтому все расчетные результаты будут приведены для последнего.

Большая часть расчетов посвящена движению пучка в первом (инжекционном) резонаторе, где энергия электронов невелика и относительно велико время пролета. Здесь по сравнению с последующими резонаторами внешние поля и собственный заряд пучка оказывают на движение пучка наибольшее влияние. Численное моделирование позволило оптимизировать длину инжекционного резон.

тора с целью получения необходимых геометрических параметров пучка. В расчетах напряжение на ускоряющем зазоре изменялось вместе с его длиной так, чтобы оставалась неизменной напряженность ускоряющего электрического поля. Зависимость энергии частиц, радиального отклонения крайних электронов от оси (размер пучка) и угла наклона траектории этих электронов к оси ускорителя в зависимости от фазы влета частиц в резонатор для нескольких ускоряющих зазоров приведены на рис. 10. Из рисунка видно, что минимальному разбросу размера пучка и угла наклона крайнего электрона для нужного (по энергии) интервала фаз соответствует длина ускоряющего зазора около 10-13 см. Этот вывод подтверждают те же зависимости после первой секции (через 10 резонаторов) на рис. 11. В итоге длина ускоряющего зазора инжекционного резонатора была выбрана равной 10 см, что составляет половину длины основного резонатора.

Для оценки влияния собственного поля пучка на движение частиц в первом резонаторе были проведены расчеты движения пучка при различных энергиях инжекции (рис. 12) и токах пучка (рис. 13). При уменьшении энергии инжекции и увеличении тока пучка происходит уменьшение интервала фаз, при которых пучок остается сходящимся. При токе 400 А пучок на выходе инжекционного резонатора становится расходящимся, что ограничивает ускорение большого тока. Изменения энергии инжекции без изменения тока мало влияют на параметры пучка из-за большого темпа ускорения.

Для оценки влияния внешних полей, в частности, нелинейности радиальной составляющей электрического поля $E_R(R)$, был проведен расчет траекторий частиц вылетающих с разных радиусов катода. Геометрические параметры пучка после первого резонатора приведены на рис. 14. Уже на этих кривых видно нарушение ламинарности пучка. Более отчетливо это видно на рис. 15, где приведены те же параметры пучка после прохождения первой секции ускорителя. Эти данные показывают, что из-за нелинейности радиальной составляющей электрического поля происходит слабое перемешивание слоев пучка. Однако, дальнейшие расчеты показали, что перемешивание происходит после 3-4 резонаторов при энергии 8-12 МэВ, когда влиянием собственного поля пучка можно пренебречь. Расчеты движения пучка в первой секции ускорителя показали, что без дополнительных фокусирующих полей можно ус-

корить токи максимально допустимые по подсадке напряжения на резонаторах. При этом размер пучка для некоторого интервала фаз близок к апертуре ускорителя.

Как было сказано выше, между секциями ЛУ имеется фокусирующая линза, которая дает возможность оптимизировать геометрические параметры пучка на выходе ЛУ. На рис.16 показаны траектории крайних электронов по всей длине ускорителя для различных фаз при трех значениях ускоряющего напряжения, что соответствует изменению напряжения на резонаторах в течение импульса инжекции ("подсадка"). Из рисунка видно, что используя линзу между секциями, можно получить пучок нужных (I см) параметров с учетом "подсадки" напряжения на резонаторах. Зависимость энергии частиц, радиальное отклонение и угол наклона в конце ускорителя приведены на рис.17. Используя приведенные характеристики можно оценить ускоренный ток и рассчитать спектр электронов на выходе ЛУ.

При непрерывной (в течение импульса инжекции) инжекции ускоренный ток за период в.ч. определяется формулой:

$$I_{\text{уск.}} = \frac{I_0}{2\pi} \int_{\Delta\varphi} f(R_0/R, \varphi) d\varphi$$

где I_0 — амплитуда инжектируемого поля; $\Delta\varphi$ — область фаз захватываемых в ускорение; R_0 — радиус входного и выходного отверстия резонаторов; R — радиус пучка.

Функция $f(R_0/R, \varphi)$ определяет долю электронов для данного интервала фаз, прошедших через отверстия резонаторов.

Вычисления по этой формуле показывают, что до конца ускоряется, примерно, третья часть частиц, т.е. $I_{\text{уск.}} \sim \frac{1}{3} I_0$. Однако, только одна шестая часть пучка имеет энергетический разброс $\sim 15\%$ и может быть эффективно использована для конверсии в позитроны.

Для оценки возможностей ускорения большого тока на рис.18 приведена зависимость ускоренного тока от тока инжекции для различных энергий инжекции и различных напряжений на ускоряющих резонаторах. На рисунке видно ограничение ускоренного тока. Ограничение легче снимается увеличением напряжения на резонаторах, чем повышением энергии инжекции. Это естественно, т.к. темп ускорения достаточно высок. Приведенные данные показывают, что в ЛУ в коротких (~ 10 периодов в.ч.) импульсах возможно ускорение большого тока.

4. Экспериментальные результаты

На первом этапе (1975 год) эксперименты проводились с одним (инжекционным) резонатором. Возбуждением резонатора от лампового ВЧ генератора было получено ускоряющее напряжение порядка 500 кВ. На входе резонатора располагалась пушка "внутренней инжекции" с микропервансом 1,5. На выходе — фокусирующая линза, система щелей для измерения геометрических параметров пучка и поворотный магнит с цилиндром Фарадея для измерения энергии. Пучок визуально наблюдался на экране телевизора с пробников, покрытых люминофором. Учитывая небольшой запас энергии в резонаторе, ток инжекции $I_0 = 40$ А и энергия инжекции $E_{\text{инж.}} = 100$ кэВ.

На рис.19 приведены расчетный спектр и спектры снятые в эксперименте для различных инжектируемых токов. Т.к. спектрометр имел плохое разрешение по энергии, то количественные оценки делать трудно, но качественно можно сказать, что с увеличением тока инжекции максимум тока из-за подсадки смещается в область низких энергий.

Сравнение тока измеренного в максимуме спектра с расчетным показало хорошее (лучше 10%) соответствие. Искажение фазового объема после ускорения в резонаторе небольшое. Характерно, что при некотором значении фокусного расстояния линзы на люминофоре можно получить теневое изображение анодной сетки электронной пушки.

В 1976-77 годах на двух секциях ЛУ (12 резонаторов) электроны были ускорены до энергии 25+27 МэВ. Использовалась электронная пушка с микропервансом 0,7 в варианте "внешней инжекции". При инжекции $I_0 = 60$ А (энергия инжекции 200 кэВ) на выходе ЛУ через диафрагму диаметром 1 см получен ток 10 А. Полный ускоренный ток $I_{\text{уск.}} = 20$ А, что соответствует расчету. Детального изучения геометрических параметров пучка не производилось.

В 1978 году ЛУ (20 резонаторов) запущен на комплексе ВЭП-4. При энергии пучка ЭЛИТ-3А, возбуждающего гирокон, в I кДж (1,6 МэВ, 50 А и 11 мкс) в ЛУ электроны были ускорены до энергии 52+54 МэВ, т.е. на ускоряющих резонаторах получено напряжение 3,3 МВ, а на инжекционном — в два раза меньше. Использовались варианты и "внешней" и "внутренней" инжекции.

При инжектируемом токе $I_0 = 100+110$ А, на выходе ускорителя на цилиндре Фарадея диаметром 15 мм получен ток около 17 А при полном токе 35+40 А.

Изучение геометрических параметров пучка показало, что при выключенной линзе, расположенной между секциями, на выходе ускорителя пучок сильно вытянут по вертикали в отношении большем 5:1. Включение линзы перефокусировало пучок по горизонтали, так что оптимальный по выходу позитронов размер пучка (на люминофоре) имел диаметр $\sim 25+30$ мм, что уменьшало эффективность преобразования пучка электронов в позитроны.

Дальнейшие исследования показали, что причиной асимметрии пучка является искажение электрического поля в резонаторах из-за наличия щелей связи [8]. Изменением взаимного расположения щелей связи в ускоряющих резонаторах удалось практически полностью устранить асимметрию и получить на выходе ЛУ пучок диаметром меньше 1 см.

На рис.20 приведен след пучка на пластине из оргстекла при оптимальном значении тока в фокусирующей линзе. Такой пучок фокусируется на конвертор в десятые доли миллиметра так, что происходит испарение поверхности за один импульс и разрушение конвертора через несколько часов работы за счет тепловых ударов. Выход позитронов при тех же условиях вырос в 1,7 раза.

На рис.21 приведена серия спектров для различного заряда, инжектируемого в ЛУ. Отчетливо видно смещение максимума спектра в зависимости от величины инжектируемого заряда. Максимальный инжектируемый ток $I_0 \approx 180$ А, ускоренный $I_{уск.} = 60$ А. "Подсадка" напряжения на резонаторах при этом $\approx 20\%$.

Проведенные расчеты, экспериментальные исследования и настройка дали возможность получить на выходе линейного ускорителя электроны с энергией 50 МэВ и током 60 А в импульсе. Это обеспечивает захват и ускорение в синхротроне Б-4 $(2+3) \cdot 10^8$ позитронов в импульсе.

Линейный ускоритель работает в составе комплекса ВЭШ-4 с 1978 года.

Л и т е р а т у р а

1. ВЭШ-4. Рабочие материалы, вып.2, ИЯФ СО АН СССР, 1974.
2. С.Б.Вассерман и др. Труды УІ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.І, стр.128, Дубна, 1979.
3. В.А.Тажурский, Б.В.Чириков. Препринт ИЯФ '73-73, Новосибирск, 1973.
4. В.А.Тажурский. Препринт ИЯФ 75-39, Новосибирск, 1975.
5. Г.И.Яснгов. Диссертация, Новосибирск, 1973.
6. Г.И.Буджер и др. А.Э., т.44, вып.5, стр.397-403, 1979.
7. В.Г.Ведеревич и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: линейные ускорители, вып.215, Харьков, 1977.
8. М.М.Карлинер и др. Влияние электромагнитных полей отверстий связи резонаторов на движение частиц в линейном ускорителе электронов. Доклад на Всесоюзном совещании по линейным ускорителям. Харьков, 1981.
9. Г.И.Кузнецов, Г.И.Яснгов. Получение большого тока из импульсного линейного ускорителя. Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Томск, 1975.
10. С.И.Молоковский, А.Д.Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. Энергия, 1972.
11. А.А.Авдиенко и др. Препринт ИЯФ 75-85, Новосибирск, 1975.
12. D. Venable. Los Alamos report LA-3241, 1967
13. М.Ф.Ворогушин. Труды УІІ Межвузовской конференции по электронным ускорителям, вып.І, стр.32, Атомиздат, 1970.
14. М.М.Карлинер и др. Препринт ИЯФ 79-59, Новосибирск, 1979.
15. М.М.Карлинер и др. Препринт ИЯФ 80-165, Новосибирск, 1980.

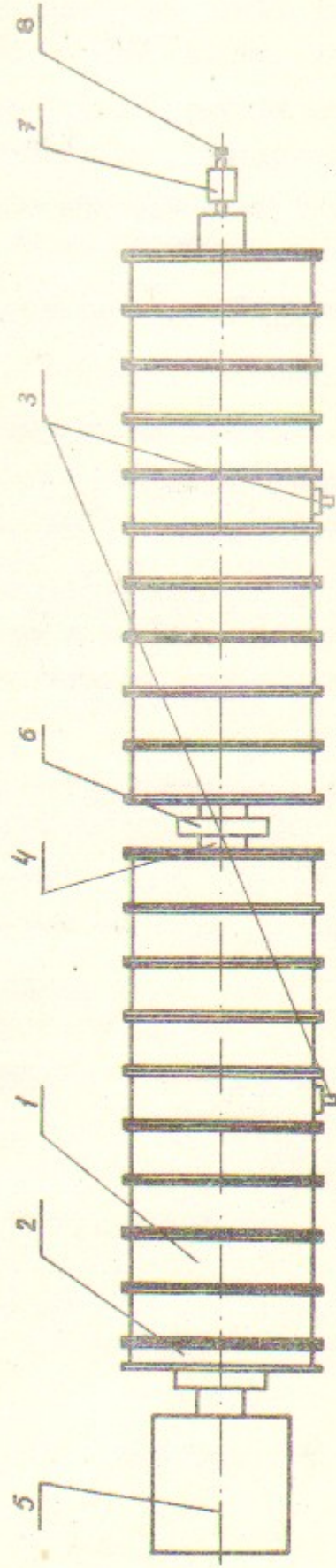


Рис. 1. Сильноточный линейный ускоритель.

1 - основной резонатор; 2 - инжекционный резонатор; 3 - вакуумные волноводы; 4 - промежуток;
5 - диодная пушка; 6 - линза в середине ускорителя; 7 - короткофокусная линза; 8 - конвертор.

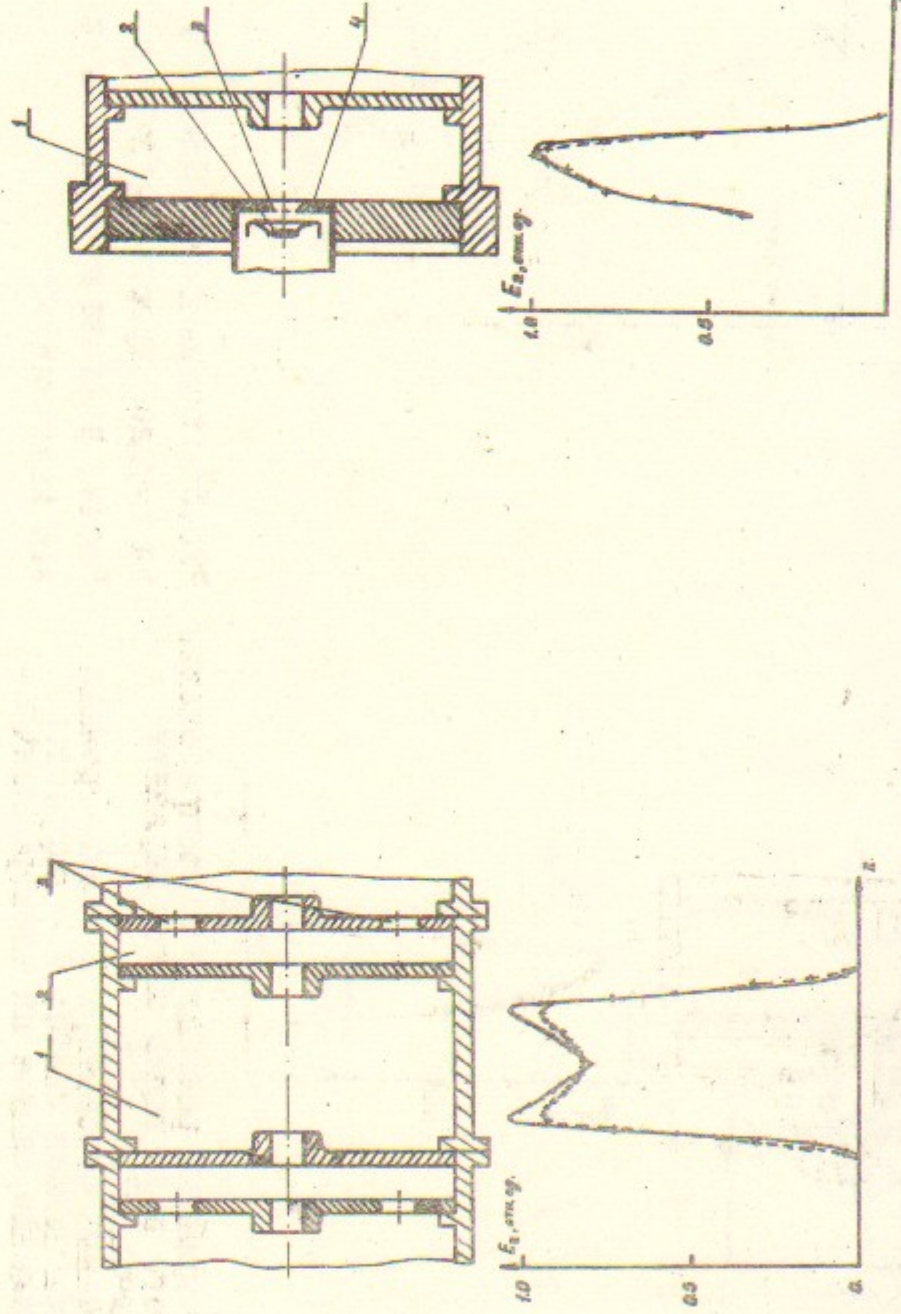


Рис. 2. Основной резонатор и распределение электрического поля вдоль оси.
1 - основной резонатор; 2 - резонатор связи;
3 - центр связи.
- - распределение, снятое на электролитической ванне
+ - расчет по программе

Рис. 3. Инжекционный резонатор и распределение электрического поля вдоль оси в варианте "внутренней инжекции".
1 - инжекционный резонатор; 2 - пушка Пирса;
3 - сетка; 4 - входная стенка.
- - распределение, снятое на электролитической ванне
+ - расчет по программе

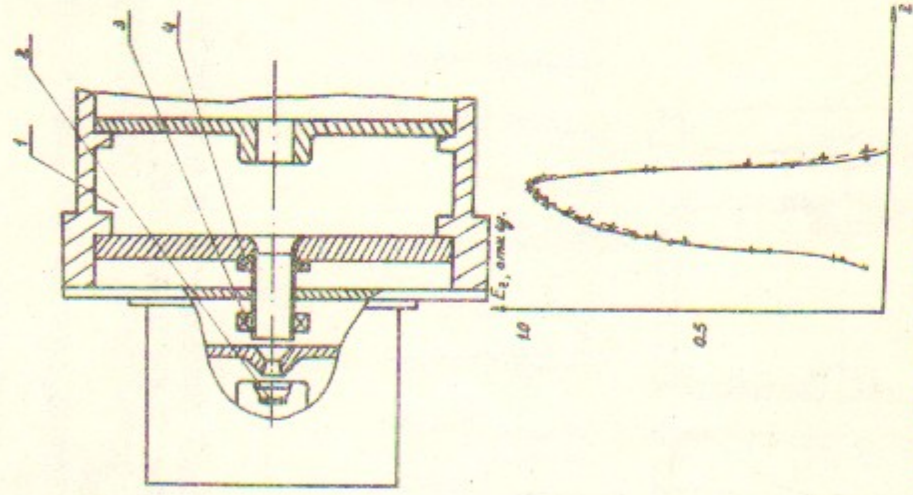


Рис. 4. Инжекционный резонатор и распределение электрического поля вдоль оси в варианте "внешней инжекции".
 1 -- инжекционный резонатор; 2 -- электронная пушка; 3 -- магнитная линза; 4 -- корректор.
 . -- распределение, снятое на электролитической ванне
 + -- расчет по программе

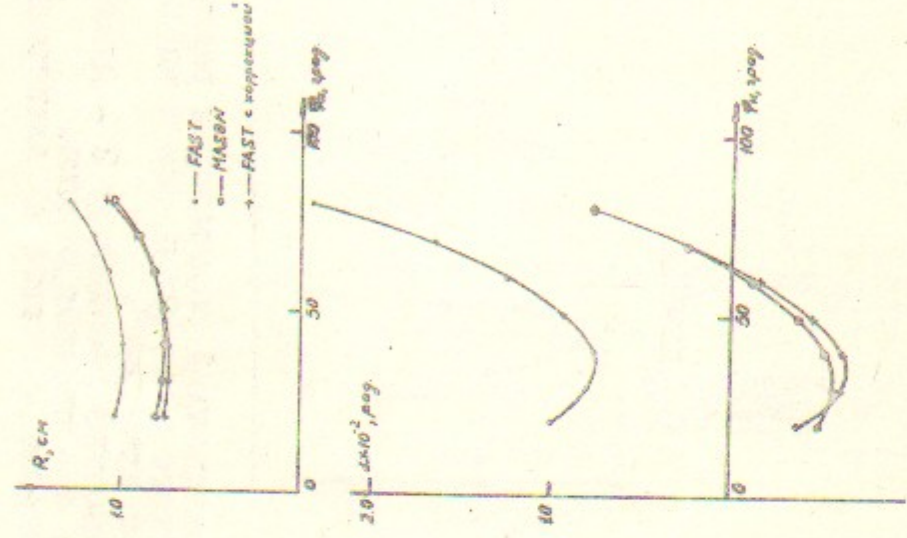


Рис. 5. Зависимость радиуса и угла разлета пучка на выходе первого резонатора от фазы влета. Расчет разными программами для варианта "внутренней инжекции".

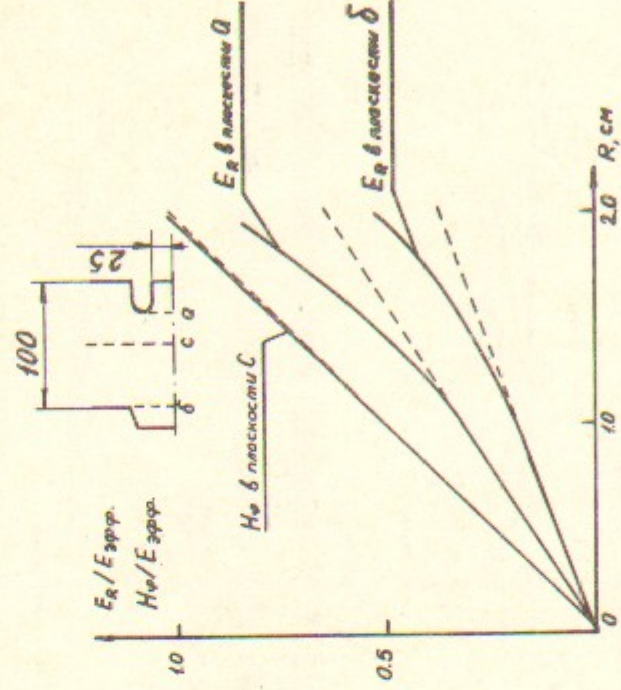


Рис. 7. Зависимость радиальной составляющей электрического поля резонатора E_r и магнитного поля H_ϕ от радиуса.

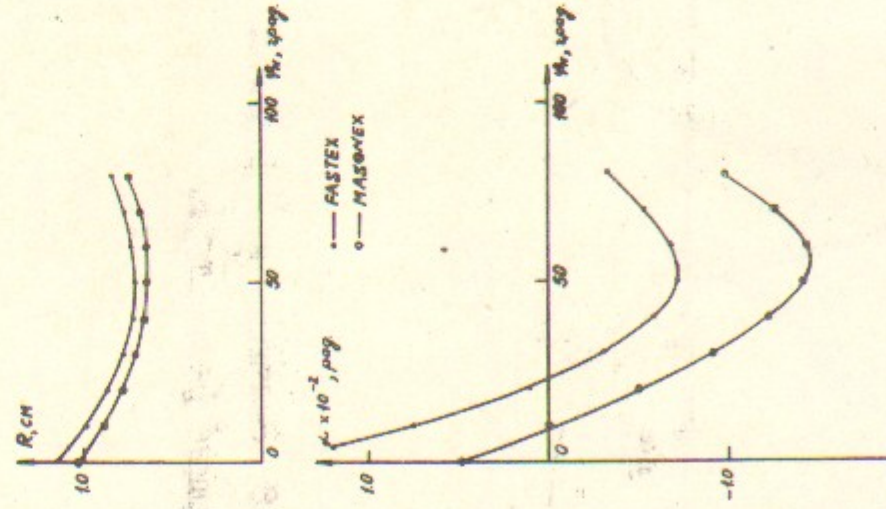


Рис. 6. Зависимость радиуса и угла разлета пучка на выходе первого резонатора от фазы влета. Расчет разными программами для варианта "внешней инжекции".

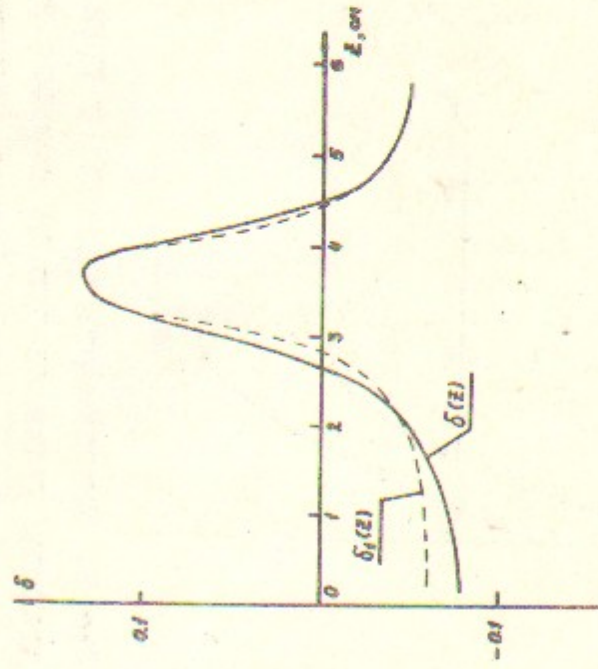


Рис. 8. Значение коэффициента $\delta(z)$ по длине резонатора.

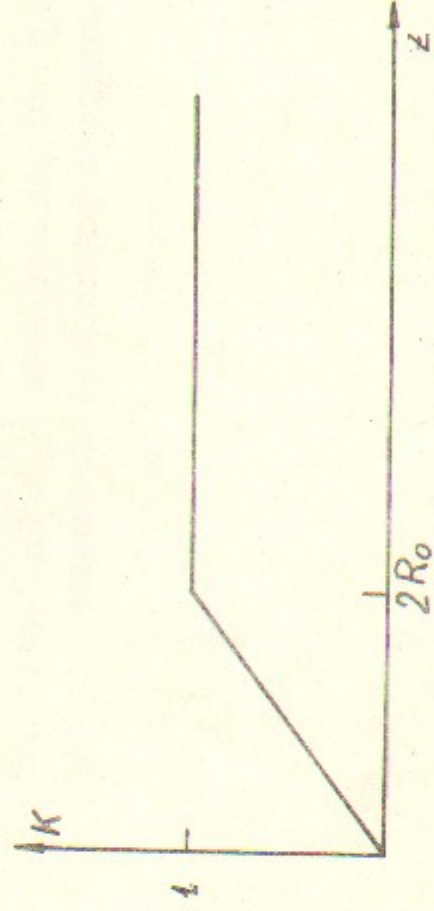


Рис. 9. Функция, учитывающая влияние входной стенки резонатора на собственное поле пучка.

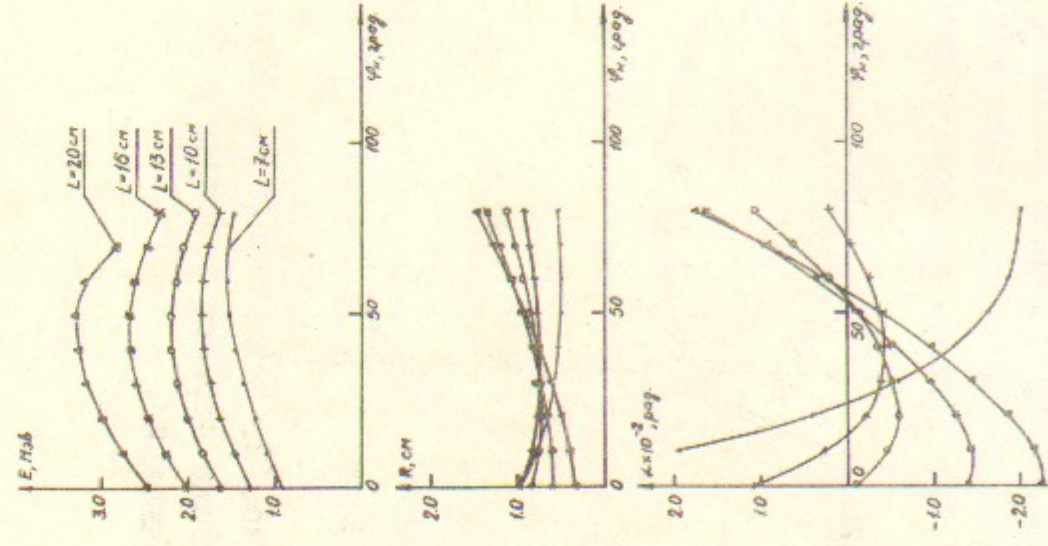


Рис. 10. Зависимость параметров пучка после первого резонатора от фазы влета для нескольких значений ускоряющих зазоров.

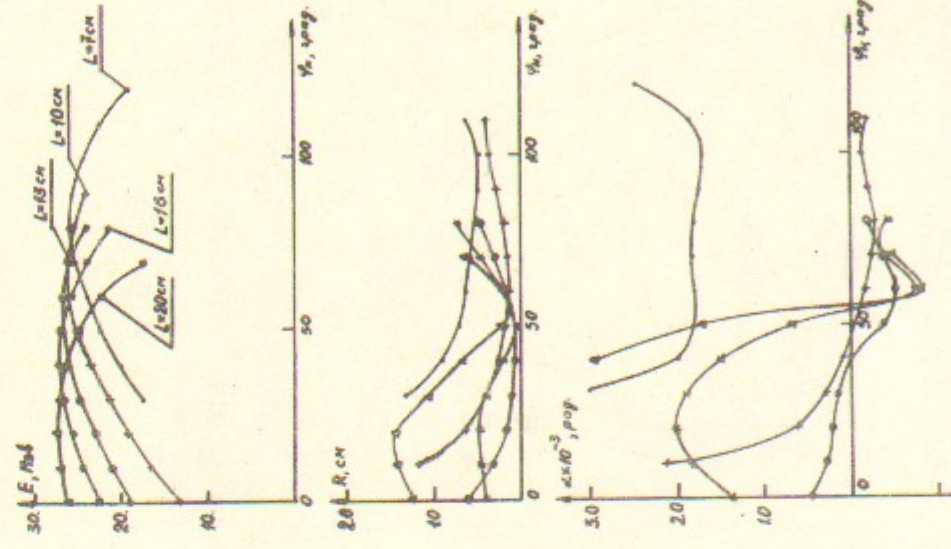


Рис. 11. Зависимость параметров пучка в середине ускорителя от фазы влета для нескольких значений ускоряющих зазоров.

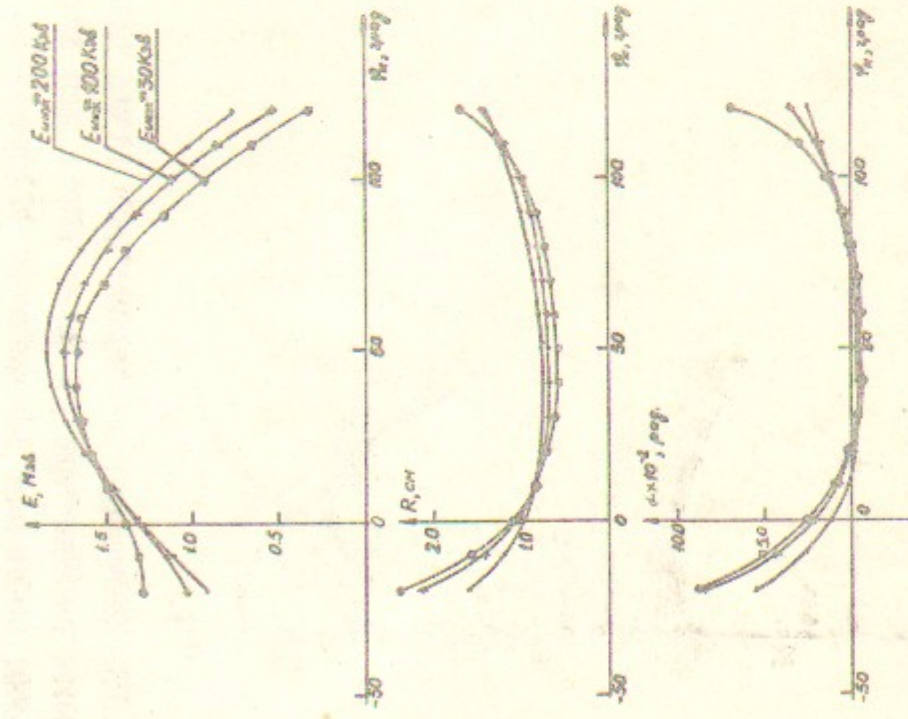


Рис. 12. Зависимость параметров пучка после первого резонатора от энергии инжекции.

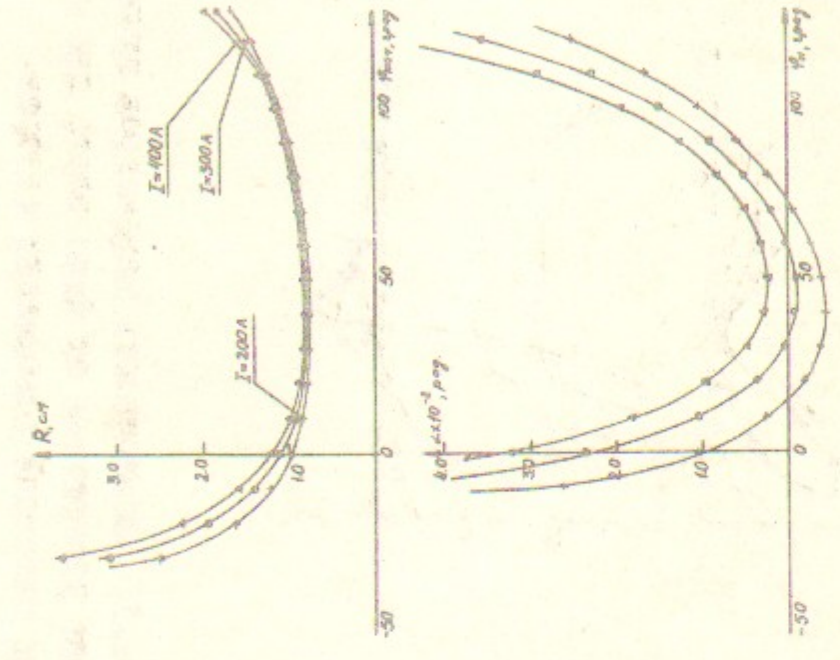


Рис. 13. Зависимость параметров пучка после первого резонатора от инжектируемого тока.

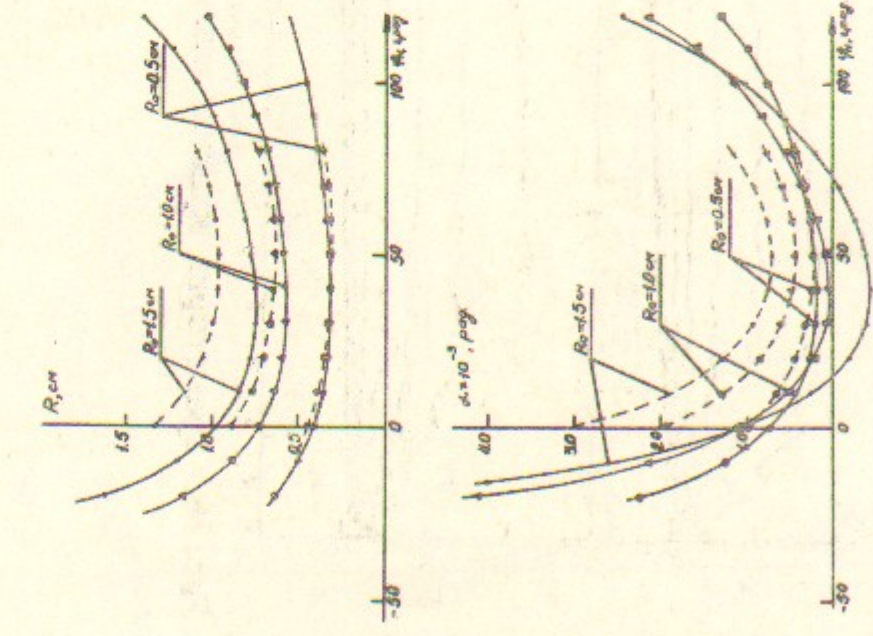


Рис. 14. Геометрические параметры пучка после первого резонатора для частиц, вылетающих с разных радиусов катода.

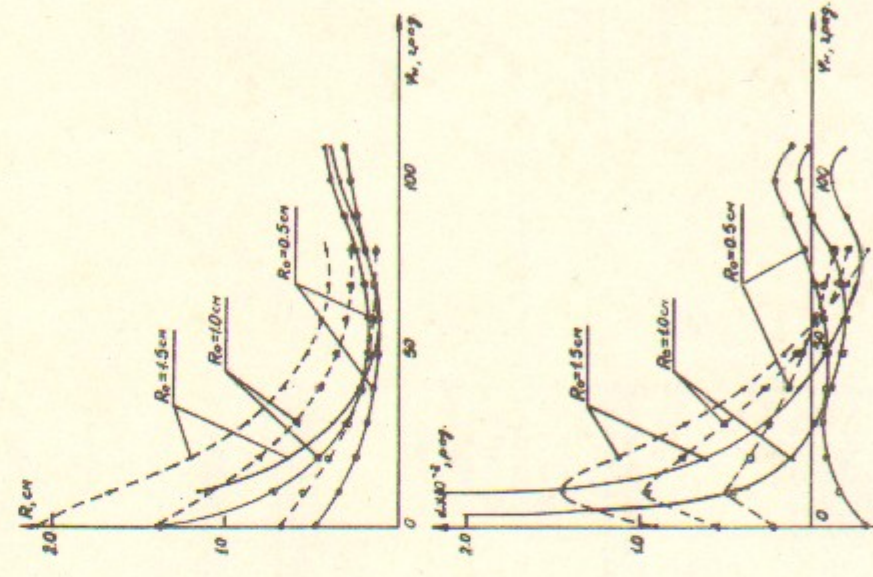


Рис. 15. Геометрические параметры пучка в середине ускорителя для частиц, вылетающих с разных радиусов катода.

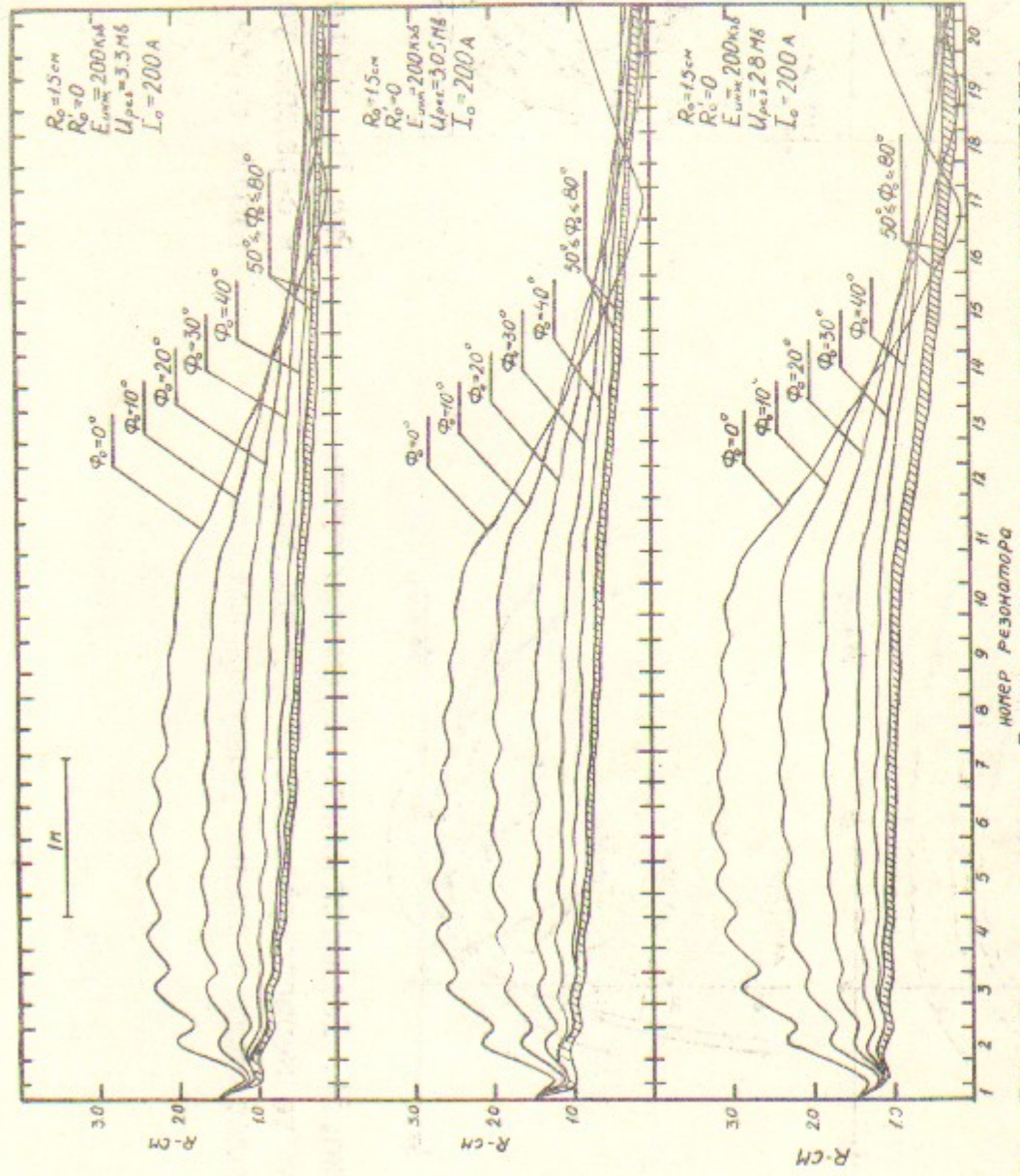


Рис. 16. Траектории крайних электронов по длине ускорителя.

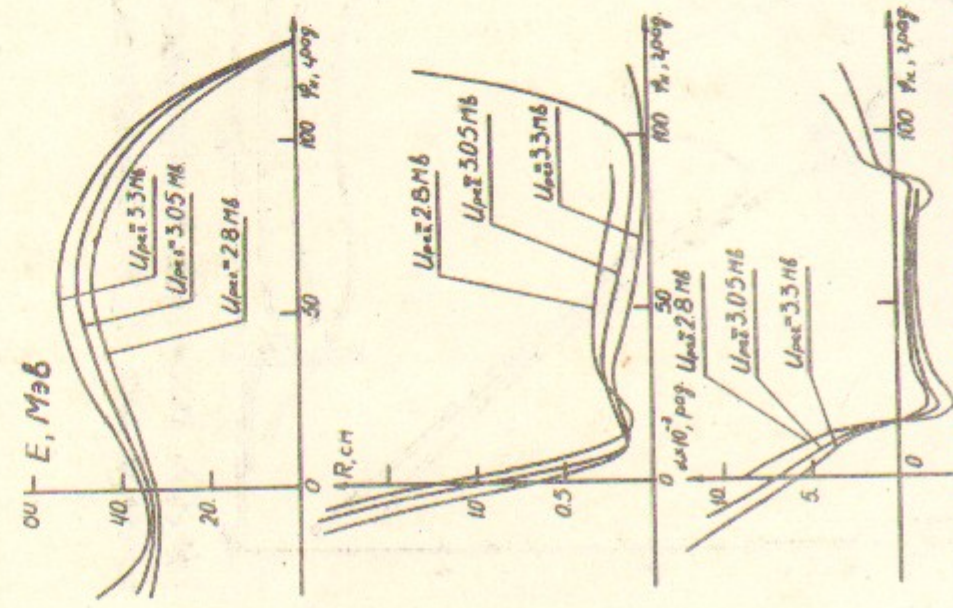


Рис. 17. Параметры пучка в конце линейного ускорителя.

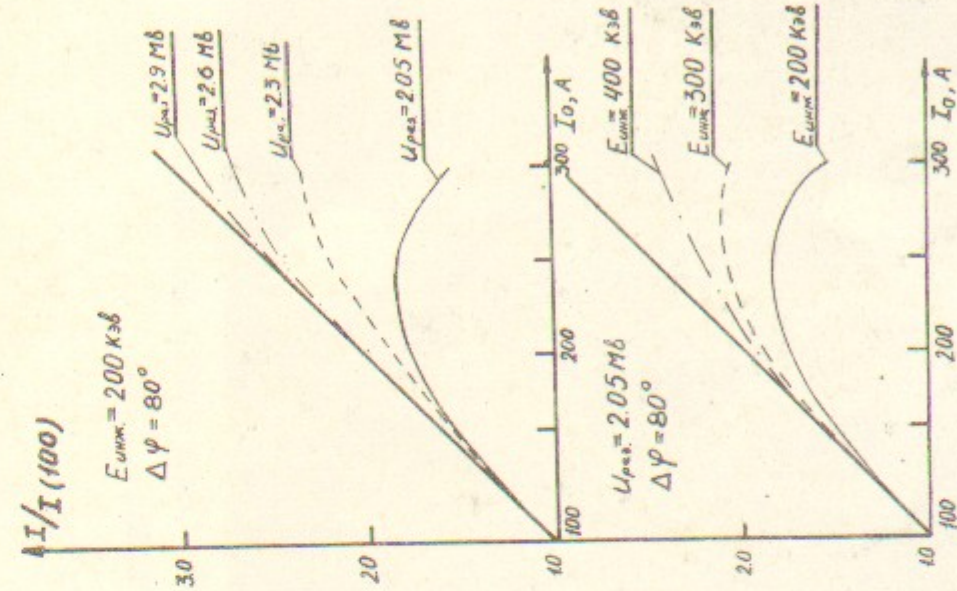


Рис. 18. Зависимость ускоренного тока от тока инжекции для нескольких значений инжекции и нескольких значений ускоряющих напряжений.

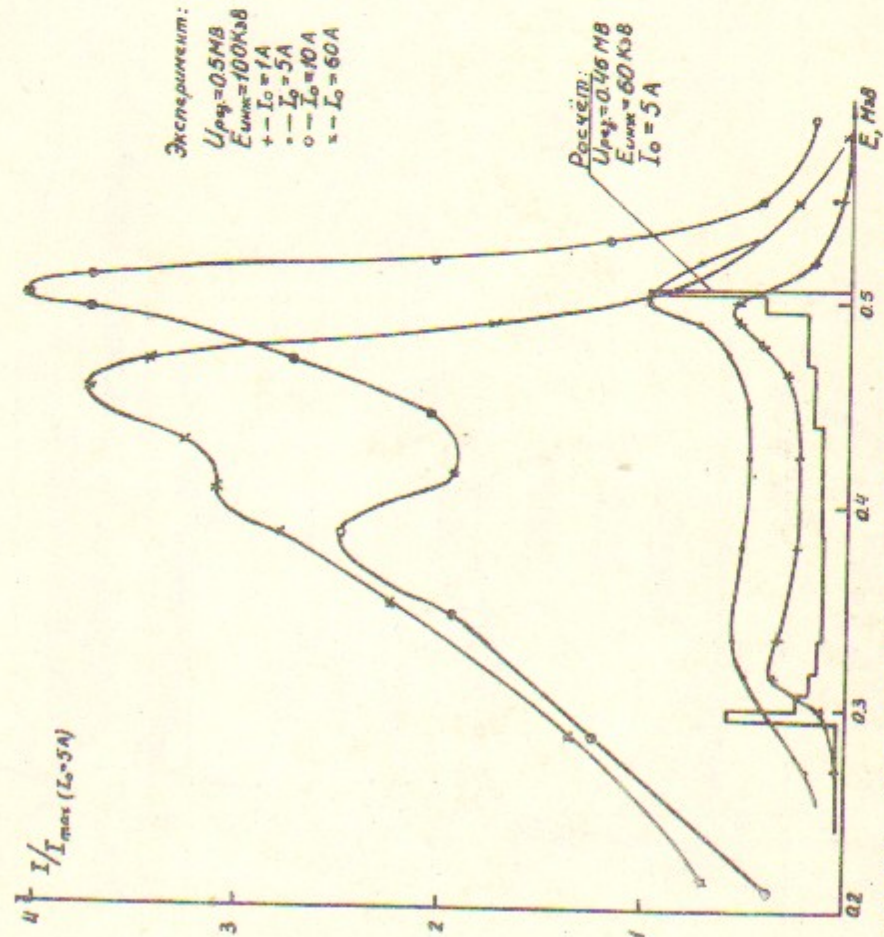


Рис.19. Расчетный и экспериментальные спектры для одного резонатора.

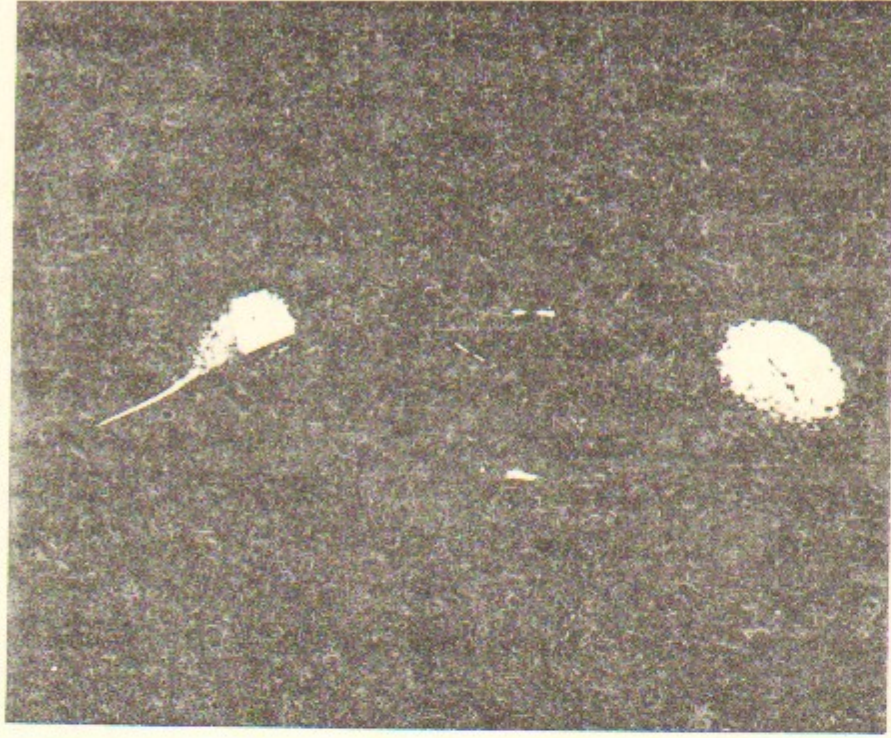


Рис.20. След пучка на пластине из оргстекла.

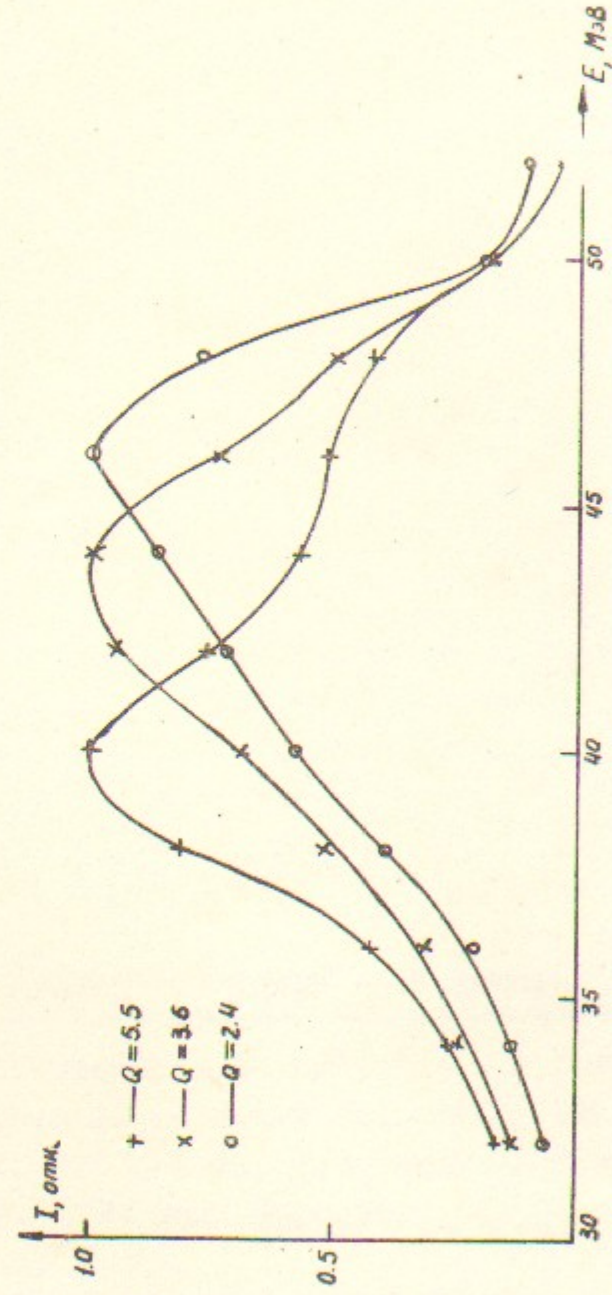
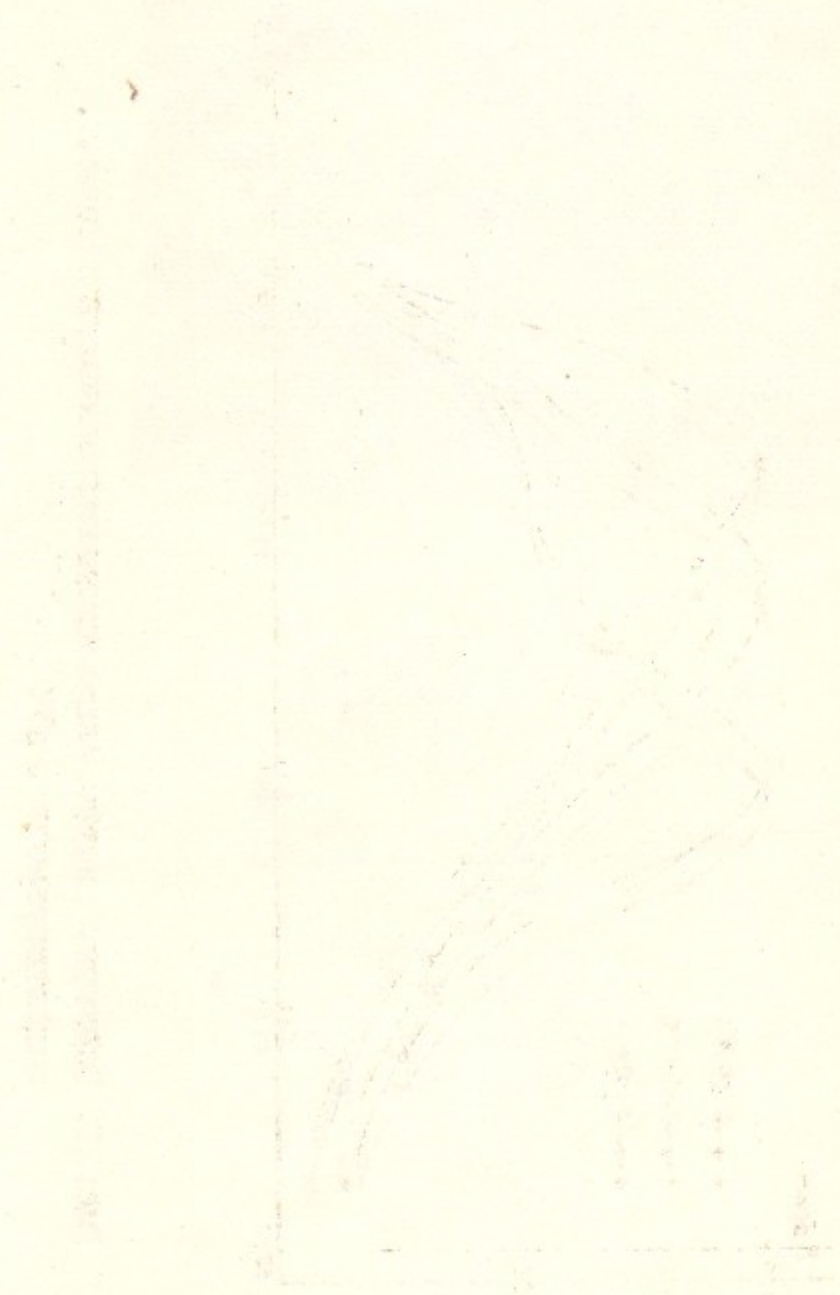


Рис.21. Спектры, снятые для нескольких значений заряда, инжектируемого в ЛУ.



Работа поступила - 18 января 1982г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 3.П-1982г. МН 03072
Усл. 1,6 печ.л., 1,3 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно
Заказ № 18.

Отпечатано на роталпринте ИЯФ СО АН СССР