

60

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76-94

Г.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов, Г.Н.Кулипанов,
В.А.Переведенцев, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский

ИНЖЕКЦИЯ ПОЗИТРОНОВ В НАКОПИТЕЛЬ
ВЭПП-3

Новосибирск

1976

ИНЖЕКЦИЯ ПОЗИТРОНОВ В НАКОПИТЕЛЬ ВЭП-3

Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов, Г.Н.Кулипанов,
Е.А.Переведенцев, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описывается получение позитронов для инъекции в накопитель ВЭП-3 с использованием в качестве фокусирующих элементов в блоке электрон-позитронной конверсии безжелезных импульсных магнитов с полями ~ 50 кЭ и цилиндрических литиевых линз. Приводятся описание методики и результаты экспериментальной проверки коэффициентов конверсии, размера и формы фазового объема позитронного пучка, а также условий захвата частиц.

В качестве источника позитронов использовался проектор энергии $A_p = 2,28$ мВ с длиной волны ~ 10 мкм, диаметр вертикального цилиндра при энергии $A_p = 2,13,5$ мВ и длине $l = 1,4$ м, угол наклона цилиндра к оси поперечного сечения $\alpha = 4$ град. см, диаметр квадратного сечения пучка при угле наклона цилиндра к оси поперечного сечения $\alpha = 0,35$ рад, и диаметр пучка на входе $\langle r^2 \rangle = 0,4$ мм также диаметр ~ 2 мм, см.

Перпендикулярность направления вылета из источника пучка к оси цилиндра обеспечивалась с помощью системы линз, состоящей из двух цилиндрических линз, расположенных на расстоянии 20 см друг от друга, дисперсия отклонения к осевой линзе пучка отклонения в долевой части с перпендикулярной осевой линзе, конверсия же после конвертора в разрыве телескопа импульсного преобразователя ВЭП-3 осуществлялась в виде.

Полученный для инжекции позитронов пучок выбран графом, на котором 30° -ый поворот был бы равен на 45° с цилиндрической линзой в промежуток, фокусирующая которого сдвинута от оси пучка от оси чашки магнетрона к центру магнетрона, при этом может быть ро-

Г. Схема позитронного канала и проектный вариант блока конверсии

Накопитель ВЭП-3 /1/ представляет собой жёсткофокусирующую магнитную дорожку с двумя линейными промежутками по 12 м с радиусом 8 м на полукольцах. Синхротрон-инжектор Б-4 расположен внутри накопительного кольца, направление выпуска из него перпендикулярно направлению инжекции в накопитель (рис.1). Электронный пучок синхротрона имеет энергию $E=430$ мев, число частиц в импульсе $\sim 2 \times 10^{11}$ и частоту посылок $I=2$ гц. Эмитанс электронного пучка по каждому из направлений ~ 1 м.рад.хсм.

Инжекция в накопитель является однооборотной. Выпускаемый пучок вводится в камеру снизу параллельно медианной плоскости на краю вертикальной апертуры дорожки, увеличенной в месте инжекции, и через четверть периода бетатронных колебаний подвергается воздействию инфлектора, который гасит амплитуду когерентных колебаний пучка.

Значение радиального адмитанса дорожки при проектной апертуре $A_r = \pm 28$ мм составляет ~ 16 мрад.см., значение вертикального акцептанса при апертуре $A_z = \pm 13,5$ мм и захвате с предударом /2/, когда акцептанс составляет около половины адмитанса, равно 2 мрад.см, значение среднеквадратичного эмитанса пучка при угле выхода позитронов из конвертера $\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = 0.05$ рад. и размере пучка на нем $\sqrt{\langle r_0^2 \rangle} = 0.4$ мм также составляет ~ 2 мрад.см.

Перпендикулярность направления выпуска из инжектора впускному промежутку накопителя создает определённые трудности при инжекции позитронов, поскольку в случае конверсии до 90 градусного поворота, дисперсия его приводит к большим амплитудам бетатронных колебаний частиц с неравновесной энергией, конверсия же после поворота в реальной геометрии впускного промежутка ВЭП-3 затруднена недостатком места.

Поэтому для инжекции позитронов была выбрана трасса, на которой 90°-ный поворот мог быть разбит на два по 45° с квадрупольным триплетом в промежутке; фокусировка которого создавала одну полуволну бетатронных колебаний пучка между центрами магнитов, что обеспечивает вычитание их дисперсий. При этом может быть ре-

шена задача согласования дисперсионных функций пучка и дорожки.

В проектном варианте позитронного канала /2/ первый из 45-градусных магнитов (КПМ, рис.1) совмещал в себе функции поворотного магнита, создающего нужную дисперсию в позитронном пучке, и короткофокусной светосильной линзы, собирающей позитроны с конвертера, что достигалось за счёт малого радиуса магнита, равного 7,5 см, обеспечивающего при показателе спада поля $\mathcal{N} = 0,5$ и угле поворота 45° аксиальносимметричную фокусировку частиц с главным фокусным расстоянием $F = 20$ см, при апертуре $A_z = A_r = \pm 1$ см, позволяющей собирать позитроны в пределах среднеквадратичного угла выхода их из конвертера.

Для фокусировки электронов на конвертер также предполагалось использовать поворотный магнит (КЭМ, рис.1), осуществляющий вместе с магнитом ПМ-3 параллельный перенос электронного пучка к месту конверсии. При угле поворота 63° , радиусе 12,5 см и показателе спада поля $\mathcal{N} = 0,5$ фокусное расстояние КЭМ составляло 25 см по обоим направлениям. Апертура магнита $A_z = A_r = \pm 8$ мм. /3/ При указанных радиусах и энергиях электронов $E^- = 430$ МэВ и позитронов $E^+ = 250$ МэВ поля в магнитах составляют $H \cong 110$ кЭ.

2.- Система конверсии на литиевых линзах

Трудности эксплуатации в течение миллионов импульсов магнитов с полями ~ 100 кЭ - конверсионных магнитов КЭМ и КПМ в их номинальном режиме, на той стадии их разработки, которая соответствовала началу запуска накопителя ВЭП-3, заставили отказаться от использования таких магнитов в блоке электрон-позитронной конверсии ВЭП-3 и перейти к полям ~ 50 кЭ. При этом пара поворотных магнитов блока конверсии была заменена одним с углом поворота 108° , радиусом 17,2 см, соответствующим полю 50 кЭ при проектной энергии позитронов, и апертурой 22×24 мм². Увеличение угла поворота магнита позволило сохранить фокусное расстояние его равным ~ 25 см, и использовать магнит для собирания позитронов с конвертера на первом этапе работы позитронного канала.

Задача фокусировки электронов в блоке электрон-позитронной конверсии в минимальный размер, была решена с помощью литиевой

линзы /5,6/ с фокусным расстоянием ~ 5 см при энергии электронов 430 МэВ.

Линза, применяемая для этой цели в настоящее время, представляет собой цилиндр из лития длиной 17 мм и диаметром 6 мм, ограниченный на торцах дисками из бериллия толщиной по 1 мм, служащими как для механического удержания лития в заданном объёме, так и для аксиально симметричного подвода тока, пропускаемого по линзе вдоль её оси.

Фокусное расстояние 5 см при энергии электронов 430 МэВ достигается при поле на поверхности линзы, равном 54 кЭ. Ограничением на величину поля служит давление на токоподводящие диски, толщина которых в свою очередь ограничена рассеянием частиц, составляющим заметную часть рассеяния во всей линзе. Среднеквадратичный угол многократного рассеяния электронов с энергией 430 МэВ в линзе и подводящих дисках составляет $\sim 4,5 \cdot 10^{-3}$ рад.

Аберрации цилиндрических линз подробно рассмотрены в /6/. Сравнение углового разброса в пучке за счёт самой существенной из них - краевой аберрации $-\sqrt{\langle \alpha_{\text{кр}}^2 \rangle} \cong 1 \cdot 10^{-3}$ рад. с углом многократного рассеяния позволяет пренебречь аберрациями линзы ввиду малости их вклада в суммарный угловой разброс пучка в линзе, определяемый рассеянием и фазовыми углами в исходном электронном пучке.

Оптимальность выбора параметров линзы определяется целым рядом факторов, главными из которых являются уменьшение прироста эмитанса пучка в конвертере и в самой линзе, и надёжность работы линзы. Уменьшение прироста фазового объёма в линзе, равно произведению угла рассеяния на радиус пучка в линзе, $\Delta \mathcal{E} = r_0 \sqrt{\langle \theta^2 \rangle}$, требует уменьшения сечения пучка с сохранением поля на его границе до тех пор, пока фазовые углы станут больше углов рассеяния. Ограничением на этом пути является повышение требования на точность нацеливания пучка на линзу, определяемого как $\Delta r \ll r_0$. В принятой схеме пучок фокусируется в размер ± 2 мм, требуемая точность нацеливания составляет $\sim 0,5$ мм.

Распределение частиц по фазовой плоскости, предполагаемое однородным в пределах эмитанса в выпущенном из синхротрона пучке электронов, после рассеяния со средним квадратом угла $\langle \theta^2 \rangle$, находится как $P(q, q') dq dq' \propto \int \exp[-(q - \tilde{q}')^2 / \langle \theta^2 \rangle] d\tilde{q} d\tilde{q}'$, где интегрирование

производится в пределах исходного эмитанса. Средний квадрат угла по каждому из направлений при этом равен $\langle q'^2 \rangle = \frac{1}{2} \langle \theta^2 \rangle + \frac{1+\alpha^2}{4\beta} \varepsilon_0$, т.е. сумме средних квадратов фазовых углов в исходном пучке

$\langle q_0'^2 \rangle = \frac{1+\alpha^2}{4\beta} \varepsilon_0$ и проекций углов рассеяния $\frac{1}{2} \langle \theta^2 \rangle$. Средний квадрат координаты частиц по каждому из направлений есть $\langle q^2 \rangle = \frac{\varepsilon_0 \beta}{4} = \frac{r_{0L}^2}{4}$, где r_0 - радиус пучка в линзе, среднее значение произведения координаты на угол $\langle qq' \rangle = \frac{\alpha \varepsilon_0}{4}$, средний квадрат разброса углов вокруг значений, линейно скоррелированных с координатой - углов сходимости пучка, $\langle \Delta q'^2 \rangle = \langle q'^2 \rangle - \frac{\langle qq' \rangle^2}{\langle q^2 \rangle} = \frac{1}{2} \langle \theta^2 \rangle + \frac{\varepsilon_0}{4\beta}$, наконец, среднеквадратичный эмитанс пучка есть $\varepsilon = 2 \sqrt{\langle q^2 \rangle \langle \Delta q'^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0^2}{4} + \frac{\langle \theta^2 \rangle \beta \varepsilon_0}{2}}$

Значения α и β в приведенных выражениях, так же как и ε_0 , относятся к нерассеянному пучку. При $\beta \varepsilon_0 \lesssim \beta^2 \langle \theta^2 \rangle$ распределение углового разброса в пучке вокруг углов сходимости практически не отличается от гауссовского распределения проекций со средним квадратом, равным приведенному выше значению $\langle \Delta q'^2 \rangle$.

Для конкретных параметров электронного пучка ($\varepsilon_0 \cong 1 \cdot 10^{-3}$ рад, $\beta \cong 40$ см, $\alpha \cong 10$) и литиевой линзы, средний квадрат разброса проекций угла на выходе линзы равен $\langle \Delta q'^2 \rangle = 1.6 \cdot 10^{-5}$ по обоим направлениям, откуда среднеквадратичный радиус электронного пучка на конвертере $\sqrt{\langle r'^2 \rangle} = F \sqrt{\langle \Delta q'^2 \rangle}$, где F - фокусное расстояние линзы, равен ~ 0.3 мм. Учёт аббераций в конверсионном магните приводит к эффективному увеличению среднеквадратичного радиуса источника позитронов до величины ~ 0.4 мм.

Экспериментальная проверка соответствия размера электронного пучка на конвертере его расчетному значению проводилась измерением размера пучка фотографическим методом. Кроме того, эффективное распределение координат позитронов на конвертере определялось путём измерения вертикального углового распределения их в центре впускного магнита 7ПМ, поскольку вертикальная координата частиц на конвертере почти точно переходит в вертикальный угол в центре 7ПМ (изменение фазы бетатронных колебаний пучка составляет $3/4\pi$ с точностью до нескольких градусов). Полученное таким образом распределение вертикальных углов позитронов в центре 7ПМ (рис.2) хорошо описывается гауссовским со среднеквадратичным значением проекции $\sqrt{2 \langle \alpha_z^2 \rangle} \cong 2.3 \cdot 10^{-3}$ рад., что с точностью $\sim 5\%$ совпадает с расчетным значением $\sqrt{2 \langle \alpha_z^2 \rangle} \cong 2.2 \cdot 10^{-3}$ рад., соответствующим эффек-

тивному среднеквадратичному радиусу пучка на конвертере $\sqrt{\langle r'^2 \rangle} \cong \cong 0.4$ мм.

Угол выхода позитронов из конвертера с учётом угла сходимости электронов находится сложением среднего квадрата проекций угла позитронов при бесконечно тонком электронном пучке $\langle q'^2 \rangle = \frac{1}{2} \langle \theta^2 \rangle$, где $\langle \theta^2 \rangle$ - средний квадрат угла выхода из конвертера позитронов заданной энергии при бесконечно тонком электронном пучке, равный, согласно /7/, $\langle \theta^2 \rangle \cong \frac{110T}{E^{+2}} \sqrt{1 + \frac{E^{-2}}{E^{+2}}}$, T - толщина конвертера в радиационных единицах длины, со средним квадратом проекций угла сходимости, определяемым средним квадратом координаты частиц в линзе и её фокусным расстоянием F_L как $\langle q_{ок}'^2 \rangle = \frac{\langle q^2 \rangle_L}{F_L^2} = \frac{r_{0L}^2}{4F_L^2}$. Средний квадрат угла выхода позитронов при этом есть $\langle \theta_+^2 \rangle = 2 \langle q_{ок}'^2 \rangle = \langle \theta^2 \rangle + r_{0L}^2 / 2F_L^2$, и при $r_{0L} = 2$ мм, $F_L = 5$ см, $E^+ = 250$ МэВ, $E^- = 430$ МэВ и толщине конвертера 3 мм вольфрама, $\sqrt{\langle \theta_+^2 \rangle} \cong 5.2 \cdot 10^{-2}$ рад. вместо $\sqrt{\langle \theta_+^2 \rangle} = \sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \cong 4.4 \cdot 10^{-2}$ рад. при $r_{0L} = 0$.

Интегральное распределение проекций углов позитронов, считая его гауссовским при бесконечно тонком электронном пучке, с учётом реальных углов сходимости получаем в виде

$$P(q'_+) dq'_+ = \frac{2}{\pi} \int_0^{q'_+} \sqrt{1 - q'^2} \cdot \frac{4F_L^2}{r_{0L}^2} \cdot \left[\operatorname{erf} \frac{q'_+ - q'}{\sqrt{\langle \theta^2 \rangle}} + \operatorname{erf} \frac{q'_+ + q'}{\sqrt{\langle \theta^2 \rangle}} \right] \frac{2F_L dq'}{\sqrt{\langle \theta^2 \rangle}} dq'$$

Уменьшение числа частиц в пределах заданного значения проекции $q'_+ = 0.037$ рад. за счёт угла сходимости электронов при указанных выше значениях r_{0L} , F_L и $\sqrt{\langle \theta^2 \rangle}$ по каждому из поперечных направлений составляет $\sim 10\%$ и $\sim 20\%$ - по обоим направлениям.

Измерение числа позитронов в пределах заданного телесного угла проводилось с помощью пробника, расположенного непосредственно за конверсионным магнитом, и коэффициент прохождения не зависел от изменения в пределах нескольких миллиметров размера пучка на конвертере.

Коэффициент выхода позитронов в угол $\theta \leq 0.037$ рад. при энергиях электронов 430 МэВ, позитронов 254 МэВ при малых углах сходимости электронов оказался равным $\sim 1.35 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta E / E$, что находится в согласии с расчетным значением /7/.

Используя полученные выше значения средних квадратов угла выхода позитронов $\langle \theta_+^2 \rangle$, координаты частиц на конвертере $\langle r_0'^2 \rangle$, а также эффективного прироста её за счёт аббераций в конверсионном

магните $\langle \Delta r_{\text{дс}}^2 \rangle \cong 0.06 \text{ мм}^2$, среднеквадратичный эмитанс позитронов $\epsilon_0 = \sqrt{\langle \theta^2 \rangle (\langle r_0^2 \rangle + \langle r_{\text{дс}}^2 \rangle)}$ получаем равным ~ 2 мрад.см. Значение β - функции в эффективном источнике позитронов ~ 0.8 см, значения α , η и η' равны нулю.

Для достижения близкого к оптимальному согласования параметров позитронного пучка и дорожки при увеличенном по сравнению с проектным углом поворота собирающего магнита должна быть применена дополнительная фокусировка позитронов до магнита, т.е. в той части канала, где это изменение не отражается на η - функции пучка. Эта задача решается путём использования в блоке конверсии второй литиевой линзы - для собирания позитронов с конвертера.

Собирающая линза помещается между конвертером и конверсионным магнитом, так что выход конвертера (точнее, эффективный источник позитронов) находится в первой фокальной плоскости линзы, а фокус магнита - по второй. Фокусировка пучка между фокальными плоскостями описывается матрицей $\begin{pmatrix} 0 & F \\ -1/F & 0 \end{pmatrix}$, так что разброс углов θ_k и координат r_k на конвертере переходит в разброс углов θ_0 и координат r_0 в фокальной плоскости магнита как $\langle r_0^2 \rangle = F^2 \langle \theta_k^2 \rangle$ и $\langle \theta_0^2 \rangle = \langle r_k^2 \rangle / F^2$. Значение β изменяется при этом как $\beta_0 = F^2 / \beta_k$, α остаётся равным 0.

Фокусное расстояние линзы F выбрано равным 4 см, длина линзы по литию - 16 мм, диаметр - 5 мм, толщина каждого из ограничивающих дисков - 0.4 мм. При энергии электронов ~ 250 МэВ поле на поверхности линзы ~ 33 кЭ, угол многократного рассеяния в литии и дисках $\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \cong 7 \cdot 10^{-3}$.

Эффективный размер пучка на конвертере складывается из действительного размера (~ 0.3 мм) и его эффективного приращения за счёт рассеяния в линзе $F \sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \cong 0.3$ мм и по прежнему составляет ~ 0.4 мм., откуда угловой разброс позитронов в фокусе конверсионного магнита получаем равным $\sqrt{\langle \theta_0^2 \rangle} \cong 1 \cdot 10^{-2}$ рад. Размер пучка в фокусе магнита равен $\sim 5 \cdot 10^{-2} F$, т.е. ~ 2 мм, и среднеквадратичный эмитанс ϵ_0 равен ~ 2 мрад. см., β - функция - 20 см., $\alpha \cong 0$.

В новой схеме увеличение эмитанса пучка за счёт аберраций конверсионного магнита пренебрежимо мало прежде всего потому, что абсолютная величина аберраций уменьшается по меньшей мере квадра-

тно с уменьшением размера пучка в магните. Кроме того, уменьшение размера при сохранении эмитанса сопровождается увеличением углового разброса в пучке, что уменьшает относительный вклад аберрационных углов.

Прирост эмитанса за счёт рассеяния в фольге, разделяющей вакуумные объёмы канала и накопителя, $\Delta \epsilon \cong \frac{1}{2} \beta \langle \theta^2 \rangle$, составляет ~ 0.36 мрад.см., т.е. $\sim 18\%$ от исходного эмитанса, по вертикали ($\beta_z \cong 590$ см) и $\sim 3\%$ - по радиусу ($\beta_r = 100$ см). Уменьшение эффективности захвата не превышает $\sim 10\%$.

В новой геометрии канала близкое к оптимальному согласование параметров пучка и дорожки характеризуется полностью согласованными α_z, β_z, η и η' - функциями и рассогласованностью β_r в ~ 1.5 раза. Уменьшение эффективности захвата за счёт такой рассогласованности не превышает 5%. Потери за счёт вертикальной η - функции пучка, составляющей $\eta \cong 4$ см., $\eta' \cong 0.073$ на входе в накопитель, - $\sim 2\%$.

Рассматриваемая геометрия отличается малыми значениями β - функций на всём протяжении канала, за исключением места впуска, где увеличение β_{z0} обусловлено согласованием с β_z дорожки (рис.3). Это обеспечивает высокую стабильность коэффициента прохождения частиц по каналу и снижает требования на точность геометрической выстановки его элементов.

Отмеченное здесь свойство выгодно отличает настоящую схему позитронного канала не только от промежуточного, но и от проектного варианта ее.

3. Определение параметров пучка на входе в накопитель и условий его захвата в дорожку

В процессе настройки режима инжекции была проведена серия измерений с пучком, позволивших определить реальные параметры пучка на входе в накопитель и реальные условия его захвата, а также сравнить полученные значения коэффициентов захвата с расчётными для этих реальных параметров.

Эти измерения включали в себя трассировку и измерение пропускной способности позитронного канала электронным пучком, определение

коэффициентов прохождения позитронов по каналу, а также получение и сравнение с расчетными зависимостями коэффициента захвата от изменения режимов элементов канала и накопителя.

Трассировка канала проводилась тонким электронным пучком, выпущенным из накопителя, т.е. в направлении, обратном направлению движения позитронов. Одновременное изменение знака заряда и направления движения частиц позволило провести трассировку при рабочей полярности элементов канала, исключая неточности, возможные при переполюсовке. Малый размер пучка обеспечивал высокую точность измерения его положения относительно оси канала. Наблюдение пучка проводилось по люминофорам.

Смещение пучка на входе в канал с помощью частоты ВЧ — по горизонтали и пары корректирующих магнитов — по вертикали, изменение угла входа в канал с помощью магнитов ПМ7 и ПМ6 и изменение поля в дорожке позволили измерить пятимерный фазовый объем, пропускаемый каналом.

Пропускная способность канала иллюстрируется рис. 4, 5, 6, где показано взаимное расположение на фазовой плоскости эмитанса пучка, адмитанса накопителя и границ апертур элементов канала и участка накопителя от места инъекции до входа в инфлектор, приведенных ко второй фокальной плоскости собирающей литиевой линзы, для частиц с равновесной энергией (рис. 4) и с $\Delta p/p = 1\%$ (рис. 5). Энергетическая дисперсия в вертикальном направлении не учитывается ввиду ее малости.

Линии со стрелками на рис. 4, 5, 6 указывают направления смещения пучка относительно канала и адмитанса при отклонении положения или угла поворота элементов, наиболее сильно влияющих на траекторию пучка в канале, от их расчетного значения, причем, точками на этих линиях обозначены положения центра пучка при отклонениях, равных 1 мм в поперечном направлении для литиевых линз, 1% в величине поля — для 6ПМ и КПМ, $5 \cdot 10^{-3}$ рад. — для 6НК и 7ПМ.

Измерение коэффициентов прохождения позитронов по каналу в описываемой схеме проводилось с помощью дистанционно перемещаемых свинцовых пробников, первый из которых расположен между 6НК и 4КЛ (см. рис. I), второй — на входе в инфлектор.

Поперечный фазовый объем частиц, попадающих на первый пробник, как видно из рис. 4 и 6, ограничивается практически только апертурой собирающей литиевой линзы, поскольку вторая пара границ находится в области пренебрежимо малой плотности распределения частиц по фазовому объему. Коэффициент прохождения равен коэффициенту выхода позитронов из конвертера в угол собирания литиевой линзы $\Theta_{max} = 0.0625$ рад. и энергетический интервал $\pm 1.9\%$, определяемый дисперсией КПМ и апертурой 6НК. При энергии позитронов 250 МэВ и электронов 430 МэВ расчетный коэффициент выхода в указанные угловой и энергетический диапазоны составляет $\sim 7.3 \cdot 10^{-4}$, что в пределах точности расчетных данных и измерений совпадает с полученным экспериментально значением $\sim 1 \cdot 10^{-3}$.

Прохождение позитронов на пробник перед инфлектором дополнительно ограничивается по вертикали в месте впуска и по энергетическому интервалу — в 4КЛ. Расчетный коэффициент прохождения при этом составляет $\sim 5.4 \cdot 10^{-4}$, измеренный $\sim 4.5 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 7 и 8 приведены распределения вертикальных и горизонтальных углов позитронов в центрах магнитов 7ПМ и ПМ6, расположенных вблизи впуска в накопитель, полученные путем измерения зависимости коэффициента захвата в малый адмитанс от поля в этих магнитах.

Изменение поля во впускном магните приводит к изменению его угла поворота, т.е. к смещению адмитанса относительно центра пучка на фазовой плоскости. Изменение коэффициента захвата, при этом, пропорционально изменению плотности распределения частиц по фазовому объему вдоль направления смещения. Малый адмитанс дорожки получался путем перекрытия её апертуры дистанционно управляемой диафрагмой.

Ширина распределений рис. 7 и 8, полученных в рабочем режиме канала, $\sqrt{2 \langle z'^2 \rangle} \cong 2.7$ мрад., $\sqrt{2 \langle x'^2 \rangle} \cong 4.4$ мрад., несколько отличается от расчетной $\sqrt{2 \langle z'^2 \rangle} \cong 2.2$ мрад., $\sqrt{2 \langle x'^2 \rangle} \cong 6$ мрад. Такое отличие может возникнуть из-за отклонения поля в литиевой линзе или квадрупольном триплете на $\sim 10\%$ от номинала. Рассогласованность эмитанса пучка за счет такого отклонения приводит к уменьшению эффективности захвата менее чем в 1,5 раза.

На рис.9 и 10 приведены зависимости коэффициента захвата от величины вертикального и радиального акцентансов накопителя, изменение которых в процессе измерения осуществлялось перекрытием соответствующей апертуры дорожки с помощью специального пробника. Расстояние от пробника до центра области захвата пересчитывалось в максимальное значение огибающей пучка на полукольцах по расчетному отношению этого значения к огибающей на азимуте пробника. Центр области захвата находился путем совмещения расчетной зависимости коэффициента захвата от величины акцентанса с измеренной при малых апертурах, когда возможные несогласованности не сказываются на эффективности захвата. Различие в положении равновесной орбиты, определяемой по выбиванию пробником затухшего пучка, и центра области захвата, обусловленное остаточными когерентными колебаниями впускаемого пучка, составляет ~ 1 мм, что соответствует реальной точности нацеливания пучка и "заброса" инфлектора.

В случае вертикального захвата совпадение расчетной и измеренной зависимостей коэффициента захвата имеет место во всем диапазоне изменения акцентанса, в случае же радиального наблюдается отклонение начиная со значений сгибающей $\chi_m \approx 6$ мм, которое моделируется ограничением энергетического интервала захватываемых частиц величиной $|\frac{\Delta p}{p}| < 0.6\%$. Поскольку коэффициент прохождения на пробник хорошо совпадает с расчетным, что устраняет сомнения в пропускной способности канала, причину ограничения энергетического интервала следует искать в условиях захвата частиц. Действительно, это ограничение находится в соответствии с наблюдаемым экспериментально ограничением допустимого смещения равновесной орбиты дорожки величиной $\sim \pm 7$ мм, эквивалентным, как следует из формы зависимости эффективности захвата от изменения частоты ВЧ (рис.11), ограничению области радиально-фазовых колебаний впускаемых частиц, соответствующему энергетическому интервалу $\sim \pm 0.6\%$.

Хорошее совпадение расчетной и измеренной зависимостей коэффициента захвата в полный адмитанс дорожки от смещения эмитанса пучка при изменении поля в магнитах 7ПМ и ПМ6 (рис.12 и 13), указывает на отсутствие заметных искажений формы вертикального и радиального адмитансов дорожки, а также служит некоторым критерием

при расчетном моделировании возможной неточности фокусировки в канале в соответствии с результатами измерения углового разброса в пучке на входе в накопитель.

Учет ограничения захватываемого интервала импульсов уменьшает расчетное значение коэффициента захвата в равновесной фазе ВЧ от $9.4 \cdot 10^{-5}$ до $4.4 \cdot 10^{-5}$. С учетом реальной точности согласования параметров пучка и дорожки, расчетный коэффициент захвата в равновесной фазе ВЧ составляет $\sim 4 \cdot 10^{-5}$. Апертуры дорожки при расчете принимались равными ± 8 мм - вертикальная и ± 15 мм - радиальная.

Отличие расчетного коэффициента захвата от полученного экспериментально значения $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ несколько превышает суммарную точность расчета и измерения, которую можно характеризовать фактором 1.5. Это заставляет предположить наличие нерассмотренных неточностей либо в фокусировке или трассировке пучка в канале, либо в условиях захвата, среди которых может оказаться некоторое увеличение по сравнению с расчетной η - функции дорожки.

Из числа неточностей трассировки пучка, способных привести к уменьшению коэффициента захвата без заметного изменения коэффициента прохождения по каналу, наиболее существенными являются отклонения за счет ошибки в поперечном горизонтальном положении литиевых линз, некомпенсируемые регулировкой поля в магнитах КПМ и ПМ6 (см.рис.5). Смещение одной из линз на ~ 0.6 мм, эквивалентное смещению центра эмитанса пучка на границу адмитанса в направлении, указанном на рис.5, приводит к уменьшению коэффициента захвата в ~ 2 раза при незначительном уменьшении коэффициента прохождения. Впрочем, вероятность такой ошибки практически исключается методикой настройки блока конверсии, включающей в себя дистанционное поперечное перемещение литиевых линз с шагом 0.1 мм до получения максимального коэффициента захвата.

Достигнутая к настоящему времени скорость накопления позитронов составляет 45 мкА/мин., что позволяет накапливать ток в 5-6 мА, достаточный для проведения некоторых экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками в накопителе ВЭП-3.

В заключение остановимся ещё на одном варианте позитронного канала, рассматриваемом в настоящее время в связи с проектом ин-

жекции накопленного позитронного тока из ВЭШ-3 в накопитель ВЭШ-4 /8/, что при достигнутой скорости накопления может обеспечить первый этап работы ВЭШ-4.

Исходя из условий удобства выпуска из ВЭШ-3 для инъекции в ВЭШ-4; направление впуска позитронов в ВЭШ-3 выбирается противоположным существующему. Малые габариты блока конверсии на литиевые линзы позволяют разместить его на прямом участке электронного канала после 90-ного поворотного магнита ПМ4 (рис.1). При этом теряется возможность согласования η -функций пучка и дорожки, однако потери за этот счёт в реальных условиях захвата пренебрежимо малы. Согласование β -функций осуществляется с помощью малогабаритного квадрупольного дублета с секциями длиной по 9 см и апертурой $\pm 1,5$ см.

Расчётное значение коэффициента захвата в новом варианте составляет $\sim 4 \cdot 10^{-5}$.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Буджер и др. "Электрон-позитронная установка на встречных пучках ВЭШ-3 на энергию 3,5 ГэВ" Международная конференция по ускорителям, Ереван, 1969 г. т. II стр.
2. Т.А.Всеволожская, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский. "Электронно-оптический канал накопителя ВЭШ-3" Труды первого всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1969 г. т. I.
3. Т.А.Всеволожская и др. "Применение импульсных магнитов с полями 120 Кэ в блоке конверсии накопителя ВЭШ-3". Труды второго всесоюзного совещания по ускорителям Москва, 1970 г. т. I, стр. 173.
4. Т.А.Всеволожская. "Эффективность захвата при инъекции в накопитель пучков с большим фазовым объёмом" Препринт ИЯФ 75-35, Новосибирск, 1975 г.
5. Б.Ф.Баянов, Г.И.Сильвестров. "Возможность применения лития для создания цилиндрических линз с большими магнитными полями". Препринт ИЯФ 76-41. Новосибирск, 1976 г.
6. Т.А.Всеволожская, М.А.Любимова, Г.И.Сильвестров. "Оптические свойства цилиндрических линз" ЖТФ т. X, вып. 12, 1975 г. стр. 294.
7. Т.А.Всеволожская "Оптимальное получение позитронных пучков высоких энергий". Препринт ИЯФ 76-95, Новосибирск, 1976 г.
8. ВЭШ-4 Рабочие материалы ИЯФ. Выпуск 2, 1974 г.

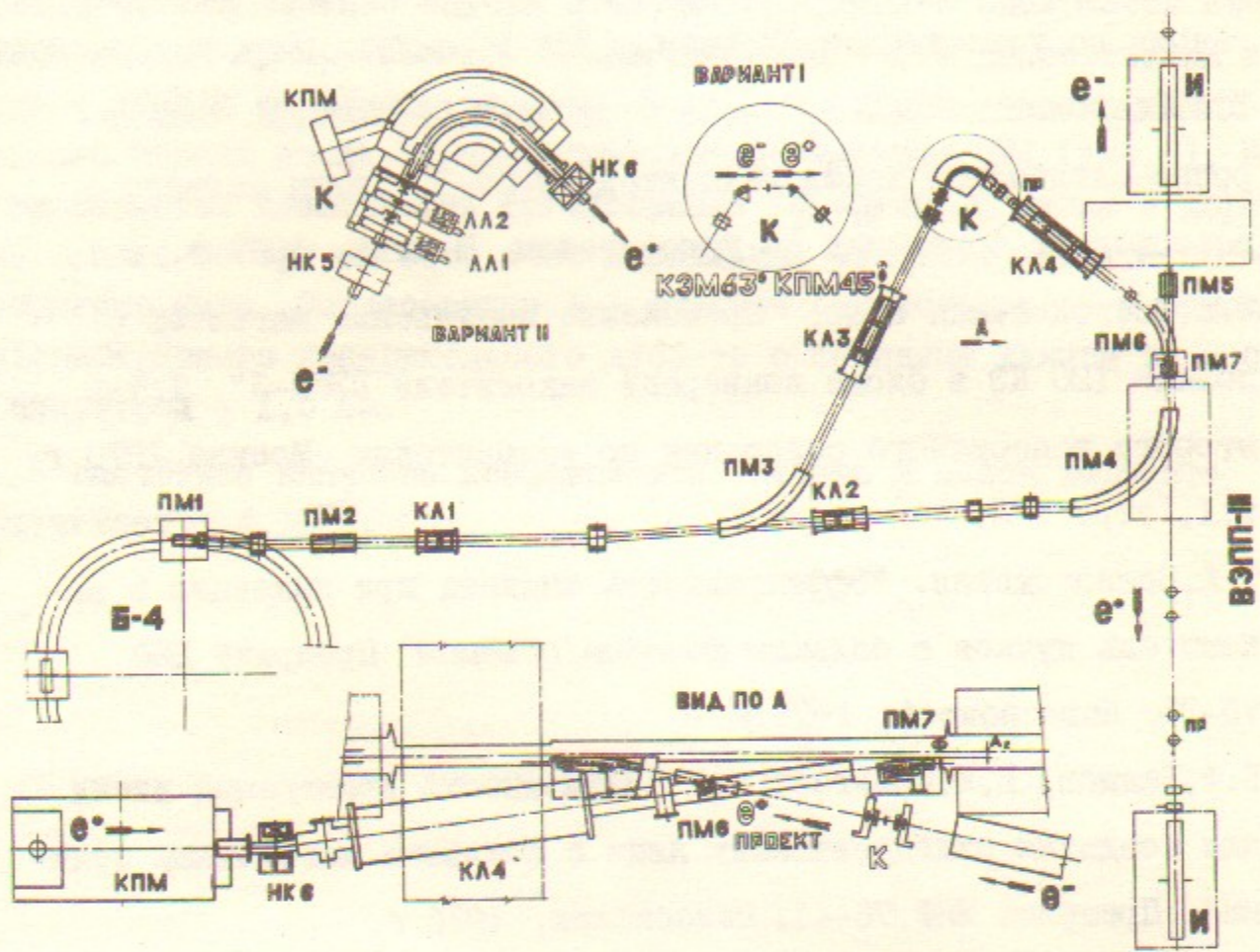
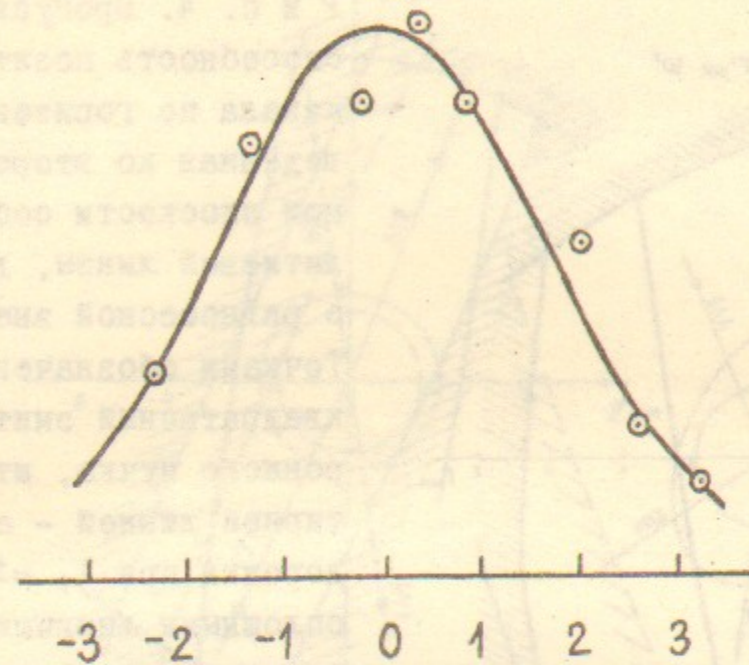
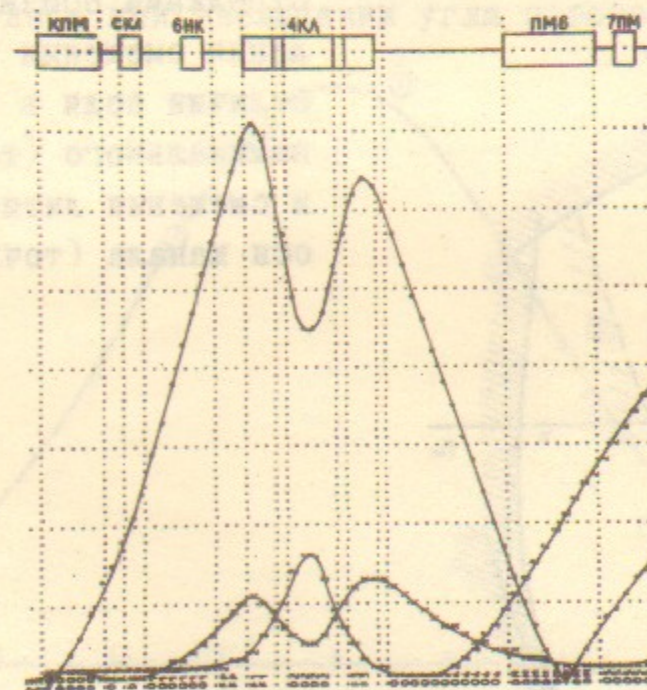


Рис. 1.

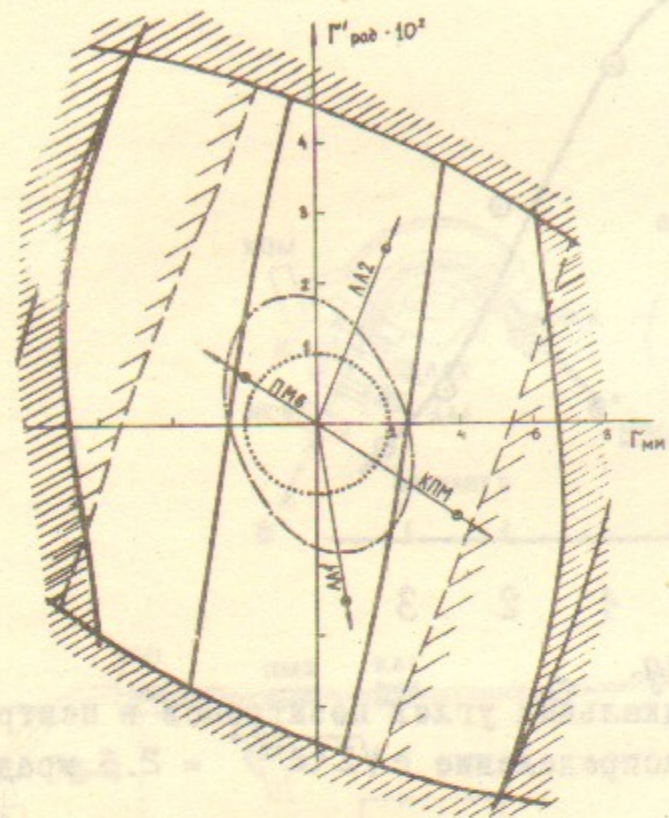
Схема электрон-позитронного канала накопителя ВЭПП-3. Буквами обозначены: ПМ - поворотные магниты, КЛ - квадрупольные линзы, НК - нацеливающие катушки, пр - пробники, И - инфлекторы, К - блок конверсии, КЭМ - светосильный магнит для фокусировки электронов в проектном варианте блока конверсии (вариант I), КЭМ - магнит для фокусировки и энергетической дисперсии позитронов в проектном и настоящем (вариант II) вариантах, ЛЛ1 и ЛЛ2 - фокусирующая и собирающая литиевые линзы.



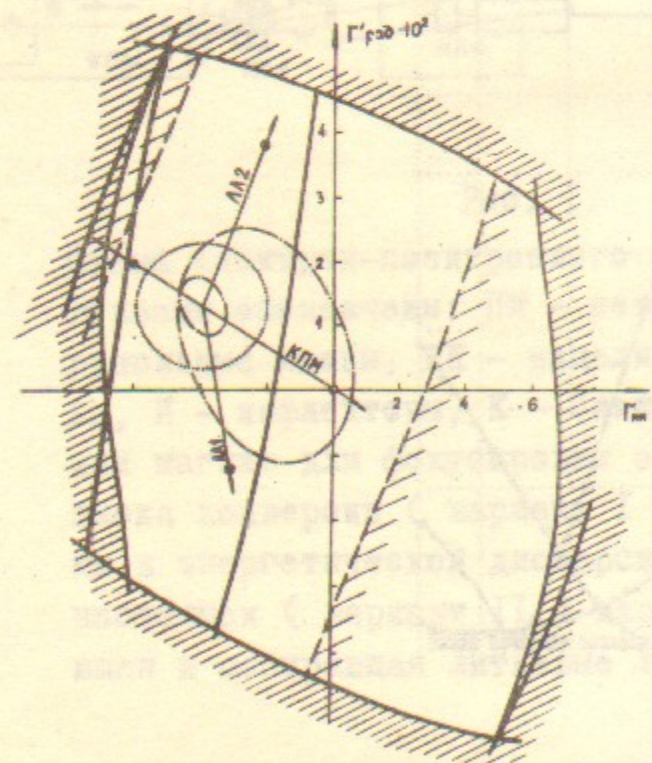
Р и с. 2. Распределение вертикальных углов позитронов в центре ПМ7. Кривая - гауссовское распределение с $\sqrt{2 \langle z'^2 \rangle} = 2.3$ мрад.



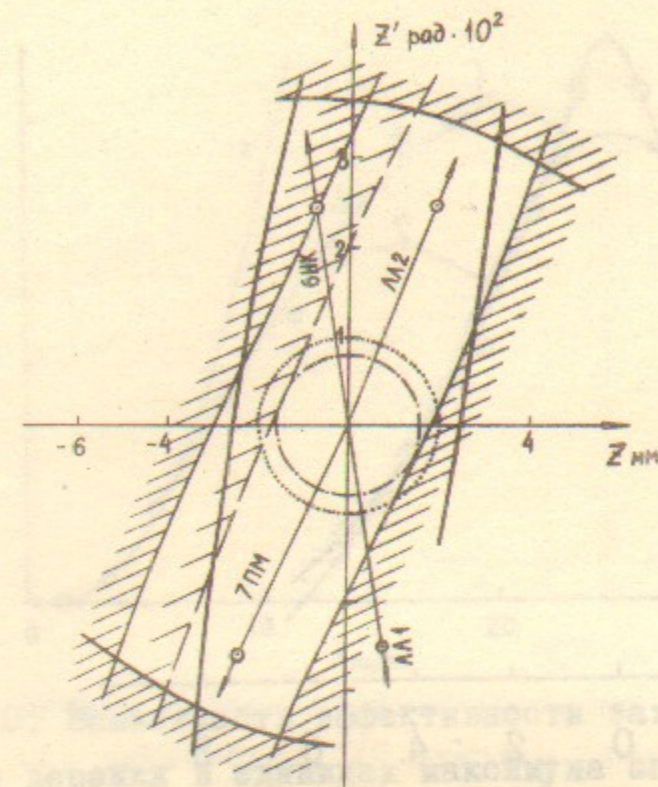
Р и с. 3. $\beta_r - (x)$, $\beta_z - (z)$, $\eta - (*)$ - функции пучка в позитронном канале.



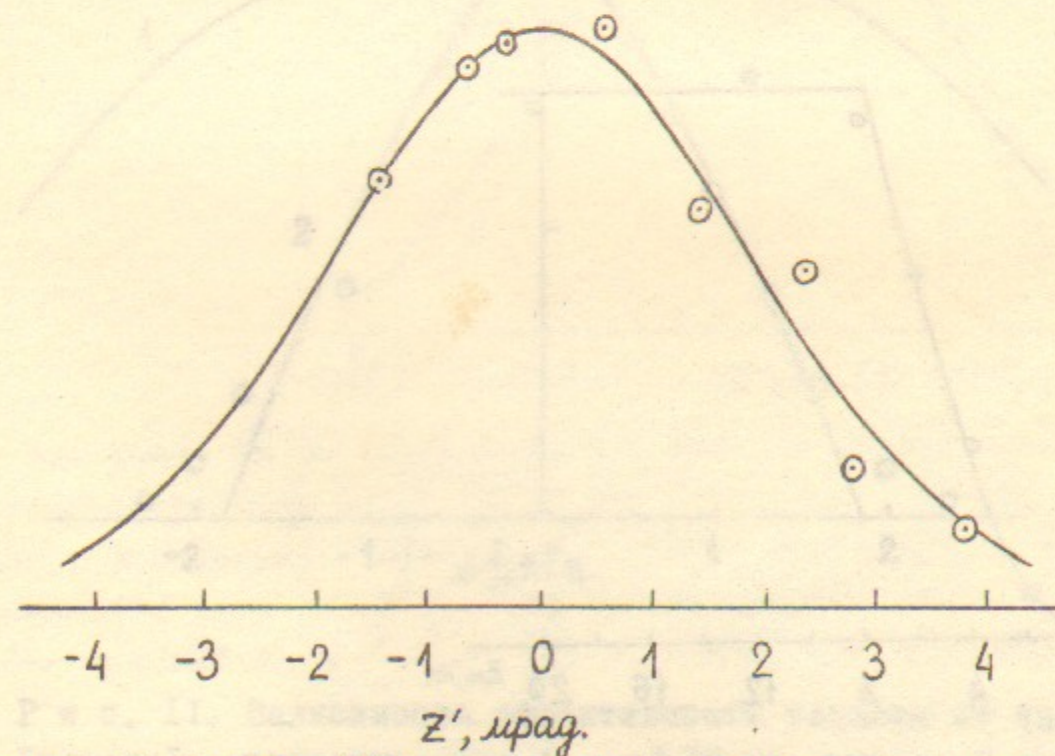
Р и с. 4. Пропускная способность позитронного канала по горизонтали, приведённая ко второй фокальной плоскости собирающей литиевой линзы, для частиц с равновесной энергией. Точками обозначен среднеквадратичный эмитанс позитронного пучка, штрих-пунктирной линией - адмитанс дорожки при $A_r = \pm 15$ мм, сплошными линиями - ограничение пучка в литиевой линзе. Сплошные линии со штриховкой - границы апертур элементов канала, пунктир со штриховкой - элементов дорожки до инфлектора. Стрелками обозначены направления смещения эмитанса при отличии поля в КПМ и ПМ6 от номинального (точка - 1%) и смещении литиевых линз с оси канала (точка - 1 мм).



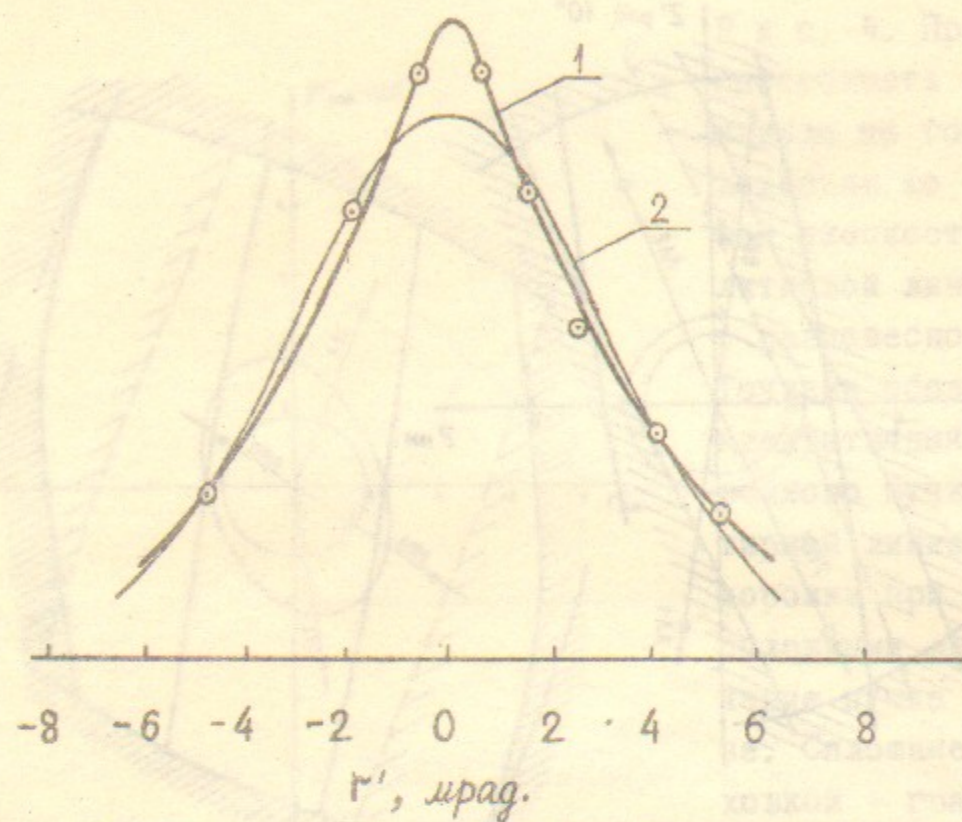
Р и с. 5. То же, что 4 для частиц с $\Delta p/p = 1\%$.



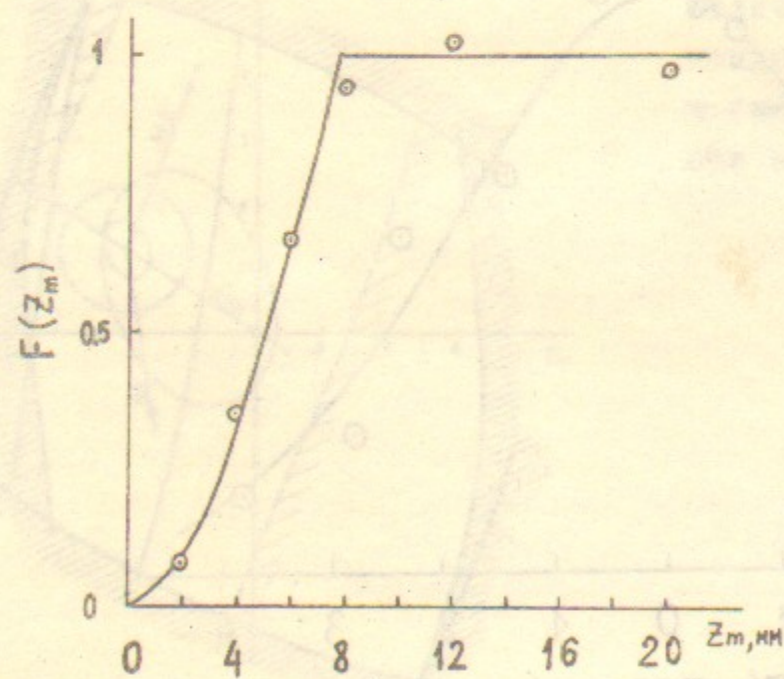
Р и с. 6. Пропускная способность позитронного канала по вертикали. Обозначения те же, что на рис. 4. Адмитанс соответствует $A_z = \pm 8$ мм. Точки на стрелках для ПМ7 и НК6 обозначают положение центра эмитанса при увеличении угла поворота на 5 мрад.



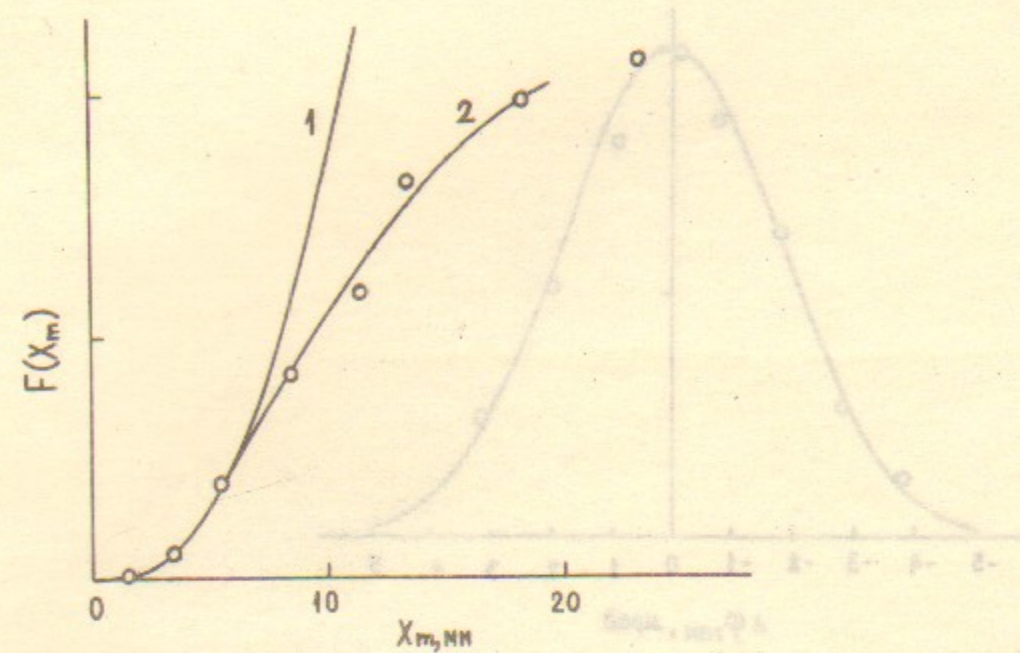
Р и с. 7. Распределение вертикальных углов в позитронном пучке на входе в накопитель (в центре ПМ7). Кривая - гауссовское распределение прожекций с $\sqrt{2\langle Z'^2 \rangle} = 2.7$ мрад.



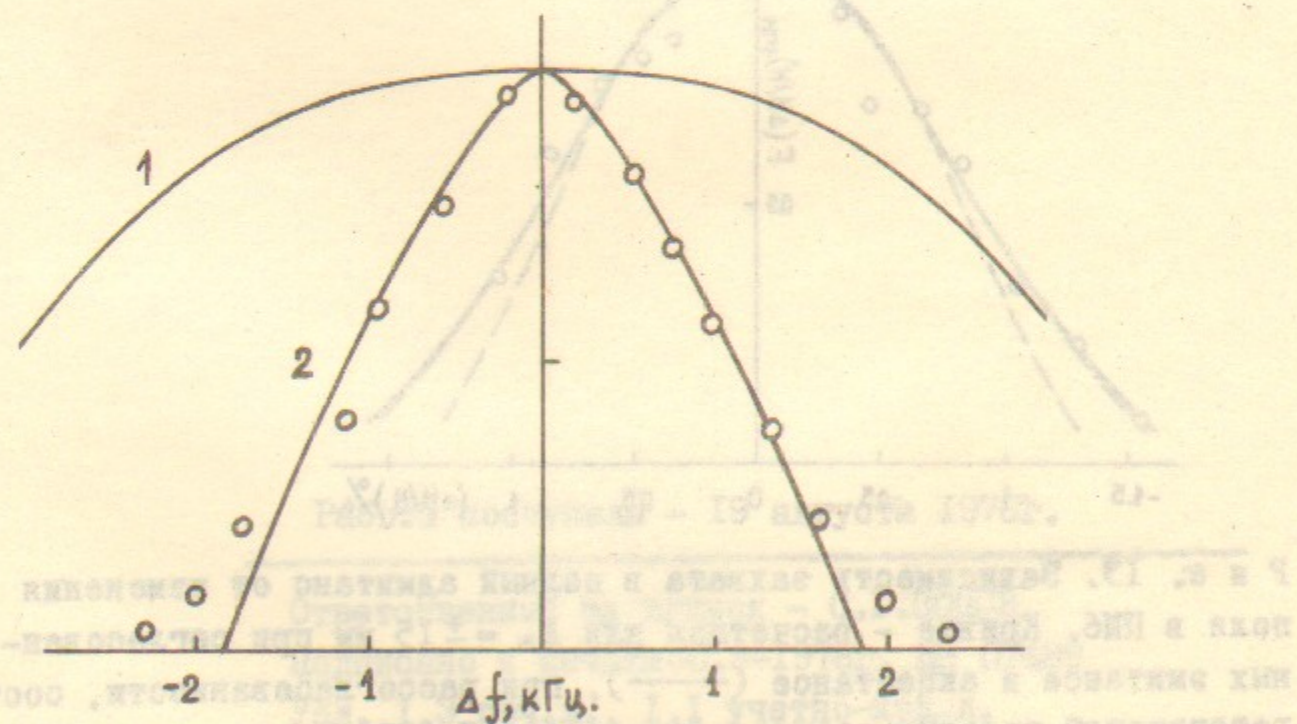
Р и с. 8. Распределение горизонтальных углов позитронов на входе в накопитель (в центре ПМ6). Кривая 1 проведена по экспериментальным точкам произвольно, кривая 2 - интерполяция точек гауссовским распределением проекций, $\sqrt{2\langle r'^2 \rangle} = 4,4$ мрад.



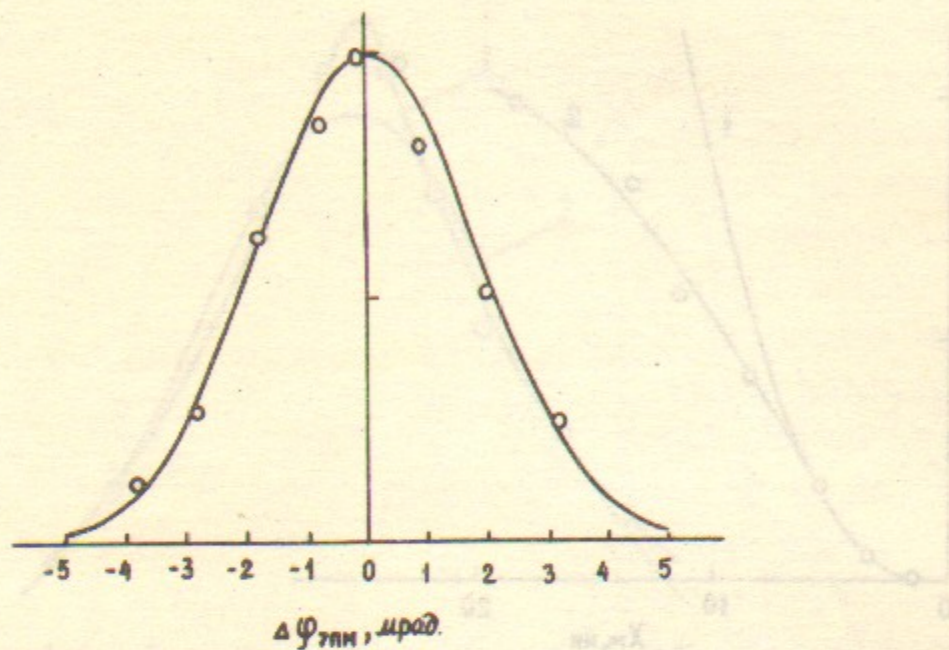
Р и с. 9. Зависимость коэффициента захвата от вертикальной апертуры дорожки в единицах максимума огибающей на кольце. Кривая - расчетная зависимость для $(Z_m)_{max} = 8$ мм.



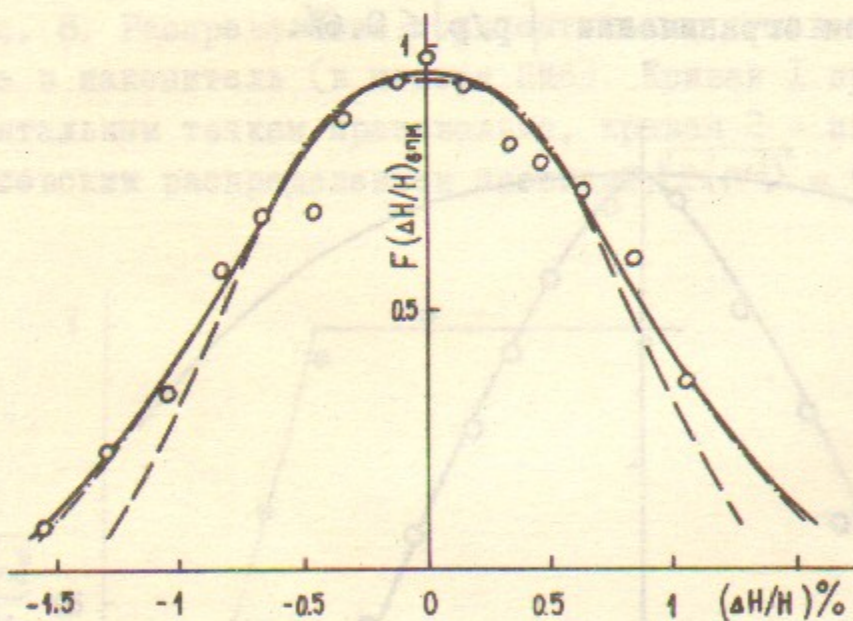
Р и с. 10. Зависимость эффективности захвата от радиальной апертуры дорожки в единицах максимума огибающей на кольце. Кривая 1 - расчетная без ограничения интервала импульсов, 2 - расчетная при ограничении $|p/p| \leq 0,6\%$.



Р и с. 11. Зависимость эффективности захвата от частоты ВЧ. Кривая 1 - расчетная для $A_r = \pm 15$ мм, кривая 2 - то же при ограничении области радиально-фазовых колебаний величиной, соответствующей интервалу импульсов $|\Delta p/p| = 0,6\%$.



Р и с. 12. Зависимость эффективности захвата в полный адмитанс от изменения угла поворота магнита ПМ7, расчетная для $A_2 = \pm 8$ мм (кривая) и экспериментальная (точки).



Р и с. 13. Зависимость захвата в полный адмитанс от изменения поля в ПМ6. Кривые - расчетная для $A_p = \pm 15$ мм при согласованных эмитансе и акцептансе (—), при рассогласованности, соответствующей угловым распределениям рис. 7 и 8, за счет отклонения от номинального напряжения на ЛЛ2 (— · — ·) и на КЛ4 (— —).

Работа поступила - 19 августа 1976г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
 Подписано к печати 30.9-1976г. МН 07489
 Усл. 1,3 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 94.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР