

СЗУ50

F-524

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р9 5453

605/2-71



А.А. Глазов, В.В. Кольга, Д.Л. Новиков,  
Л.М. Онищенко

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

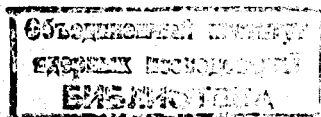
ВНЕШНЯЯ ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА  
И УСКОРЕНИЕ ЕГО ДО КОНЕЧНОГО  
РАДИУСА В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ  
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА  
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

1970

P9 - 5453

А.А. Глазов, В.В. Кольга, Д.Л. Новиков,  
Л.М. Онищенко

ВНЕШНЯЯ ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА  
И УСКОРЕНИЕ ЕГО ДО КОНЕЧНОГО  
РАДИУСА В ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ  
КОЛЬЦЕВОГО ЦИКЛОТРОНА  
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ.



Глазов А.А., Кольга В.В., Новиков Д.Л., Онищенко Л.М. P9-5453

Внешняя инжекция пучка и ускорение его до конечного радиуса в электронной модели кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой

Приведены результаты экспериментальных исследований при внешней инжекции пучка в электронную модель кольцевого циклотрона и ускорения пучка до конечного радиуса. Улучшения, явившиеся результатом изучения поведения пучка в электронной модели, позволили к настоящему времени ускорить до конечного радиуса пучок электронов со средним током = 600 мка.

Сообщения Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1970

Glazov A.A., Kolga V.V., Novikov D.L., Onischenko L.M. P9-5453

External Injection and Acceleration of the Beam to the Final Radius in the Electron Model of the Ring Cyclotron with Strong Focusing

The results of experimental investigations of the external injection of the beam into the electron model of the ring cyclotron and its acceleration to the final radius are presented. Improvements resulting from the investigation of the beam in the electron model allowed, by the present time, the electron beam with the average current of about 600  $\mu$  A. to be accelerated to the final radius.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
Dubna, 1970

В конце 1967 г. в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был осуществлен физический запуск электронной модели релятивистского кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой<sup>/1/</sup>, предназначенной для исследования динамических процессов при большой плотности ускоряемых частиц. Во время запуска и предварительных исследований источником электронов являлась пушка внутренней инжекции, размещенная в камере ускорителя на радиусе первого оборота. Ток, который могла обеспечить пушка внутренней инжекции в импульсном режиме со скважностью  $10^3$ , не превышал 150 мка, а в непрерывном режиме — 50 нА. Замена пушки внутренней инжекции внешним инжектором<sup>/2/</sup> и некоторые улучшения, ставшие возможными в результате изучения поведения ускоренного пучка, позволили ускорить до конечного радиуса пучок электронов со средним током  $\approx 600$  мка.

### Инжекция

Система внешней инжекции была подготовлена к работе до запуска ускорителя и прошла длительные стендовые испытания. Все характеристики пучка на выходе из инжектора были тщательно исследованы. Единственный вопрос, который не получил полного решения при стендовых испытаниях тракта внешней инжекции, — воздействие магнитной системы ускорителя на движение электронов вдоль тракта и последующий их перевод на первую орбиту. Предварительные оценки показали<sup>/3/</sup>, что для обеспечения проводки пучка через тракт при воздействии нормальной к его продольной оси компоненты поля ожидаемой величины от обмоток магнит-

ной системы должна быть использована специальная компенсирующая обмотка, представляющая собой четыре параллельных токовых проводника, уложенных вдоль всего тракта инжекции. Однако конструкция магнитной системы ускорителя выполнена так, что не представлялось возможным подвести компенсирующие обмотки вдоль тракта ближе, чем на 80 мм к медианной плоскости, в то время как гармоническая обмотка на радиусе 18 см отстоит от медианной плоскости на 55,2 мм, а первая обмотка грубой коррекции — на 64 мм (рис. 1).

Измерения компонент магнитного поля  $V_z$  и  $V_\phi$  при полностью включенной магнитной системе вдоль тракта инжекции в зависимости от расстояния до медианной плоскости проводились при помощи магнитометра Холл-4, имеющего точность не хуже 0,1 гаусс. Из графиков рис. 2 видно, что максимальная величина компоненты поля, нормальной к оси тракта инжекции,  $V_z$  составляет 15,5 гаусс и вносится гармонической обмоткой; в области расположения первой обмотки грубой коррекции имеется второй максимум, величина которого вдвое меньше первого. Максимальная величина компоненты  $V_\phi$  также связана с влиянием гармонической обмотки. Включение обмотки компенсации смещало кривые рис. 2 относительно оси  $z$  на  $5 \pm 6$  гаусс, но практически не влияло на уменьшение максимума компоненты  $V_z$  в зоне расположения гармонической обмотки. В одной из серий измерений было показано, что при помощи стального экрана с толщиной стенок 2 мм радиальную компоненту поля  $V_z$  можно уменьшить до значения 1 гаусс, а  $V_\phi$  — до  $0,1 \pm 0,2$  гаусс практически по всему тракту инжекции (кривая 2, рис. 2). Однако установка стальных экранов была связана, во-первых, с полной разборкой ускорителя и проведением большого объема работ, и, во-вторых, с внесением значительного возмущения в ведущее поле ускорителя. В этой ситуации казалось более рациональным использовать в качестве магнитных экранов цилиндры из магнитомягкого материала с большим значением  $\mu$ . Экранирующие цилиндры из 3-х слоев ленточного пермаллоя-66 толщиной 90 мкм были изготовлены точечной сваркой, а затем подвергнуты термомагнитной обработке в среде аргона в соответствии с рекомендуемой технологией (максимальная температура отжига пермаллоя поднималась до  $1100^\circ\text{C}$ ). Затем пермалловые

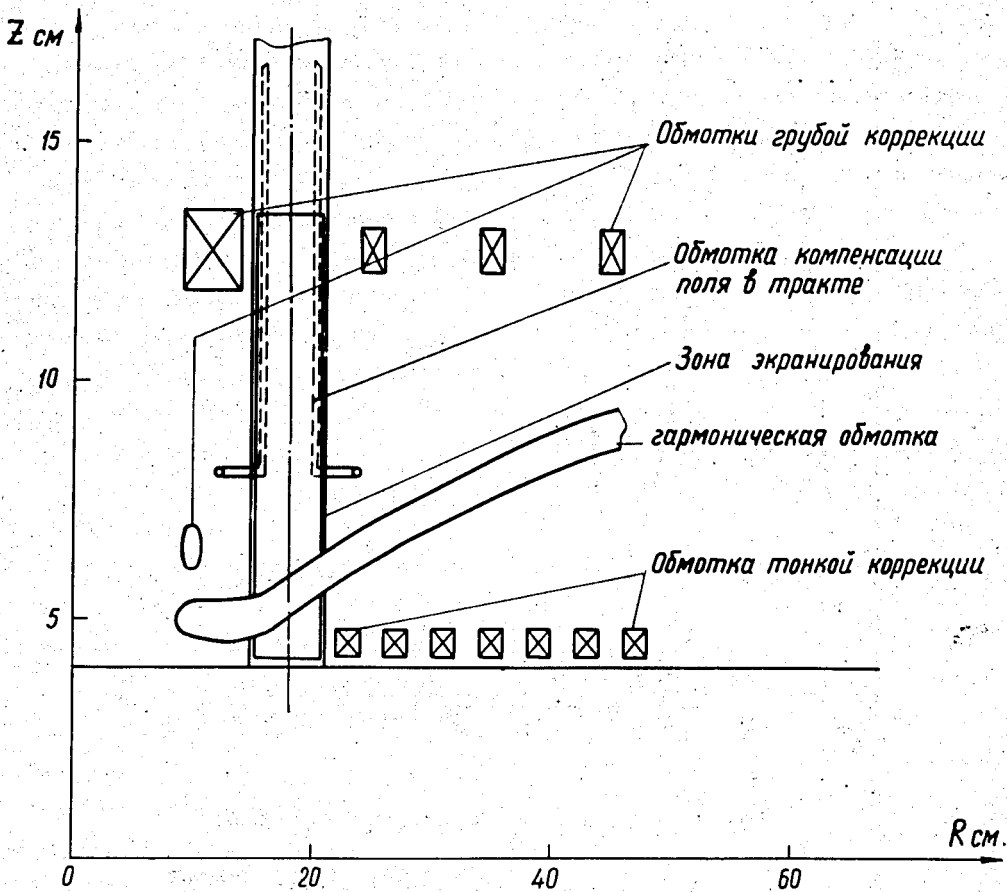


Рис. 1. Схема расположения обмоток магнитной системы ускорителя.

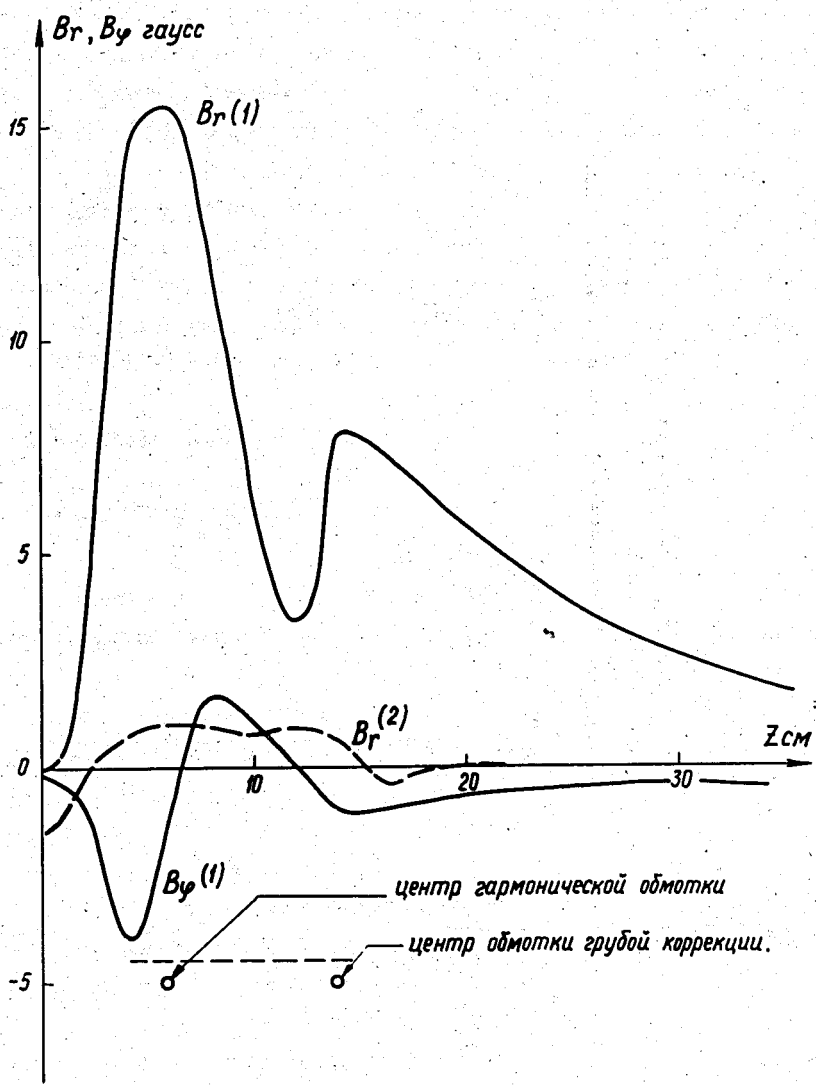


Рис. 2. Зависимость  $B_r$  и  $B_\phi$  от расстояния до медианной плоскости.

цилиндры были установлены внутрь оконечных элементов фокусирующего тракта, при этом зона экранирования простиралась от  $z = 43$  мм до  $z = 137$  мм.

Как и следовало ожидать, без экранирования магнитного поля ускорителя пропускная способность тракта внешней инжекции резко уменьшалась, пучок практически полностью терялся на выходной диафрагме электростатического тракта. После установки экранов из пермаллоевых цилиндров в оконечные элементы тракта при последующем включении всех систем питания инжектора были получены следующие результаты в импульсном режиме. При выключенном магнитном поле на пробнике №1, мишень которого отстоит от оси тракта на 70 мм (после трех коллимирующих диафрагм 10 мм), наблюдался ток  $I = 40+45$  ма. При полностью включенной магнитной системе ускорителя после некоторой подстройки параметров систем питания тракта и обмотки компенсации устойчиво протекал ток до  $20 + 25$  ма, при этом на пробнике №3, сдвинутом от оси инжекции по азимуту на  $240^\circ$ , был зафиксирован ток до 20 ма.

При включении дробления, формирующего из непрерывного тока сгустки протяженностью около 1 радиана, средний ток на первом обороте уменьшается до 4 ма.

Средний ток ускоренного пучка, который может быть удержан на первой орбите магнитными фокусирующими силами<sup>/4/</sup>, оценивается в предположении а) разделения орбит, б) снижения частоты аксиальных колебаний под воздействием сил пространственного заряда до 1, в) равномерного распределения плотности частиц в сгустке

$$I_n = \frac{e \beta^2 \gamma^3 f_0 \Delta \phi r^2 (Q_z^2 - 1)}{2 r_0 R}, \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона,  $\beta = u/c$  и  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ,  $f_0$  - частота ускоряющего поля,  $r$  - радиус поперечного сечения сгустка,  $\Delta \phi$  - его угловая протяженность,  $R$  - средний радиус первой орбиты,  $r_0$  - классический радиус электрона



$$r_e = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 m_0 c^2}$$

Здесь  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная.

Подставляя в (1) измеренные величины в системе СИ  $\beta = 0,165$ ,  $\gamma = 1,01$ ,  $f_0 = 39,5 \cdot 10^6$  1/сек,  $R = 0,2$  м,  $\Delta\phi = 1$  рад,  $r = 5 \cdot 10^{-3}$  м,  $Q_z = 1,2$ , получим  $J_n \approx 2$  ма, следовательно, система внешней инжекции обеспечивает необходимый ток с двукратным запасом.

### Первый оборот

При исследовании первого оборота ставилась задача подобрать оптимальные значения углов инжекции в радиальном  $\alpha$  и вертикальном (аксиальном)  $\beta$  направлениях и энергии инжекции  $W_1$  с тем, чтобы получить близкую к круговой орбиту с минимальными амплитудами радиальных и вертикальных колебаний.

Радиальное положение центра пучка на различных азимутах зависит от энергии и радиального угла инжекции. Рассчитанные на ЭВМ зависимости радиусов пучка от энергии инжекции при различных  $\alpha$  для двух фиксированных значений азимута ( $\theta = 120^\circ$  и  $\theta = 240^\circ$ , отсчёт от азимута инжекции) показаны на рис. 3 и 4; на рис. 4 приведена также зависимость амплитуды свободных радиальных колебаний от энергии инжекции при  $\alpha = 0$ .

Экспериментально положение орбиты при выключенном ускоряющем напряжении определялось по трем пробникам, на каждом из которых были установлены дифференциальные мишени высотой 20 мм, выступающие из экрана на 1 мм; положение мишени по радиусу определялось с точностью 2 мм. Энергия инжекции изменялась в диапазоне 5,5-6,3 кв, точность установки составляла  $\approx 0,08\%/5\%$ , угол инжекции  $\alpha$  изменялся вращением поворотного конденсатора от  $+6^\circ$  до  $-4^\circ$ . Зависимость плотности тока от радиуса при различных  $\alpha$  и  $W_1$  определялась для трех значений азимута  $\theta = 22^\circ$ ,  $120^\circ$  и  $240^\circ$  (соответствующих положению пробника №1, №2, №3). Все эксперименты проводились при токе на первой орбите 10 ма

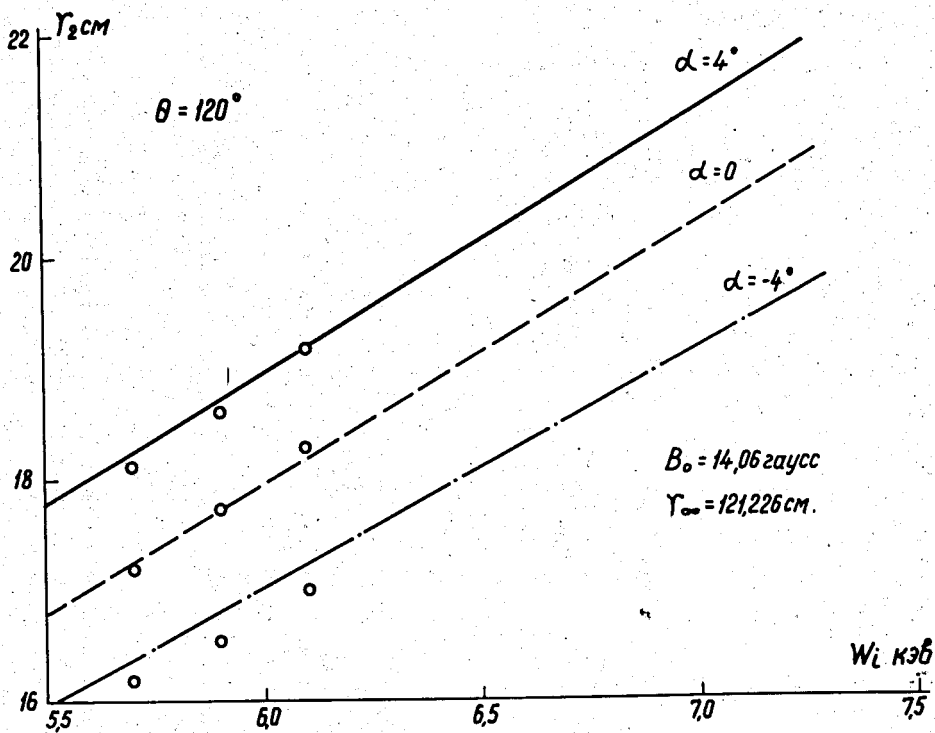


Рис. 3. Радиальное положение центра пучка в зависимости от энергии инжекции при  $\theta = 120^\circ$ .

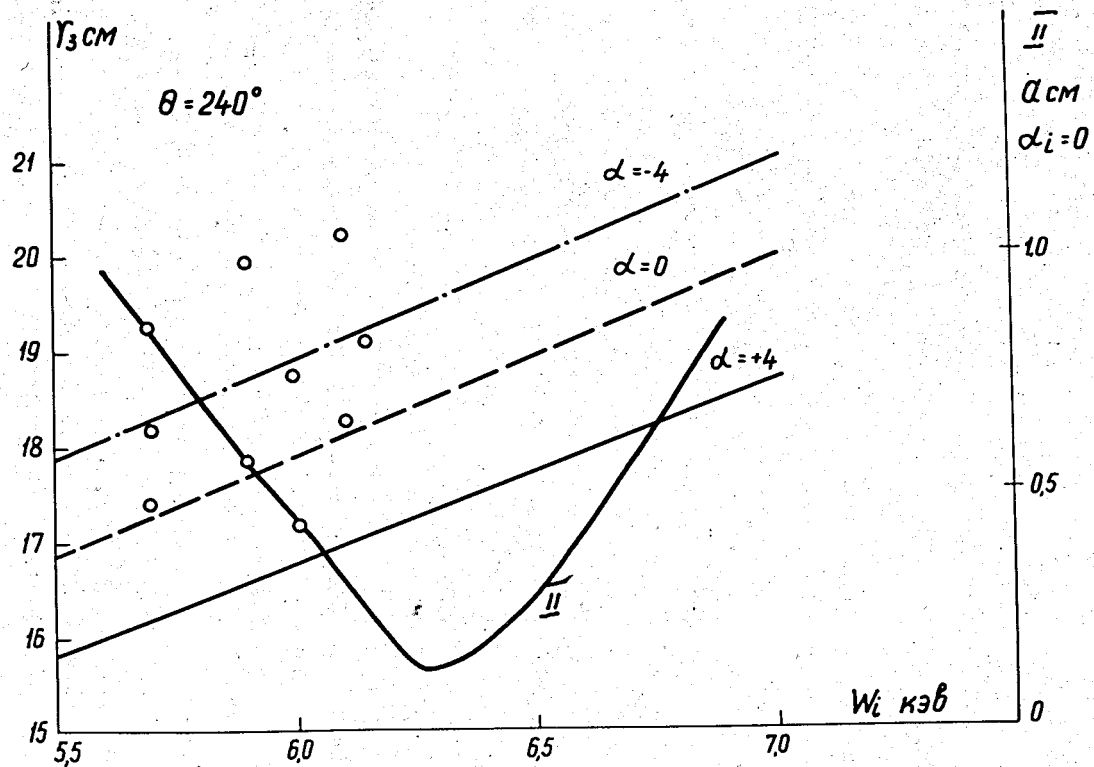


Рис. 4. Радиальное положение центра пучка в зависимости от энергии инжекции при  $\theta = 240^\circ$  и зависимость амплитуды радиальных колебаний (кривая II) от энергии инжекции.

в импульсе. По результатам этих измерений определялось положение центра сгустка в зависимости от угла инжекции  $\alpha$  при различных энергиях  $W_1$  (рис. 5), часть экспериментальных точек нанесена на кривые рис. 3 и 4 для сравнения с рассчитанными на ЭВМ зависимостями. Из рис. 5 следует, что для энергии инжекции 6 кв оптимальным является угол  $\alpha = 30^\circ$ . В этом случае радиальная ширина сгустка не превышает 6 мм, а радиальное положение центра пучка на измеренных азимутах близко к расчётному и обеспечивает минимальную амплитуду радиальных колебаний (рис. 6).

Вертикальный угол инжекции  $\beta$  подбирался изменением напряжения на пластинах сферического конденсатора устройства поворота так, чтобы вертикальный размер пучка был минимальным.

### Ускорение пучка до конечного радиуса

Поведение тока ускоренного пучка вдоль радиуса (спад тока по радиусу) зависит от многих параметров: начальных условий инжекции, частоты и напряжения ускоряющего высокочастотного поля и т.д. Наиболее сильное влияние на характер спада оказывает магнитное поле. Так, например, изменение тока в гармонической обмотке на 0,2% от оптимального значения вызывает уменьшение тока на конечном радиусе в 2 раза. На рис. 7 показаны два спада, второй из которых снят при небольшом изменении токов в обмотках магнитной системы ускорителя. Так как при установке расчётного магнитного поля перепад тока от начального до конечного достигал 2-х порядков, токи в обмотках грубой и тонкой коррекции подбирались экспериментально с тем, чтобы получить удовлетворительный спад. Хотя возможности такого метода в значительной степени ограничены большой зоной действия каждой из обмоток, все же удалось подобрать такие условия, когда ток на начальном радиусе превышает ток на конечном радиусе не более, чем в 4 раза.

Типичным для всех измеренных кривых спада являлось наличие двух областей уменьшения тока (рис. 8). Первое (двукратного при малых токах) уменьшение токов происходит в зоне радиусов 25-45 см и объяс-

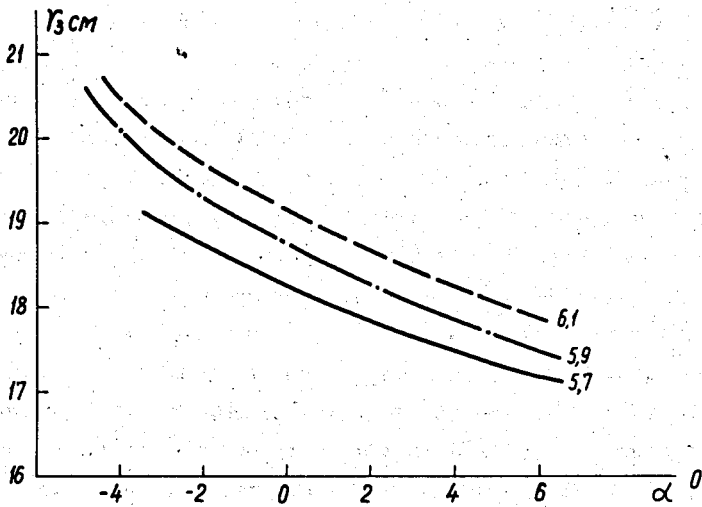
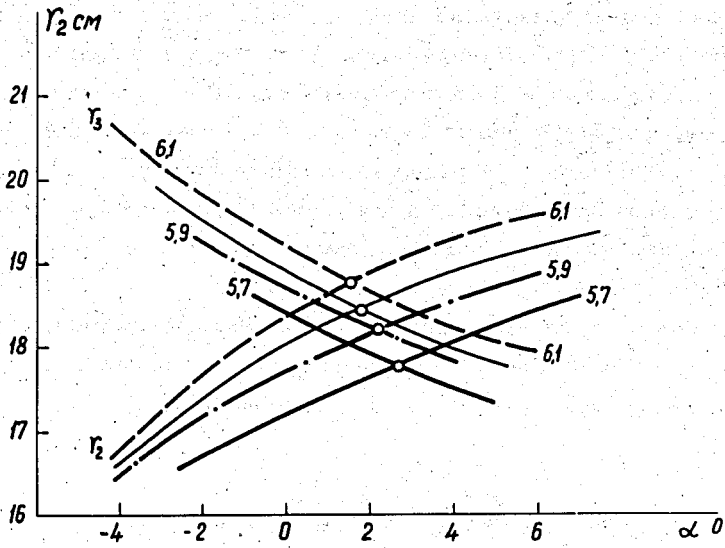


Рис. 5. Экспериментальные зависимости положения центра пучка от угла инъекции.

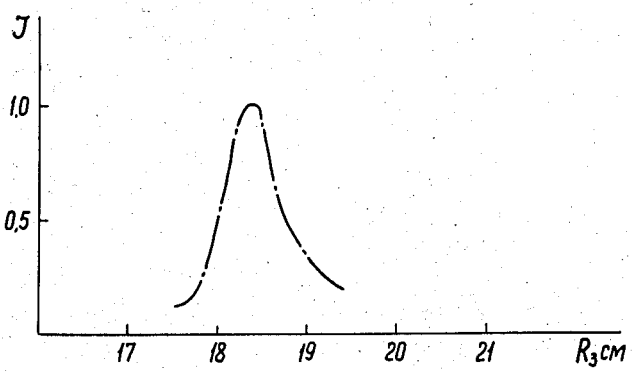
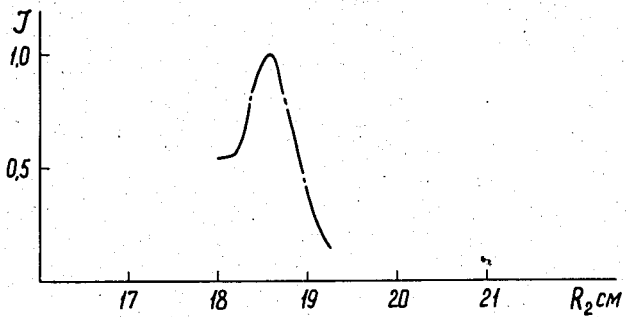
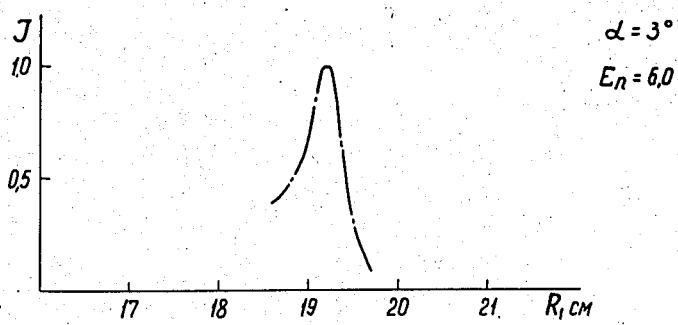


Рис. 6. Зависимость плотности тока от радиуса для  $\alpha = +3^\circ$  и  $W_1 = 6$  кв.

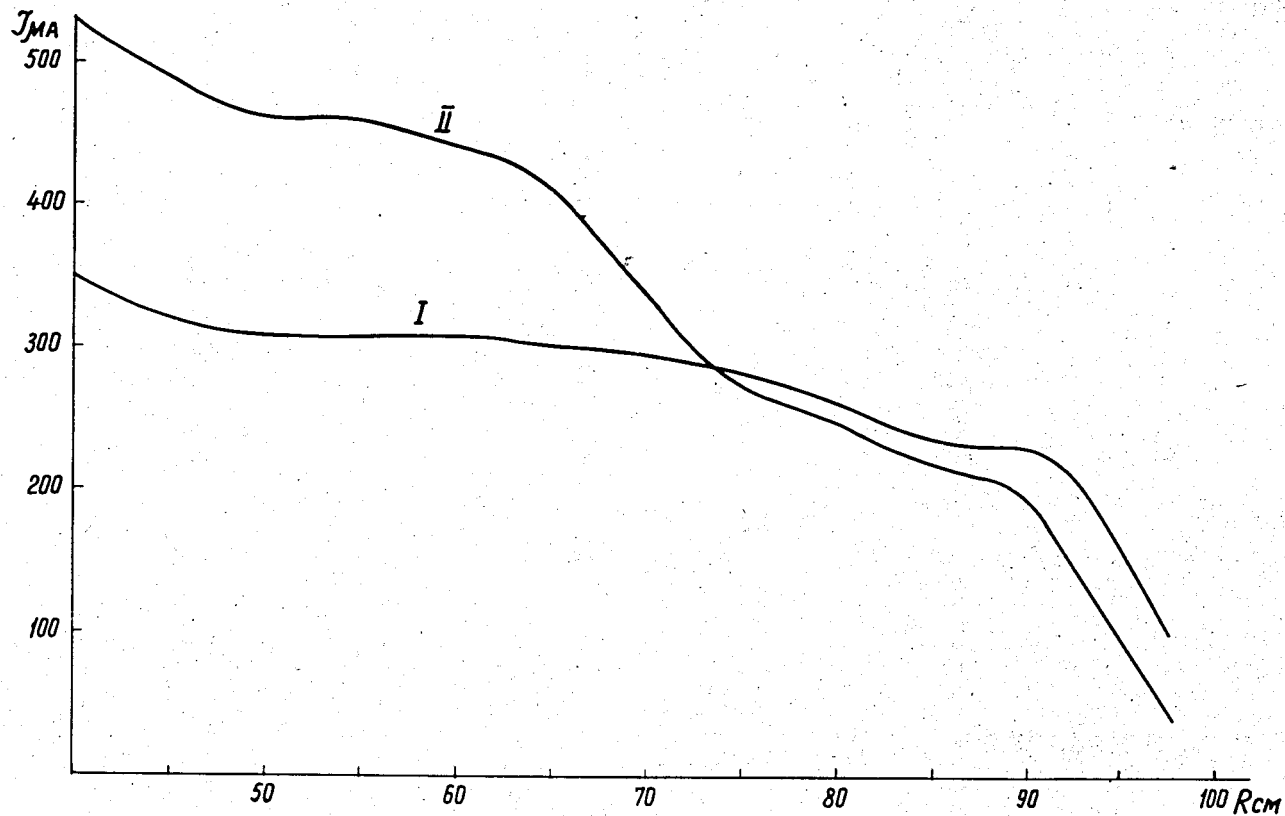


Рис. 7. Спад тока по радиусу.

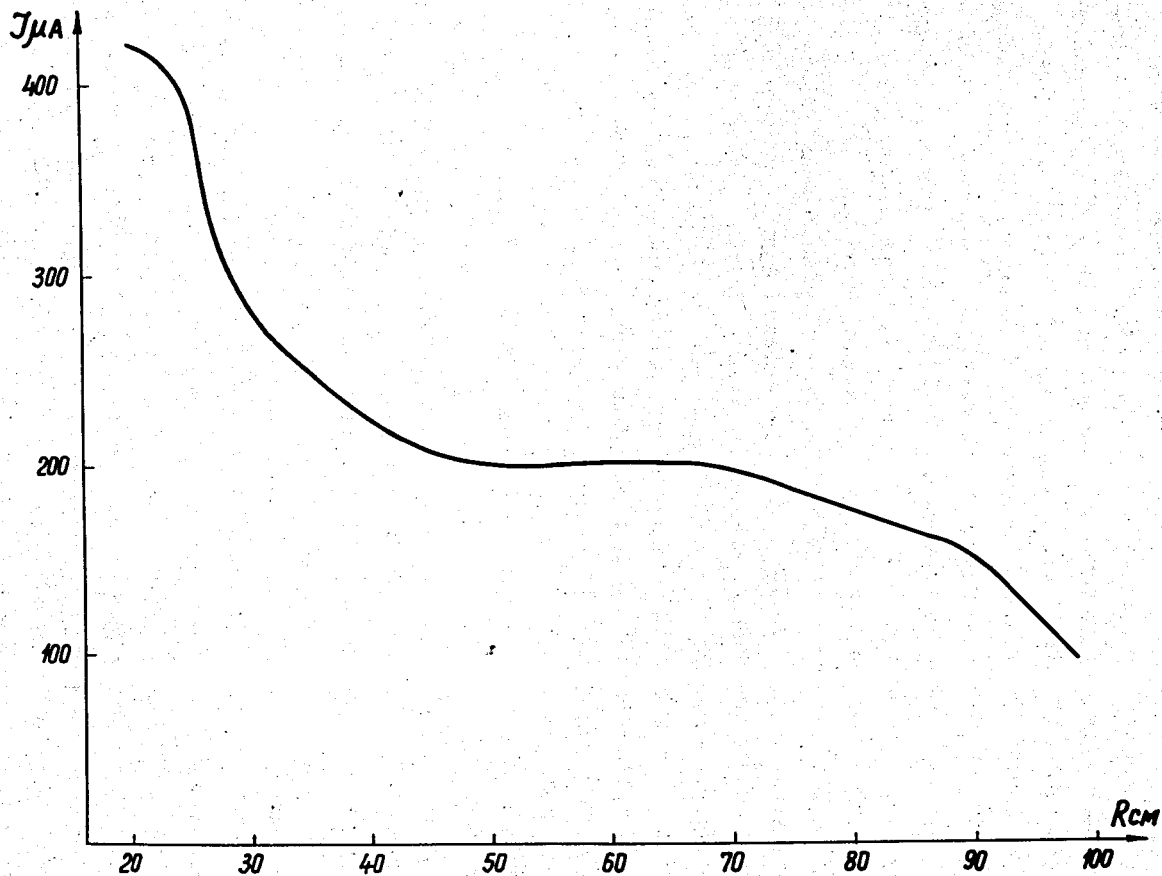


Рис. 8. Спад тока по радиусу.



няется уходом медианной плоскости в этой зоне из-за нарушения допуска на величину радиальной компоненты магнитного поля. Из измерений вертикального положения центра сгустка пучка на азимуте  $120^\circ$  в зависимости от радиуса (рис. 90) видно, что в зоне радиусов 25-45 см пучок опущен, причём максимальное отклонение от средней плоскости на  $R = 28$  см достигает 8 мм. Те же измерения на азимуте  $22^\circ$  указали на подъем пучка от средней плоскости на радиусах 23-30 см. Это свидетельствовало о наличии первой гармоники  $V_r$ , что подтверждалось магнитными измерениями. Из магнитных измерений следовало, что фаза  $V_r$  в зоне радиусов 30-40 см изменяется не очень сильно и максимальная амплитуда  $V_r$  находится на азимуте  $180^\circ$ . Для компенсации первой гармоники  $V_r$  были изготовлены специальные компенсирующие обмотки, однако, они не дали желаемого результата, так как место размещения обмоток по конструктивным соображениям находилось на значительном расстоянии от локального возмущения  $V_r$ . К сожалению, разместить компенсирующие обмотки в непосредственной близости от зоны возмущения не представлялось возможным.

Следующий этап в попытке устранить смещение пучка от средней плоскости заключался в использовании для этой цели аксиального электростатического поля, создаваемого специальными электродами. Для этого на азимуте  $350^\circ$  были установлены две пары "выравнивающих" электродов апертурой 30 мм, азимутальной протяженностью  $10^\circ$  и радиальной шириной 10 см. При помощи этих электродов не удалось устранить потери пучка на радиусах 25-40 см, хотя было отмечено их влияние на положение центра сгустка относительно средней плоскости. Анализ экспериментальных результатов, полученных с электростатическими электродами, показал на существование двух причин, которые, по-видимому, препятствовали достижению цели. Первая причина заключалась в выборе слишком большой радиальной ширины пластин ( $\Delta R = 100$  мм), при которой выравнивающее аксиальное поле действует одновременно на несколько смежных орбит. Вторая причина заключалась в выборе слишком малой азимутальной протяженности пластин ( $\Delta \phi = 10^\circ$ ), при которой выравнивающее аксиальное поле смешало фазу первой гармоники  $V_r$ .

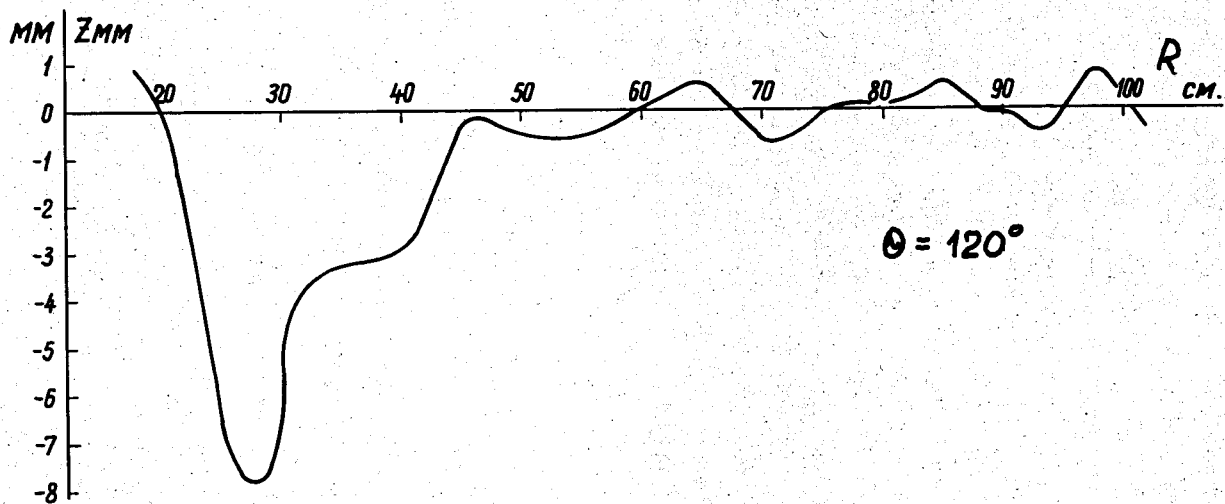


Рис. 9. Положение центра сгустка по вертикали в зависимости от радиуса.

На основе этого эксперимента была изготовлена и опробована система электростатических электродов из 6-ти полуколец протяженностью  $180^\circ$ . Радиальная ширина каждого электрода была выбрана равной 20 мм, а зона действия 23–35 см. При помощи системы выравнивающих электродов удалось существенно уменьшить потери тока в этой зоне радиусов. Так, при токе до двухсот мка на радиусе 60 см потери не превышают 15%, а при токе  $\approx 400$  мка  $\approx 25\%$ .

Вторая область уменьшения тока пучка, которая начинается примерно с  $R = 92-95$  см, объясняется фазовыми потерями из-за незначительного отличия среднего магнитного поля от заданного закона и составляет примерно 8%. Предварительные измерения показывают, что увеличение девиации фазы пучка приводит к увеличению потерь на этом участке.

Общие потери тока пучка от радиуса инъекции до конечного (101,6 см) в настоящее время составляют 10–40% в зависимости от величины ускоряемого тока (рис. 10). Максимальная величина ускоренного до конечного радиуса среднего тока составляет 600 мка.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Н. Аносов, А.Т. Василенко и др. Препринт ОИЯИ Р9-3787, Дубна, 1968.
2. А.А. Глазов, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, ВИНТИ, т. 1 с 485, Москва, 1970 г.
3. С.Б. Ворожцов, Н.Л. Заплатин, Л.А. Саркисян. Препринт ОИЯИ Р9-3448, Дубна, 1967 г.
4. L.J. Laslett. Proc. 1963 Summer Study on Storage Rings Accelerators and Experimentation at Super-High Energies. BNL-7534, 324-67.
5. А.А. Глазов, М.М. Семенов. ПТЭ, 3, 117 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел

11 ноября 1970 года.

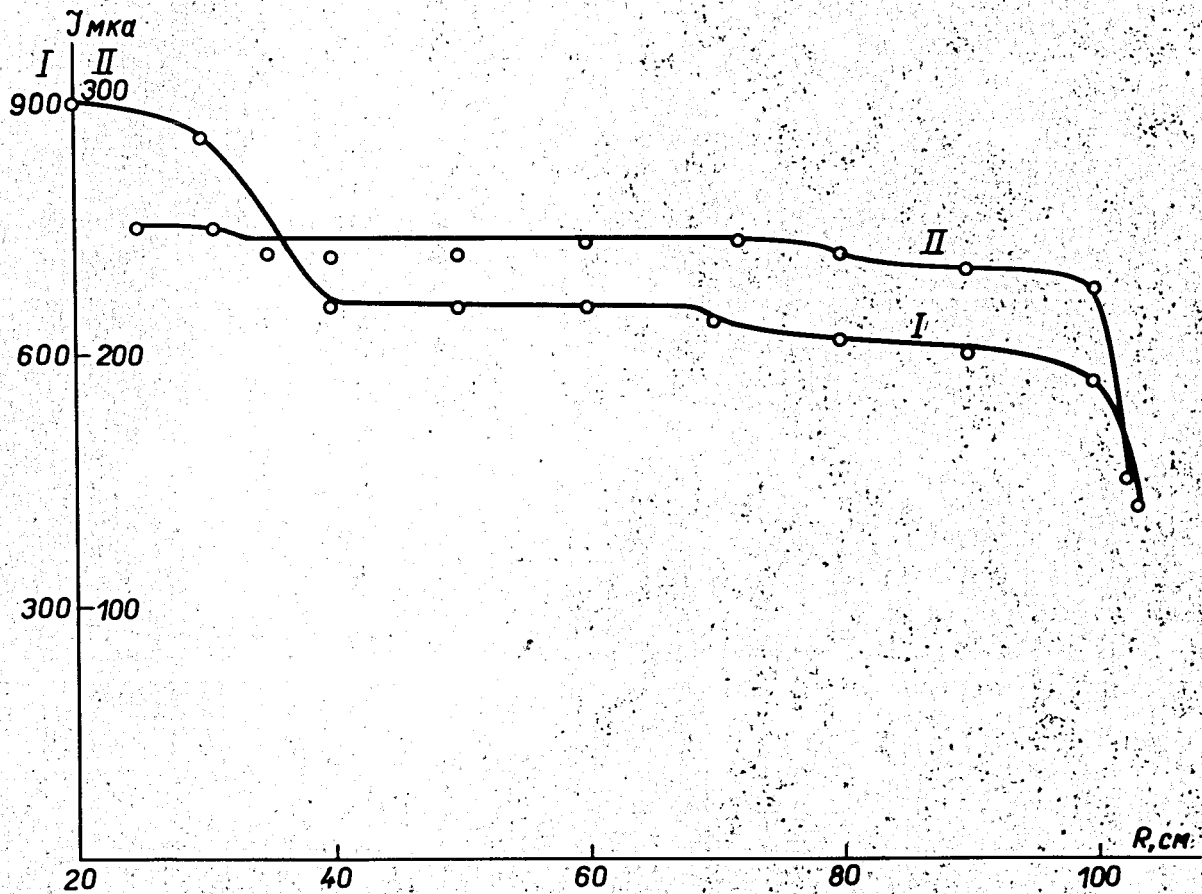


Рис. 10. Спад тока по радиусу после внесенных коррекций.