

Министерство общего и профессионального образования

Российской Федерации

Новосибирский Государственный Университет

Физический факультет

Кафедра физики ускорителей

Квалификационная работа

на соискание степени бакалавра

**РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВПУСКНЫХ КАНАЛОВ  
НАКОПИТЕЛЯ-ОХЛАДИТЕЛЯ  
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5**

Астрелина Ксения Витальевна

Научные руководители: Петренко А.В.,

Старостенко А.А.,

Новосибирск 2007

# 1. Введение

## 1.1 Инжекционный комплекс ВЭПП-5

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 (Рис. 1) — это современный источник релятивистских электронов и позитронов, строящийся в Институте ядерной физики для обеспечения работы установок на встречных электрон-позитронных пучках. Основу инжекционного комплекса составляет форинжектор — два линейных ускорителя на энергию 270 МэВ и 510 МэВ, и накопитель-охладитель (см. Рис. 1). Электроны из первого ускорителя после поворота в магнитном поле на  $180^\circ$  попадают на конверсионную мишень и производят позитроны, часть из которых затем ускоряется до 510 МэВ во втором ускорителе. Также предусмотрен режим работы форинжектора, когда ускоряются только электроны. В этом случае отдельные электронные сгустки направляются мимо мишени во второй линейный ускоритель, настроенный так, чтобы ускорять электроны с 270 МэВ до 510 МэВ.

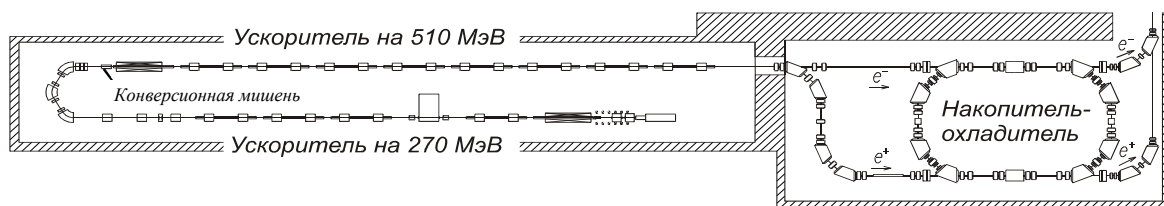


Рис. 1. Инжекционный комплекс ВЭПП-5

Таблица 1. Проектные параметры форинжектора		Таблица 2. Проектные параметры накопителя-охладителя	
Конечная энергия пучков	510 МэВ	Энергия пучков	510 МэВ
Число электронов в импульсе	$2 \cdot 10^{10}$	Периметр	2740 см
Число позитронов в импульсе	$5 \cdot 10^8$	Частота ВЧ	700 МГц
Частота повторения импульсов	50 Гц.	Время радиационного затухания	18 мсек ( $\tau$ )
Энергетический разброс:		Выходные параметры пучков:	
электронного пучка	$\pm 1 \%$	число $e^+$ или $e^-$	$2 \cdot 10^{10}$
позитронного пучка	$\pm 3 \%$	энергетический разброс	$\pm 0,07 \%$
Эмиттанс:		продольный размер	4 мм ( $\sigma_z$ )
электронного пучка	$\sim 10^{-5}$ рад·см	горизонтальный эмиттанс	$2,3 \cdot 10^{-6}$ рад·см
позитронного пучка	$\sim 10^{-4}$ рад·см	вертикальный эмиттанс	$0,5 \cdot 10^{-6}$ рад·см
Рабочая частота ВЧ	2856 МГц	Адмитансы:	
Импульсная мощность клистрона	$\approx 60$ МВт	$A_x$	$10^{-2}$ рад·см
Количество клистронов	4 шт.	$A_z$	$4 \cdot 10^{-3}$ рад·см
Полная потребляемая мощность	600 кВт	Ширина сепаратрисы ( $\Delta E/E$ )	0,024
		Полная потребляемая мощность	800 кВт

Помимо линейных ускорителей в состав инжекционного комплекса входит циклический накопитель-охладитель частиц. После линейного ускорителя электронные, либо позитронные пучки инжектируются в накопитель, где они движутся в магнитном

поле по замкнутой траектории. Через определенное количество оборотов к циркулирующему сгустку добавляется очередная порция частиц из линейного ускорителя. После набора необходимого количества частиц, пучок выпускается потребителям. Для накопления нужного числа позитронов требуется около 100 инъекций в накопитель, а для электронов достаточно однократной инъекции. Одновременное накопление обоих сортов частиц, вращающихся в противоположные стороны, конструкцией накопителя не предусмотрено.

Двигаясь в поле поворотных магнитов накопителя, заряженная частица излучает синхротронное излучение. Средние потери энергии частиц на излучение в накопителе компенсируются ускоряющим ВЧ-резонатором, работающим на частоте, кратной частоте обращения пучка по равновесной орбите. Под действием силы реакции излучения амплитуда колебаний частиц относительно равновесной орбиты постепенно затухает [3]. При этом в сопровождающей системе, движущейся со средней скоростью пучка, хаотическая скорость частиц уменьшается, иначе говоря, пучок «охлаждается». Для накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 время радиационного затухания приблизительно равно 20 мсек, что соответствует  $2 \cdot 10^5$  оборотам пучка. Равновесный фазовый объем пучка в накопителе определяется квантовыми флуктуациями синхротронного излучения. Рабочая энергия накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 выбрана равной 510 МэВ с тем расчетом, чтобы выпускаемые из него пучки можно было бы без дополнительного ускорения использовать для рождения  $\varphi$ -мезонов с массой  $1019 \text{ МэВ}/c^2$ [1].

## 1.2. Производство позитронов

Позитроны производятся в конверсионной мишени. В качестве материала мишени выбран тантал (радиационная длина  $X_0 = 4 \text{ мм}$ , длина мишени –  $2.5X_0$ ). Электронный пучок фокусируется на мишени и генерирует электромагнитный ливень. Рожденные в ливне позитроны выходят из мишени с большим угловым и энергетическим разбросом, поэтому лишь небольшую часть (обычно  $< 10 \%$ ) этих частиц удастся сфокусировать и ускорить во втором линейном ускорителе. Сбор позитронов осуществляется с помощью согласующего устройства на основе концентратора магнитного потока. Кроме того, для увеличения доли захватываемых частиц первая ускоряющая секция помещена в сопровождающее магнитное поле и имеет повышенный темп ускорения до  $25 \text{ МэВ/м}$ . Остальные ускоряющие секции имеют темп ускорения  $18 \text{ МэВ/м}$ .

### 1.3. Постановка задачи

В данной работе исследуется транспортировка электронных и позитронных пучков по 510 МэВ-ному ускорителю, начиная от конверсионной мишени, и инжекция этих пучков в накопитель. Целью работы является определение настройки впускных каналов накопителя-охлаждителя, позволяющей свести к минимуму потери частиц при транспортировке и инжекции.

Задачу можно разделить на два этапа. Первый – определение силы тока квадрупольных линз в линейном ускорителе и инжекционных каналах для их согласования с кольцом накопителя-охлаждителя. Второй этап – настройка собственно узла инжекции для помещения инжектируемого пучка на устойчивую орбиту в накопителе. Вместе с настройкой системы должен быть проведен анализ потерь частиц во впускных каналах и накопителе и возможности их минимизации.

Расчеты должны быть проведены для позитронов и для электронов. В режиме, когда комплекс производит поочередно электронные и позитронные пучки, важно впустить на замкнутую орбиту накопителя как можно больше позитронов, рожденных в конверсионной мишени – из-за малого количества частиц в ускоряемом позитронном пучке. Если не будет возможности согласовать транспортные каналы для обоих пучков одновременно, то основные усилия необходимо сосредоточить именно на согласовании позитронного канала.

Интересен вопрос о предельных возможностях впускной системы в накопитель-охлаждитель. Зная, какой максимальный фазовый объем может занимать пучок, захватываемый в накопитель на устойчивую орбиту в существующей впускной системе, можно исследовать возможности увеличения производительности комплекса за счет усовершенствования установки, например, удлинения соленоида конверсионной системы или уменьшения расстояния между квадрупольными линзами в нем, и, как следствие, увеличения коэффициента захвата позитронов в линейный ускоритель.

В результате должны быть определены наиболее выгодные настройки транспортных и инжекционных каналов для всех режимов работы установки, произведены анализ и оценка суммарных потерь в пучках при инжекции в накопитель, а также оценены предельные возможности впускной системы.

## 2. Инжекция в циклический ускоритель

В ускорительной технике часто возникает необходимость многократной инжекции в циклический ускоритель для накопления в нем частиц. Основная задача при инжекции – добиться минимальной величины потерь в инжектируемом пучке и сохранения уже накопленного пучка.

При рассмотрении вопроса об инжекции с общей, теоретической точки зрения можно отчасти опираться на известную в механике теорему Пуанкаре. Согласно ей, траектория, описываемая в фазовом пространстве точкой, представляющей систему, имеет квазипериодический характер в том смысле, что через конечный промежуток времени система возвратится в первоначальное состояние с любой степенью точности. Применительно к инжекции в кольцевой ускоритель это означает, что частицы, впущенные в постоянное во времени поле, через некоторое число оборотов обязательно вернутся к инжектору или впускному устройству и погибнут из-за соударения с ним. Поэтому для окончательного захвата частиц на орбиты необходимо каким-то образом изменить во времени условия движения либо за счет изменения направляющего магнитного поля, либо за счет изменения электрического впускного поля [3].

Для стандартных способов инжекции используют септум-элементы и быстродействующее отклоняющее устройство - кикер.

Два основных вида инжекции – однооборотная и многооборотная. При однооборотной инжекции пучок запускается на равновесную орбиту в кольце ускорителя за время меньшее, чем период оборота частиц. Затем впускное отклоняющее устройство отключается, и частицы, сделавшие один оборот в кольце, оказываются уже около равновесной орбиты. При этом почти не происходит потерь в пучке, а уменьшение эмиттанса должно быть очень малым, связанным только с погрешностями при транспортировке пучка.

В бетатронах, синхротронах, слабофокусирующих синхрофазотронах применяется многооборотная инжекция, при которой впуск длится в течение времени, соответствующего, например, десяткам оборотов частиц, и, как правило, сопровождается значительными потерями частиц пучка.

Для осуществления однооборотной инжекции пучка необходимо, чтобы кольцо ускорителя и впускной канал были согласованы. Это означает, что бетатронные функции  $\alpha$  и  $\beta$ , и дисперсионные функции  $\eta$  впускного канала на выходе из септума должны

совпадать с бетатронными и дисперсионными функциями кольца в этой же точке, т.е.:

$$\begin{aligned} \beta_{x,y}^{(i)} &= \beta_{x,y}^{(circle)} & \eta_{x,y}^{(i)} &= \eta_{x,y}^{(circle)} \\ \alpha_{x,y}^{(i)} &= \alpha_{x,y}^{(circle)} & \eta_{x,y}'^{(i)} &= \eta_{x,y}'^{(circle)} \end{aligned} \quad (1)$$

Кроме того, область в поперечном фазовом пространстве, занимаемая пучком, должна аппроксимироваться эллипсом, определяемым бетатронными функциями:

$$x^2 + (\alpha_x x + \beta_x x')^2 = \beta_x \varepsilon_x \quad (2)$$

$$y^2 + (\alpha_y y + \beta_y y')^2 = \beta_y \varepsilon_y \quad (2')$$

Для горизонтальной однооборотной инжекции пучка центр инжектируемого пучка должен находиться на расстоянии  $X$  от центра апертуры вакуумной камеры циклического ускорителя:

$$X = \sqrt{\beta_x} (\sqrt{\varepsilon_i} + \sqrt{\varepsilon_x}) + \eta_x \left( \left( \frac{\Delta p}{p} \right)_i + \left( \frac{\Delta p}{p} \right)_x \right) + x_{co} + x_s, \quad (3)$$

где  $\pi\varepsilon_x$   $\pi\varepsilon_i$  - горизонтальные эмиттансы накопленного и инжектируемого пучка соответственно,  $\Delta p/p$  - энергетический разброс пучка,  $x_{co}$  - допустимые отклонения от замкнутой орбиты кольца,  $x_s$  - эффективная толщина перегородки септума.

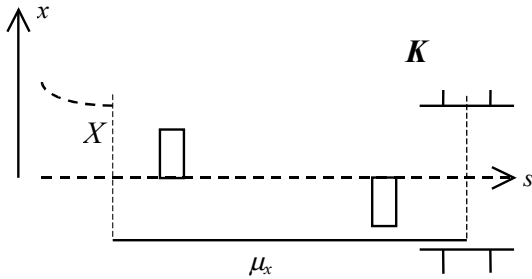


Рис. 2. Горизонтальная инжекция

Рассмотрим горизонтальную инжекцию на равновесную орбиту (Рис. 2). Кикер расположен после септума с фазовым сдвигом  $\mu_x$ . Инжектируемый пучок должен сместиться к центру апертуры к моменту достижения кикера и для этого угол пучка на выходе септума должен

быть: 
$$x' = -(\alpha_x + ctg \mu_x) \frac{X}{\beta_x} \quad (4)$$

Угловое отклонение, которое кикер должен сообщить пучку, чтобы поместить его на

центральную равновесную орбиту: 
$$\theta = \frac{X}{\sqrt{\beta_x \beta_x}}, \quad (5)$$

где  $\overline{\beta_x}$  - бета-функция в месте расположения кикера [5]

### 3. Схема системы инжекции

Транспортировка пучков из линейного ускорителя к накопителю-охладителю комплекса ВЭПП-5 осуществляется по двум несимметричным электронно-оптическим каналам (Рис.3). Электронный и позитронный пучки инжектируются в накопитель-охладитель в противоположных линейных промежутках и обращаются в кольце в противоположных направлениях. Инжекция в накопитель осуществляется с помощью вертикального впускного септум-магнита с постоянным магнитным полем. Для уменьшения энергетического разброса  $\sigma_E$  позитронного пучка, инжектируемого из линейного ускорителя, предполагается использовать специальную систему - дебанчер-монохроматор.

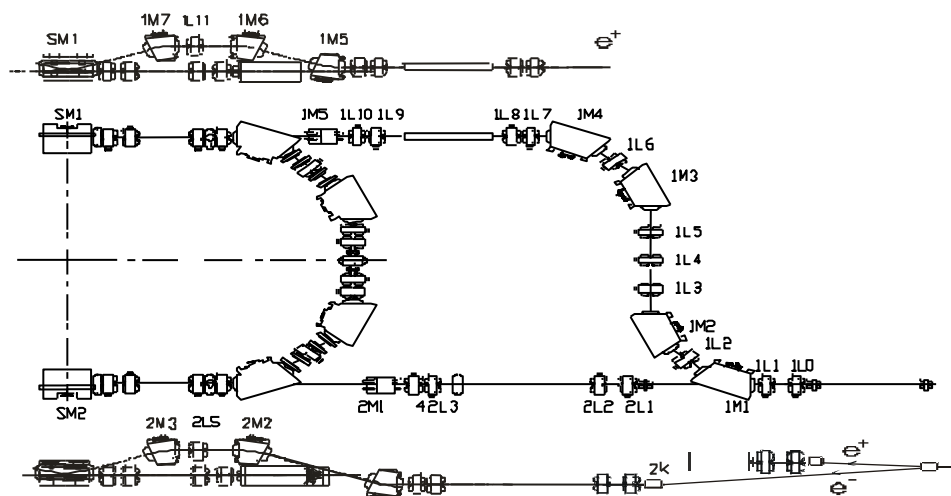


Рис 3. Инжекционные каналы

С помощью магнита-сепаратора производится разделение электронов и позитронов по впускным каналам. Перенос пучков в плоскость накопителя производится с помощью вертикальных  $20^\circ$  поворотных магнитов.

Система дебанчера-монохроматора в позитронном канале инжекции включает в себя ахроматический параллельный перенос на четырех  $45^\circ$  горизонтальных поворотных магнитах и специальную ускоряющую секцию.

Согласование впускных каналов с линейным ускорителем и накопителем-охладителем производится с помощью квадрупольных линз.

Допустимый энергетический разброс пучка в накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 на энергии 510 МэВ составляет  $\Delta E/E_0 = \pm 0,012$  [2].

Энергетический разброс позитронного пучка, приобретаемый им в конце линейного

ускорителя, определяется соотношением длины пучка и длины волны ускоряющего ВЧ-поля. Этот энергетический разброс значительно больше предельно допустимого разброса для накопителя, поэтому перед инъекцией позитронов в накопитель производится дополнительное согласование с помощью дебанчера-монохроматора. Это устройство осуществляет «поворот» позитронного пучка в плоскости  $E - s$  (энергия — продольная координата), уменьшая, таким образом, энергетический разброс за счет увеличения продольного размера пучка.

В нашем случае (Рис. 4), 4 магнита параллельного переноса трансформируют пучок таким образом, что частицы с большей энергией, проходящие в магнитах больший путь, оказываются в хвосте пучка, а частицы с меньшей энергией оказываются в голове пучка. В итоге пучок удлиняется на величину, пропорциональную своему энергетическому разбросу. Пропустив полученный пучок далее через ускоряющую структуру в правильной фазе ВЧполя, можно частично скомпенсировать исходный энергетический разброс, сообщив головным и хвостовым частицам разные добавки к энергии.

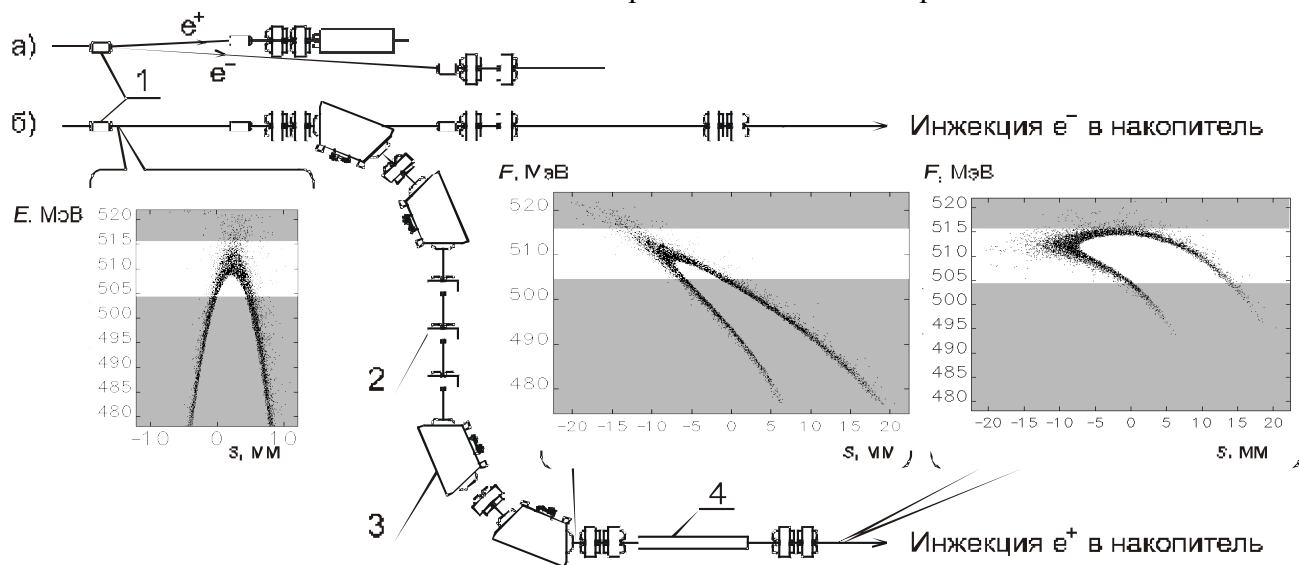


Рис. 4. а) Схема разделения позитронов и электронов перед инъекцией в накопитель-охладитель (вид сбоку). б) Схема дебанчера-монохроматора позитронного пучка (вид сверху). 1 — дипольный магнит, разделяющий электроны и позитроны в вертикальной плоскости; 2 — квадрупольная линза; 3 — поворотный магнит; 4 — ускоряющая структура. На вставках показаны портреты позитронного пучка на плоскости  $E - s$  (энергия — продольная координата) в различных точках канала. Белой полосой на графиках обозначен энергетический акцептанс накопителя-охладителя

Для впуска как электронного, так и позитронного пучка, непосредственно в накопитель используется вертикальный септум-магнит с постоянным полем и пара кикеров-инфлекторов.



Схема инъекции – однооборотная с предударом (Рис. 5). Инжекция осуществляется по вертикали с предударом накопленного пучка по горизонтали. Инжектируемый пучок приводится септум-магнитом в медианную плоскость накопителя. Накопленный пучок сдвигается на край апертюры ударом прединфлектора (1) и подводится к ножу септум-магнита. После удара инфлектора (2) оба пучка смещаются к центру вакуумной камеры накопителя (3). Остаточные радиальные колебания затухают из-за радиационного трения.

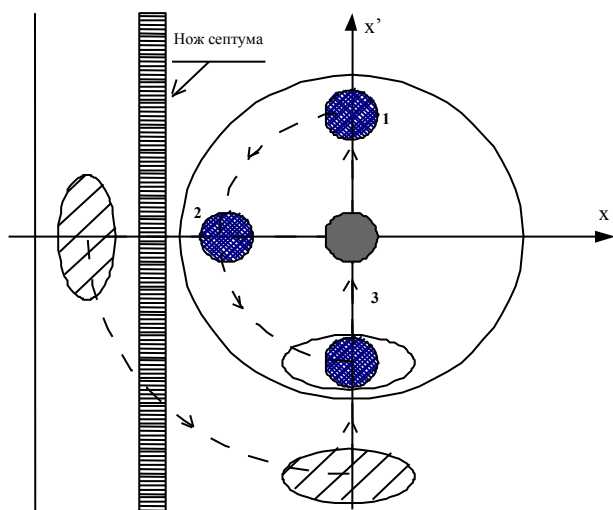


Рис. 5. Движение пучков при инъекции

Вертикальная схема инъекции с горизонтальным ударом кикера позволяет значительно уменьшить вертикальную апертюру вакуумной камеры магнитов накопителя по сравнению со схемой, использующей вертикальный удар по пучку. К тому же, благодаря занулению горизонтальной дисперсионной функции в прямых участках накопителя не происходит увеличения размеров пучка, и соответственно, зазора между пластинами кикеров из-за энергетического разброса в сгустке [2].

#### 4. Методика расчета

Для расчета параметров канала применялось компьютерное моделирование с использованием программы ELEGANT [6], используемой для расчета оптических функций и характеристик пучка. Программа позволяет проводить расчет и оптимизацию функций электронно-оптического канала, проводить трекинг пучка частиц с расчетом потерь на границах апертуры. Электронно-оптические элементы транспортных каналов моделируются в программе матрицами второго порядка

Для согласования использовалась процедура оптимизации с варьированием величины силы линз в заданных пределах. Процедура основана на минимизации целевой функции, величина которой зависит от градиентов в линзах, определяющих оптические и дисперсионные функции в каналах. В нашем случае в качестве слагаемых целевой функции можно выбрать граничные условия для бета-функций и дисперсии в точке инжекции (разницу между имеющимися и желаемыми значениями функций):  $F = \sum F_i$  – оптимизационная функция

$F_{1,2} = (\beta_{x,y} - \beta_{x,y}^0)^2$   
 $F_{3,4} = (\eta_{x,y} - \eta_{x,y}^0)^2$  где  $\beta_{x,y}^0$  и  $\eta_{x,y}^0$  - значения бета-функций и дисперсий накопителя в точке инжекции,

и ограничения по их максимумам на всей длине канала:

$$F = \begin{cases} (\max \beta_{x,y}(s) - \beta_{x,y \max})^2, & \text{при } \max \beta_{x,y}(s) > \beta_{x,y \max} \\ 0, & \text{при } \max \beta_{x,y}(s) < \beta_{x,y \max} \end{cases}, \quad \text{где } \beta_{x,y \max} - \text{установленное}$$

ограничение на максимум бета-функции.

Стоит отметить, что процесс оптимизации идет гораздо быстрее и эффективнее, если выбрать в качестве целевой функции сумму нескольких оптимизационных членов и использовать процедуру их автоматической балансировки. При таком подходе весовые коэффициенты слагаемых подбираются такими, чтобы вклад каждого из оптимизационных членов в целевую функцию был одинаков.

Пример: Необходимо минимизировать функции  $C$  и  $D$ , причем  $C$  превышает  $D$  на несколько порядков ( $C \sim D \cdot 10^N$ ), а минимальность обеих функций имеет значение для поставленной задачи. При оптимизации функции  $C + D$  уменьшение величины  $C$  может привести к существенному росту величины  $D$ . А при оптимизации функции  $C + D \cdot 10^N$ , где слагаемые одного порядка, обе функции будут уменьшаться с одинаковой скоростью, что ускорит сходимость процесса оптимизации.

## 5. Результаты оптимизации

### 5.1. Инжекция позитронов

Возможны два варианта инжекции электронов и позитронов в накопитель-охладитель – в зависимости от направления, в котором частицы будут обращаться по кольцу. Необходимо рассмотреть оба варианта и выбрать наиболее подходящий из них.

Рассмотрим результаты моделирования и согласования канала линейного ускорителя и впуска для позитронов. Параметры позитронного пучка в конце соленоида – начальной точке расчета – известны из предыдущих экспериментов. Пучок с эмиттансом  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-5}$  рад·м имеет энергию 68 МэВ [2].

Структура моделируемого канала линейного ускорителя несколько отличается от реальной установки, потому что программа Elegant не позволяет моделировать на одном и том же участке одновременно ускорение и квадрупольную фокусировку. При сохранении расположения в канале и размеров квадрупольных линз, ускоряющие структуры смоделированы так, чтобы обеспечивать необходимый набор энергии на всем протяжении ускорителя (Рис.6).

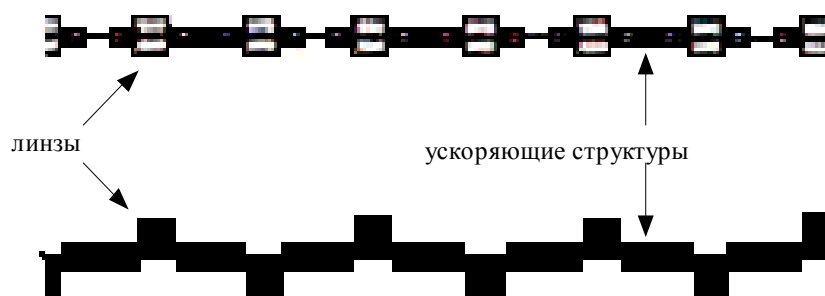


Рис.6. Линейный ускоритель и моделирующая его структура.

На Рис.7 показаны бета-функции линейного ускорителя для позитронного пучка [1]. В нижней части графиков изображена структура позитронного ускорителя от соленоида до начала впускного канала. Квадратами показаны квадрупольные линзы, а прямоугольниками между ними - ускоряющие структуры.

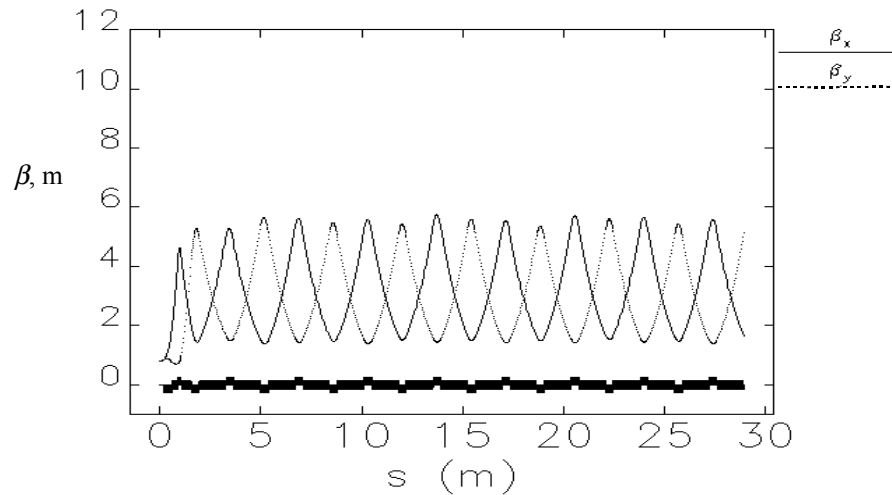


Рис. 7. Бета-функции в линейном ускорителе

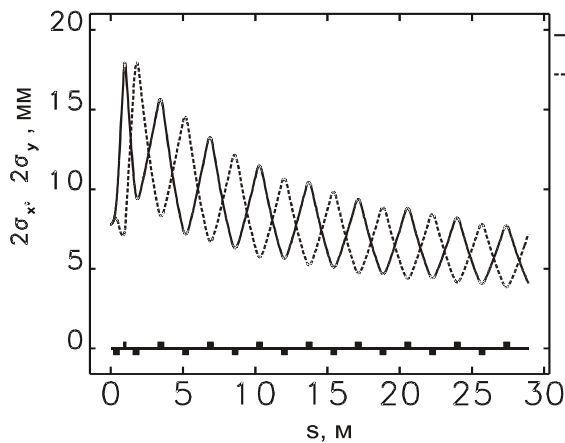


Рис. 8. Минимизированные поперечные размеры пучка позитронов в линейном ускорителе инжекционного комплекса (без учета ограничения по апертуре вакуумной камеры)

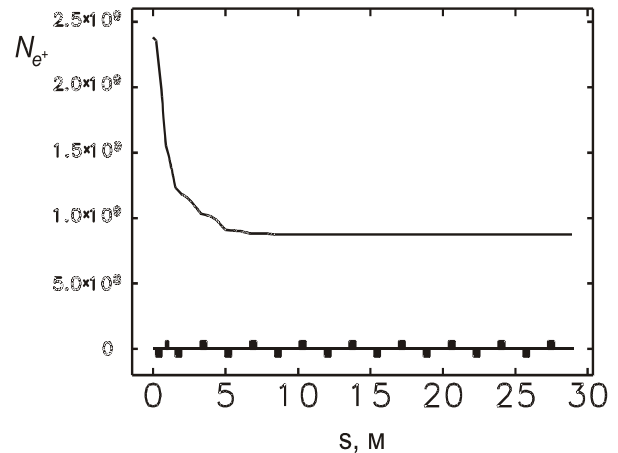


Рис. 9. Количество позитронов в зависимости от положения пучка вдоль линейного ускорителя инжекционного комплекса (от соленоида конверсионной системы до впускных каналов накопителя-охлаждителя)

Большой поперечный размер пучка, и соответственно, апертурные потери (Рис.8 и 9) в начале ускорителя связаны с большим угловым разбросом позитронов и малой энергией пучка.

При оптимизации системы выяснилось, что согласование впускных каналов удобно проводить в обратном направлении – от точки инъекции в конце септума к линейному ускорителю, задавая в качестве начальных условий значения оптических функций в точке инъекции. Тогда для согласования впускного канала и линейного ускорителя достаточно изменять параметры нескольких линз в конце линейного ускорителя. Благодаря тому, что

в конце ускорителя дисперсия нулевая, а значения бета-функций не превышают 10 м, и не заданы жестко, как в точке инжекции, оптимизация каналов упрощается.

При расчете кроме граничных условий и максимальных значений для дисперсии и бета-функций во впускном позитронном канале также минимизировались бета-функции на участке, где расположена ускоряющая структура дебанчера-монохроматора. Из-за малой апертуры ускоряющей секции требовалось уменьшить поперечные размеры пучка в ней. Результаты оптимизации показаны на Рис.10 и 11:

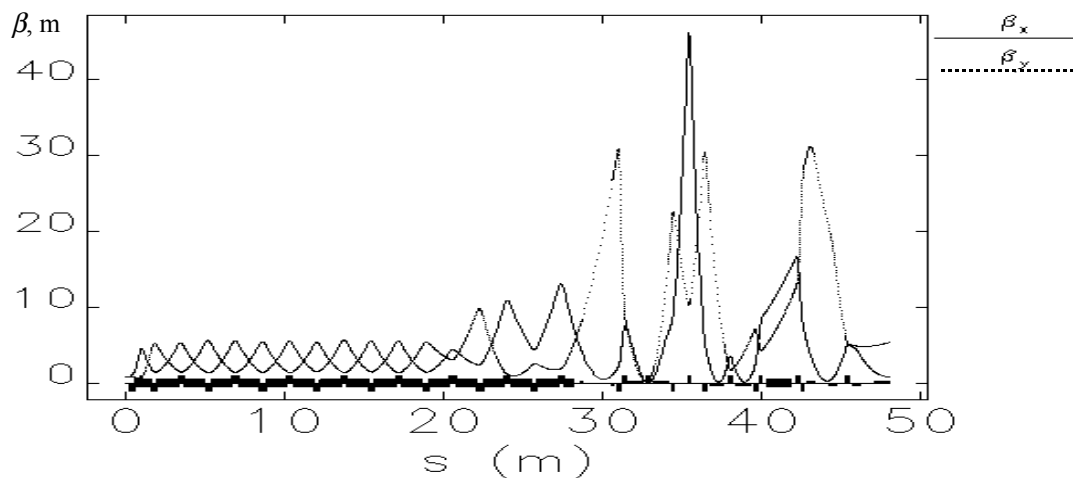


Рис.10. Бета-функции в линейном ускорителе и позитронном впускном канале

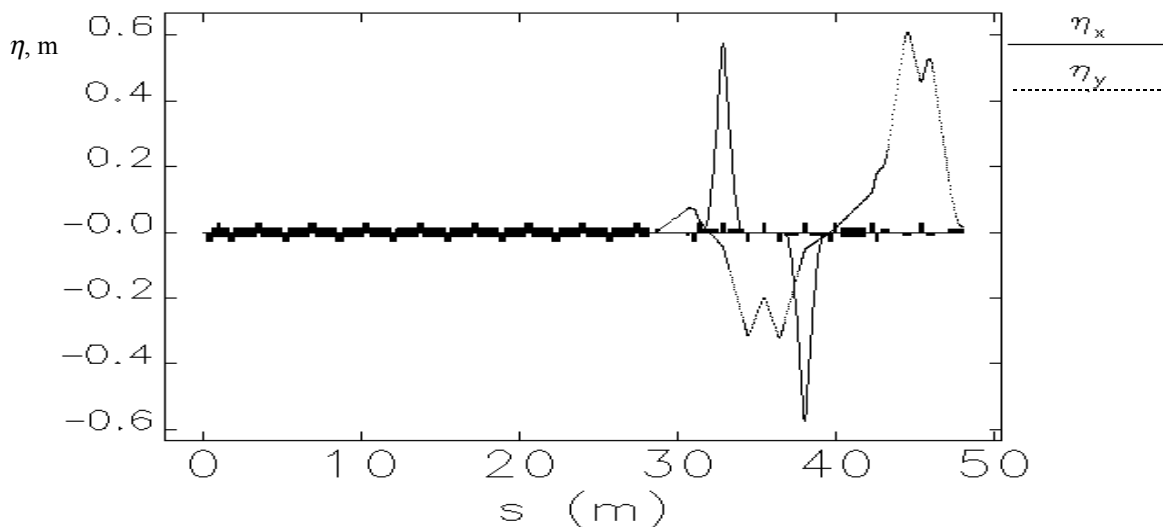


Рис.11. Дисперсия в конце линейного ускорителя и позитронном впускном канале

Апертурные потери (Рис.12а, сплошная линия) на участке линейного ускорителя и впускных каналов после оптимизации составили 33.4% от числа частиц, захваченных в

линейный ускоритель. Значительная часть этих потерь во впускном канале неизбежна из-за конструкции установки. В поворотных магнитах параллельного переноса происходит рост горизонтальной дисперсии, и, соответственно, увеличивается поперечный размер пучка  $\sigma$ :

$$\sigma = \sigma_D + \sigma_\beta$$

$$\sigma_D = \eta_x \frac{\Delta p}{p} \approx 0.6 \cdot \frac{20}{500} = 0.024 \text{ м}$$

$$\sigma_\beta = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} \approx 0.006 \text{ м} \quad \text{- дисперсионный и бетатронный поперечные размеры пучка}$$

соответственно, в точке с максимальной горизонтальной дисперсией.

Полный поперечный размер пучка  $2\sigma = 6 \text{ см}$  при апертуре вакуумной камеры  $d = 5 \text{ см}$ .

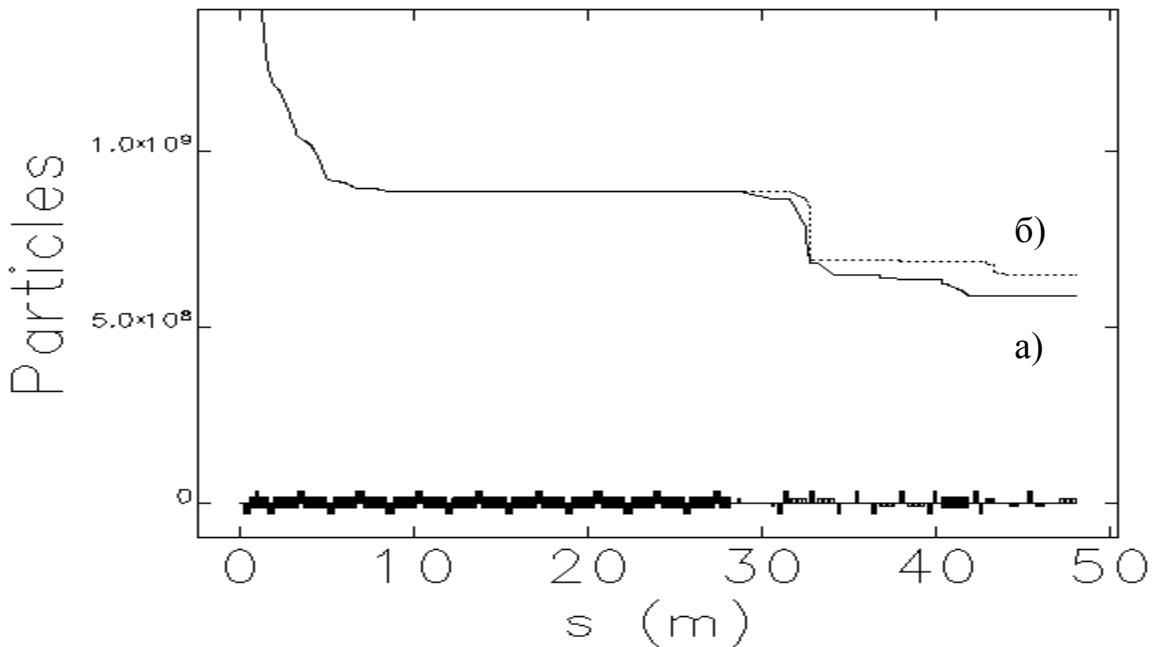


Рис.12. Изменение числа частиц в позитронном пучке  
а) полные потери на апертуре, б) потери из-за роста дисперсии

В результате в квадрупольных линзах, расположенных между поворотными магнитами, где дисперсионная функция достигает максимума, (линзы 1L2 и 1L6) часть частиц теряется. Чтобы оценить величину этих потерь, можно провести трекинг пучка и установить в нем ограничения по апертуре только в тех участках канала, где дисперсия ненулевая. Из приведенных выше расчетов бета-функций видно, что вклад от бетатронного размера пучка в этих участках заметно меньше, чем от дисперсионного. Поэтому можно пренебречь потерями, связанными с ростом бета-функций, и считать, что все потери происходят только из-за большого значения дисперсионной функции (Рис. 12б,

пунктирная линия). Величина этих потерь составляет 27% от числа позитронов, захваченных в линейный ускоритель.

## 5.2. Другие варианты инъекции позитронов

Для определения способа инъекции, оптимального по эффективности и по затратам на организацию, также исследовались и другие варианты инъекции позитронов - при отсутствии ускоряющей секции в позитронном впускном канале и при инъекции позитронов по прямому (электронному) каналу.

### А. Инъекция по позитронному каналу без ускоряющей секции.

Если в позитронном канале нет ускоряющей секции, то при оптимизации снимается ряд ограничений, например, на малость бета-функций на этом участке, а при трекинге – ограничения по апертуре (диаметр вакуумной камеры в секции  $d_{sec}=20$  мм, камеры без секции  $d_c=50$  мм). Потери пучка до точки инъекции в накопитель составляют 32%.

Однако, в результате того, что без ускоряющей секции не будет происходить уменьшения энергетического разброса в инжектируемом пучке, в накопитель будет захвачено меньшее число частиц. Из расчета  $\Delta p/p=0.012$  [2], в накопитель будет захвачено 42% частиц от числа прошедших по линейному ускорителю (а при наличии ускоряющей секции в канале – захват составляет 62%).

### Б. Инъекция по прямому каналу.

Еще один вариант – инъекция позитронов не по каналу с поворотом, а по прямому каналу. Недостаточное число изменяемых параметров впускного канала (5 квадрупольных линз для 6 оптимизационных членов) приводит к росту максимальных значений бета-функций в конце линейного ускорителя, и как следствие, потерь частиц в пучке.

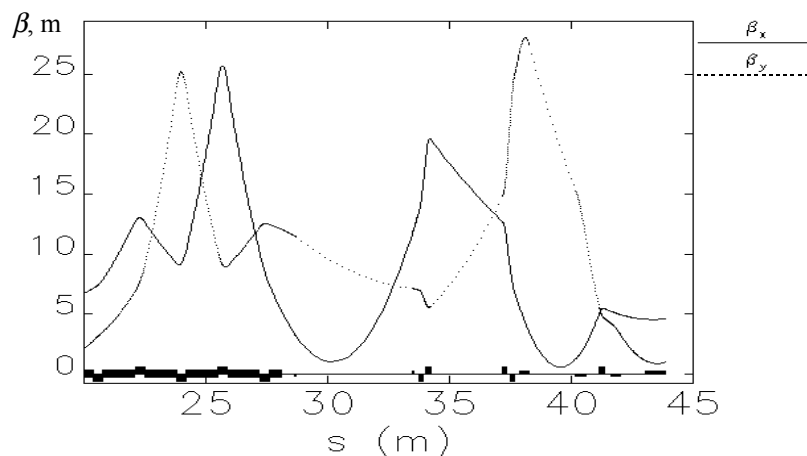


Рис.13. Бета-функции в конце ускорителя и прямом канале инъекции для позитронов

Число потерь до точки инжекции составляет 30%, а в сепаратрису накопителя захватится 46% частиц от числа прошедших через линейный ускоритель.

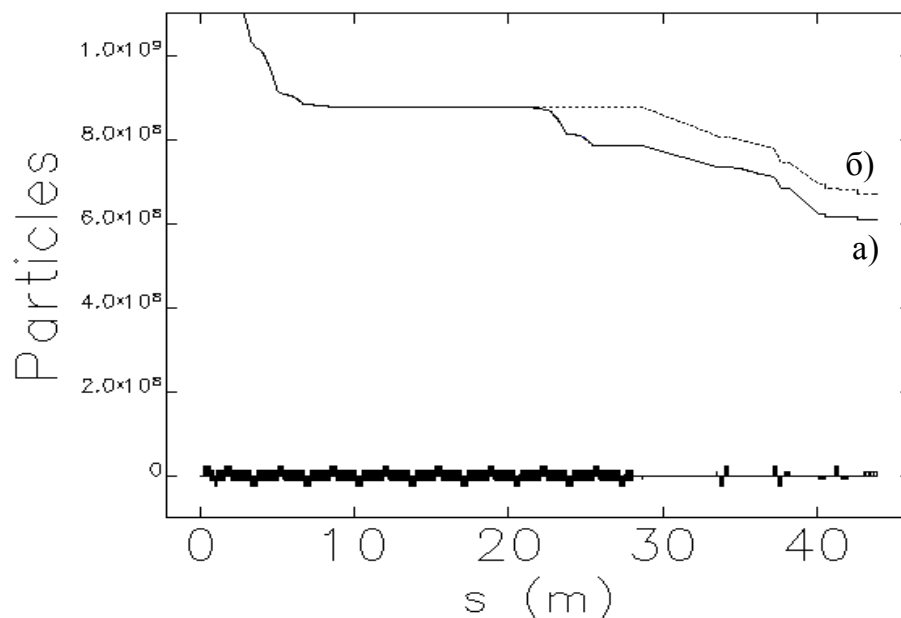


Рис.14. Число позитронов в прямом канале  
а) потери на апертуре, б) потери из-за роста дисперсии

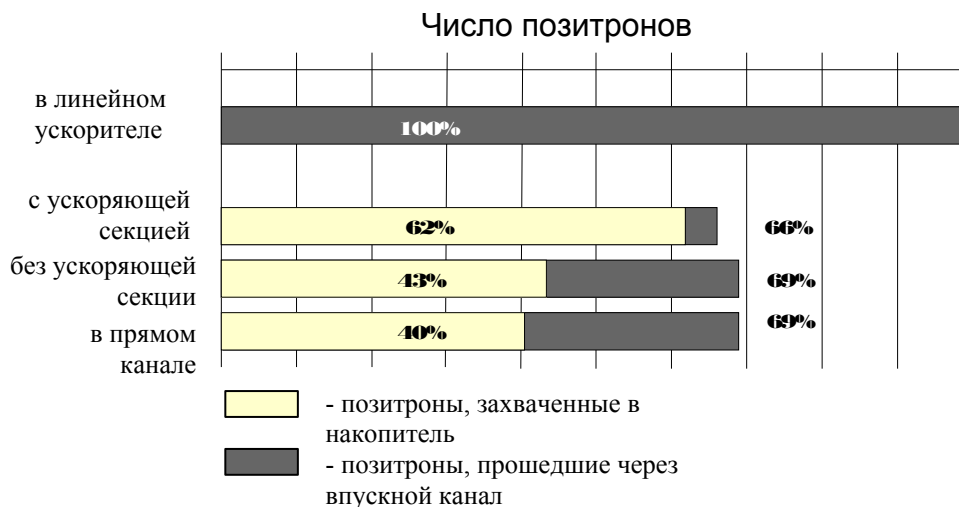


Рис.15. Количество позитронов в пучке после инжекции от числа прошедших по линейному ускорителю

Если сравнить рассмотренные варианты инжекции, то в отсутствие ускоряющей секции дебанчера-монохроматора, по обоим каналам проходит и захватывается в накопитель приблизительно одинаковое число частиц. При этом установка ускоряющей секции во впускном канале с ахроматическим поворотом позволяет в 1.5 раза увеличить количество частиц, захваченных в накопитель-охладитель.



### 5.3. Инжекция электронов

Инжекционный комплекс может работать в двух режимах производства электронов: либо ускоряя и накапливая только электронные пучки, либо производить электронные пучки в короткие промежутки времени между накоплением позитронных пучков.

В первом случае комплекс изначально настраивается на ускорение именно электронов, их энергию и параметры пучка. Потери электронов при инжекции минимальны.

При поочередном ускорении электронов и позитронов линейный ускоритель и впускные каналы настроены для позитронного пучка, потому что накопление позитронов требует большего времени и имеет большее значение для экспериментов в ИЯФе.

При смене сорта частиц необходимо перестроить линейный ускоритель, начиная с 7 секции, с ускорения позитронов с энергией 68 МэВ на ускорение электронов с энергией 200 МэВ до 510 МэВ

Для перехода к ускорению и накоплению частиц противоположного знака необходимо изменить фазу ВЧ мощности в ускоряющих секциях. Изменение магнитных полей в линзах, настроенных на позитроны, нежелательно, потому что изменение и стабилизация токов занимает значительно больше времени, чем перестройка фазы ВЧ, и чем требуется для накопления одного пучка частиц любого сорта. Кроме того, поскольку зависимость поля от токов в линзах обладает гистерезисом, постоянное переключение между двумя режимами осложнит тонкую настройку электронно-оптической системы.

Необходимо определить, возможно ли ускорение электронов и их захват в накопитель при сохранении токов в квадрупольных линзах для позитронов

#### А. Ускорение только электронов.

Перед конверсионной мишенью электронный пучок фокусируется до площади  $1 \text{ мм}^2$  с помощью триплета квадрупольей. Для запуска в 510 МэВ-ный ускоритель электроны переносятся на 2 мм вниз при помощи двух магнитов, и проходят через отверстие в конверсионной мишени (Рис.16).

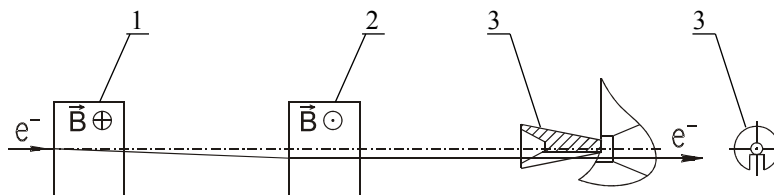


Рис. 16. Система параллельного переноса электронного пучка.  
1, 2 — магниты, 3 — конверсионная мишень

Эмиттанс электронного пучка  $\epsilon = 2.6 \cdot 10^{-6}$  рад·м, поперечный размер пучка  $2\sigma_{x,y} = 1.5$  мм, бета-функции в районе конверсионной мишени  $\beta_{x,y} = \sigma^2/\epsilon = 1.4$  м.

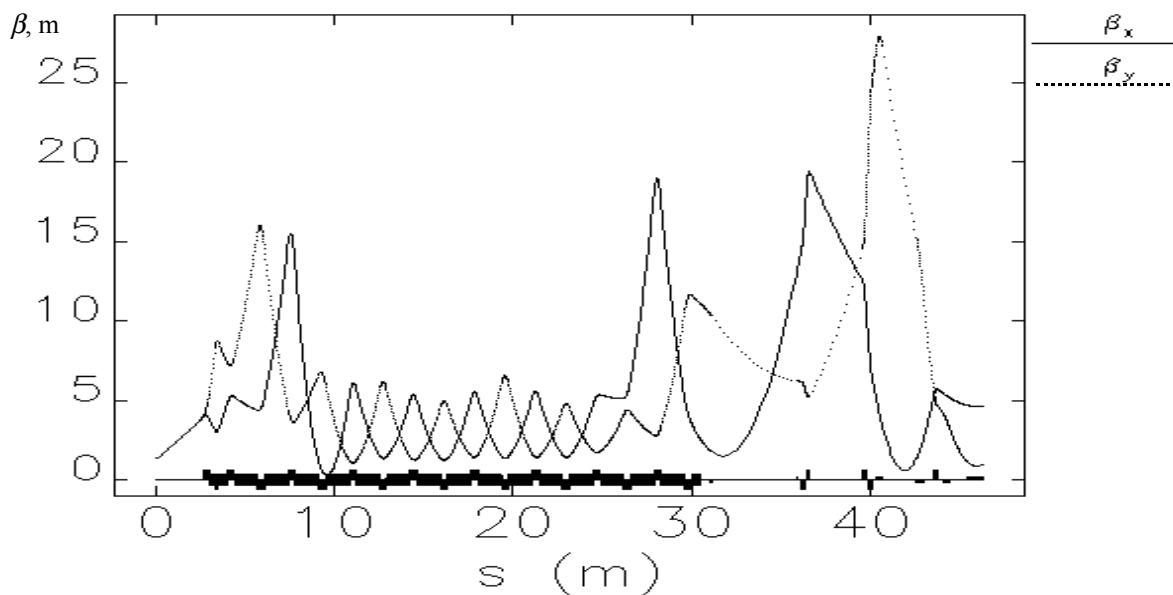


Рис.17. Бета-функции в линейном ускорителе и впускном канале для электронов

Из-за небольшого поперечного размера электронного пучка потери электронов в линейном ускорителе и впускном канале для электронов очень малы – не более 1%. Вообще говоря, при согласовании транспортного канала для электронного пучка точного совпадения граничных условий не требуется. Достаточно, чтобы пучок попадал в область устойчивого движения в накопителе.

#### Б. Ускорение электронов поочередно с позитронами.

Если ускорять электроны поочередно с позитронами, то фаза ВЧ мощности в ускоряющих структурах меняется, а градиенты полей в линзах остаются прежними. Кроме того, нет возможности изменить фазу ВЧ в ускоряющей секции, расположенной в соленоиде после конверсионной мишени (секция №6). Дело в том, что для быстрого изменения фазы ВЧ в ускоряющей секции необходимо менять фазу мощности на клистроне. А клистрон, подающий ВЧ на 6-ю секцию, также питает и две ускоряющие секции (4 и 5), расположенные в ускорителе электронов (Рис.18).

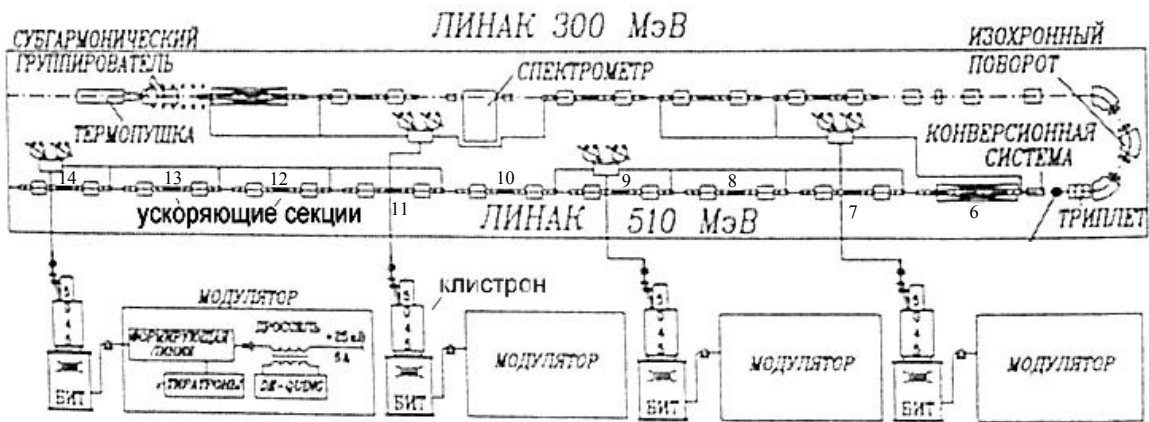


Рис.18. ВЧ-система форинжектора

В результате, сразу после мишени электроны не ускоряются, а тормозятся до энергии 200 МэВ, а затем движутся по электронно-оптическому каналу, настроенному на параметры и энергию позитронного пучка.

Согласование впускного канала для электронов с накопителем возможно провести только с помощью 5 квадрупольных линз, расположенных на впуске электронов. В результате добиться строгого выполнения граничных условий не удастся – значения бета-функций и дисперсии в точке инжекции отличаются от требуемых не менее, чем на 60%. Потери во впускном канале до точки инжекции составляют около 12%.

Основные проблемы в том, что из-за недостаточного согласования граничных условий в накопителе пучок не попадает сразу на равновесную орбиту, что приводит к увеличению его поперечных размеров.

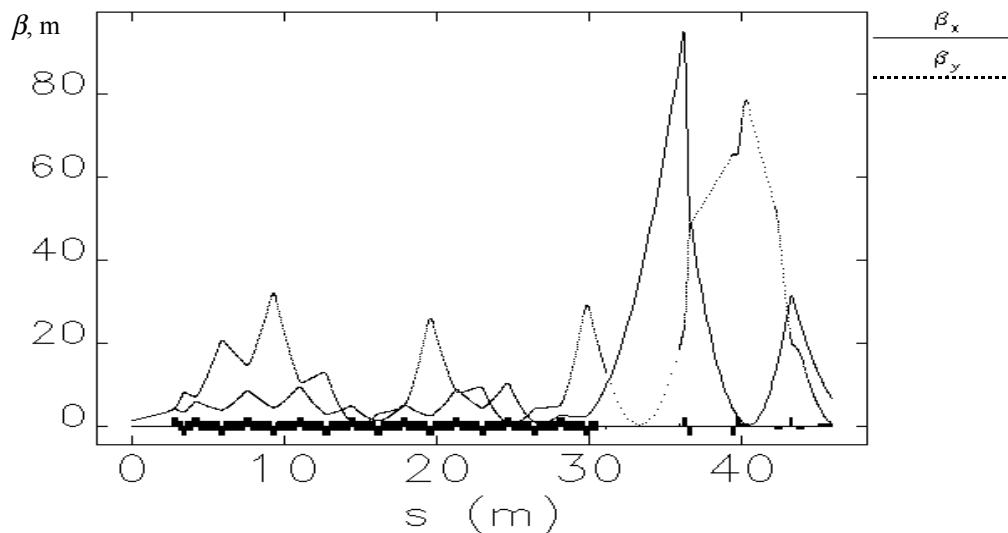


Рис.19. Бета-функции в линейном ускорителе и впускном электронном канале в случае настройки ускорителя на позитронный пучок

Оценим максимальный поперечный размер пучка в накопителе. Для этого рассмотрим магнитную структуру накопителя как продолжение впускного канала и определим, как изменились дисперсионные и бетатронные функции по сравнению с функциями при согласованных каналах (Рис.20, 21):

$$\sigma_{x,y} \propto \sqrt{\varepsilon_{x,y} \beta_{x,y}} + \eta_{x,y} \frac{\Delta p}{p}$$

$$2\sigma_y \approx 2(\sigma_b + \sigma_D) = 2 \cdot (0.006 + 0.1 \cdot 0.08) \text{ м} = 2.8 \text{ см}$$

$$2\sigma_x \approx 2\sigma_b = 2 \cdot 0.009 \text{ м} = 2 \text{ см} - \text{ в прямых участках накопителя}$$

$$\text{и } 2\sigma_x \approx 2\sigma_D = 0.8 \cdot 0.06 \text{ м} = 4.8 \text{ см} - \text{ в поворотах.}$$

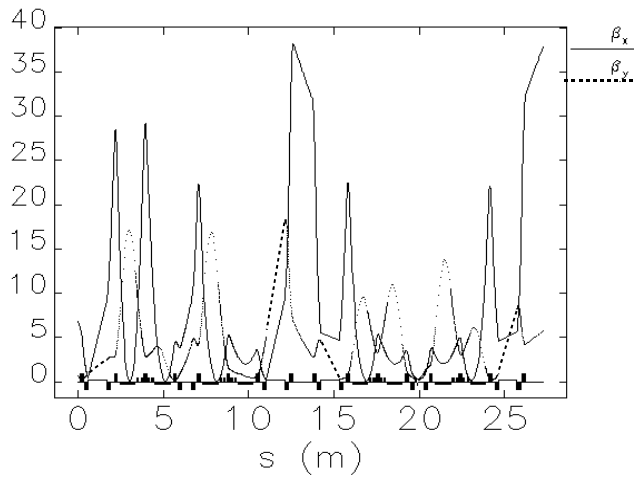


Рис. 20. Бета-функции в кольце накопителя при несогласованных каналах

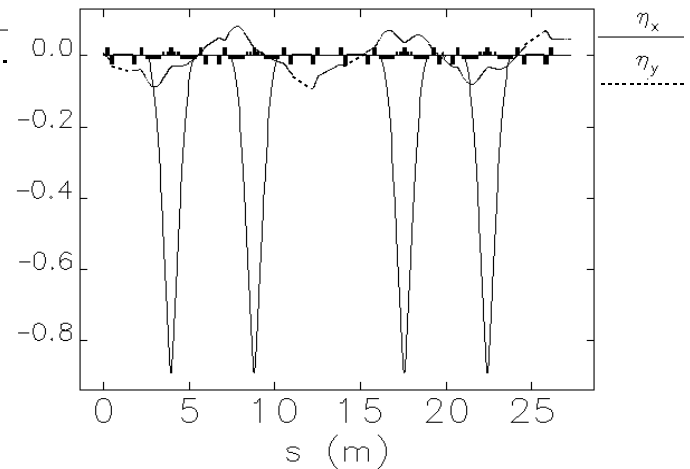


Рис.21. Дисперсия в кольце накопителя при несогласованных каналах

Как видно из расчетов, характерный поперечный размер пучка на отдельных участках близок к внутреннему диаметру вакуумной камеры, поэтому возможны потери частиц при первых оборотах в накопителе.

## 6. Инжекция в накопитель

### 6.1. Акцептанс. Сепаратриса.

При исследовании динамики пучка в транспортном канале удобно пользоваться фазовыми диаграммами – проекциями положения пучка в фазовом пространстве на плоскости  $(x, x')$ ,  $(y, y')$ ,  $(E, \phi)$ . На каждой из этих плоскостей можно выделить такую область, что частицы с координатами из этой области останутся в вакуумной камере при движении пучка по ускорителю, а остальные погибнут на стенках. Площадь этой области в плоскостях  $(x, x')$  и  $(y, y')$  называется поперечным акцептансом канала, а в плоскости  $(E, \phi)$  – продольным акцептансом.

Пучок в транспортном канале называется согласованным с этим каналом, если он равномерно заполняет область, ограниченную фазовым эллипсом, т.е. область, занимаемая пучком, совпадает с этим эллипсом (см. формулы 2, 2'). В этом случае мы получаем наиболее эффективный способ заполнения фазового пространства – фазовый эллипс не содержит пустых участков.

Для организации инжекции в транспортный канал ускорителя идеальное согласование пучка с каналом необязательно. Достаточно того, чтобы пучок после инжекции оказался внутри области, доступной для движения в канале. Из теоремы Лиувилля следует, что частица, находящаяся внутри замкнутого контура в фазовом объеме не может выйти за границы этого контура [4], а значит, пучок, попавший в область устойчивого движения, уже будет захвачен в ускоритель. Согласование двух каналов требуется для того, чтобы величина акцептанса, необходимая для захвата пучка, не была слишком большой.

Чтобы найти оптимальные настройки узла инжекции в накопитель-охладитель, необходимо сначала определить область, доступную для устойчивого движения в накопителе, а затем так настроить кикеры, чтобы инжектируемый пучок попадала внутрь этой области, а накопленный пучок не выходил при этом за ее пределы.

Рассчитать размер и форму области движения в канале накопителя и акцептанс можно при помощи трекинга пучка с очень большим эмиттансом, проследив, сколько и каких частиц останется после большого числа оборотов в накопителе. Типичный вид области движения в накопительном кольце показан на Рис. 22:

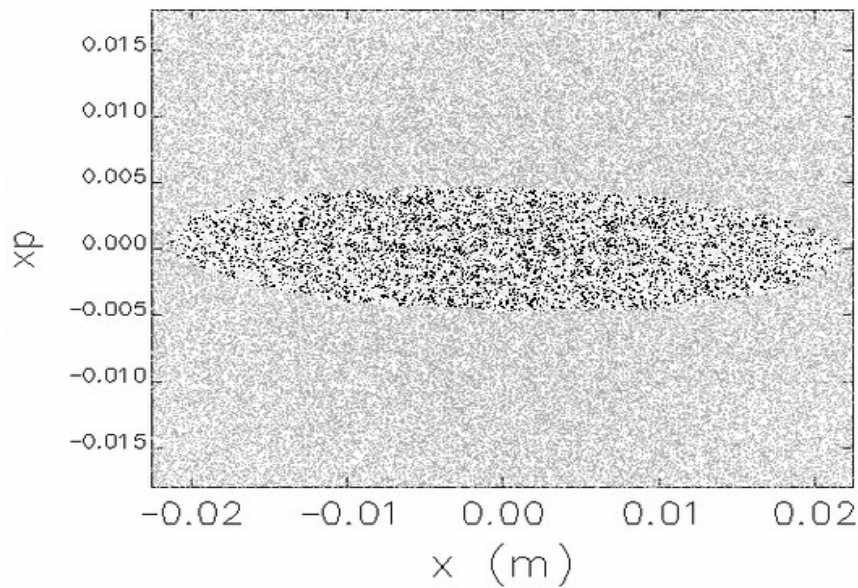


Рис.22. Область устойчивого движения в кольце по X в точке инжекции (черные точки)

Черным цветом отмечены частицы, прошедшие по кольцу несколько десятков оборотов. Площадь области в фазовом объеме, занятой этими частицами, и есть акцептанс кольца. Если при инжекции пучок попадет внутрь этой области, то с уверенностью можно сказать, что он будет захвачен в накопитель

При накоплении частиц в кольце реализуются две различные ситуации: при первой инжекции пучок запускается в пустой накопитель, при всех последующих пучок инжектируется в накопитель, где уже обращается накопленный пучок. Если в первом случае возможно помещение инжектируемого пучка на равновесную орбиту, то при всех последующих инжекциях туда может быть помещен только один из пучков – по теореме Лиувилля частицы с разными начальными условиями не могут попасть в одну и ту же область фазового объема [4].

При повторных инжекциях удобно поместить на равновесную орбиту либо центр накопленного ранее пучка, либо среднюю точку между накопленным пучком и новой порцией инжектированных частиц. Первый вариант позволяет свести до минимума потери из накопленного пучка в случае малой апертуры вакуумной камеры. Если размеры камеры достаточны, то выгоднее второй вариант, потому что расстояние от центра инжектируемого пучка (имеющего большой угловой и пространственный разброс) до центра вакуумной камеры в этом случае меньше, а значит, больше частиц из инжектируемого пучка может быть захвачено в акцептанс.

Согласно (5), угол отклонения пучка в кикере:

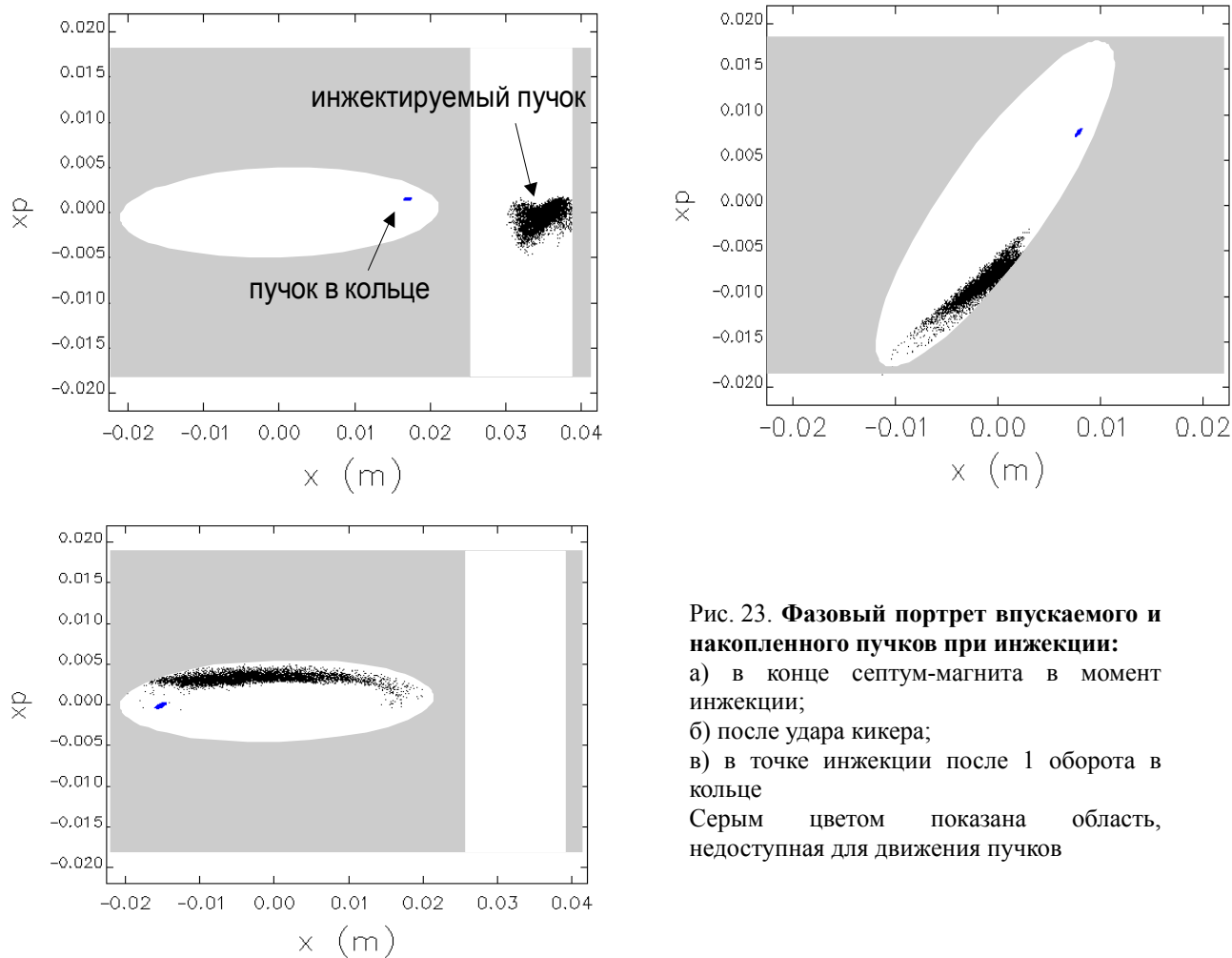
$$\theta_0 = \frac{0,035}{\sqrt{4,6 \cdot 1,091}} \approx 0,0157 \text{rad} \quad - \text{ при первой инжекции в накопитель}$$

( $X=35$  мм – смещение септума)

Для повторных инжекций в накопитель:

$$\theta_{all} = \frac{0,026}{\sqrt{4,6 \cdot 1,091}} \approx 0,0117 \text{rad}$$

На Рис.23. показаны результаты трекинга позитронного пучка по впускному каналу и накопителю в горизонтальной проекции фазового пространства ( $x, x'$ ) на фоне области, доступной для движения в накопителе.



**Рис. 23. Фазовый портрет впускаемого и накопленного пучков при инжекции:**  
 а) в конце септум-магнита в момент инжекции;  
 б) после удара кикера;  
 в) в точке инжекции после 1 оборота в кольце  
 Серым цветом показана область, недоступная для движения пучков

Инжектируемый пучок попадает в область движения после удара кикера и продолжает движение по накопителю.

Остаточные колебания затухают за счет радиационного трения, и пучки смещаются к равновесной орбите в центре апертюры камеры. Оценим время затухания.

$$W = \frac{2\pi}{cK} \cdot \frac{2}{3} \gamma^4 e^2 c K^2 \approx 90 K E^4 \text{ (кэВ)- потери на синхротронное излучение за один оборот,}$$

где  $K=1/r$  – кривизна орбиты в  $m^{-1}$ ,  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $E$  – энергия пучка в ГэВ. [3.]

Для накопителя-охладителя эта величина составляет 5.4 кэВ на оборот, а время затухания

$$\tau \approx \frac{2TE_0}{W} \approx 0.0018 \text{ сек, } T \text{ – период оборота пучка, } E_0 \text{ – энергия на равновесной орбите}$$

или  $2 \cdot 10^5$  оборотов пучка.

По прошествии этого времени можно произвести инжекцию следующей порции частиц в накопитель-охладитель.

Чтобы оценить долю частиц, захваченных на орбиту в накопителе, определим ширину сепаратрисы:

$$\frac{\Delta p}{p} = 2 \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{eU_0}{qKp_0v_0}} \approx 0.024, \text{ где } U_0 \text{ – ускоряющее напряжение ВЧ-резонатора, } K \text{ –}$$

коэффициент удлинения периода кольца,  $q$  – гармоника ВЧ [3]

Также размеры сепаратрисы можно определить с помощью трекинга по кольцу частиц

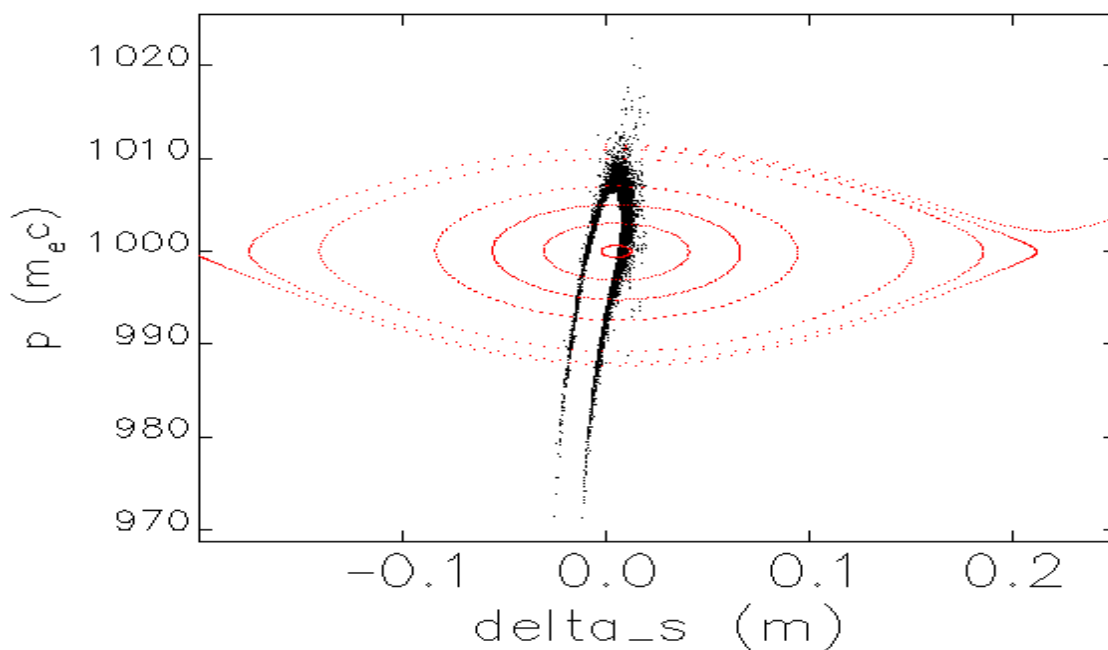


Рис.24. Сепаратриса накопителя и позитронный пучок в ней



с определенным энергетическим распределением, и отслеживая изменения энергии частиц в зависимости от фазы колебания:

На Рис. 24 показана форма сепаратрисы и то, как располагается в ней позитронный пучок. Частицы, находящиеся внутри замкнутого контура, будут продолжать движение по накопителю, сохраняя протяженность пучка не более 0.4 м. Частицы, оставшиеся за пределом сепаратрисы, даже при движении вдоль равновесной орбиты, будут потеряны при выпуске пучка из накопителя.

## 7. Общие потери при инжекции. Эффективность впускной системы

В таблице 4 представлены результаты расчета эффективности впускных каналов накопителя-охладителя. В первых двух столбцах указан процент частиц, прошедших по впускному каналу до точки инжекции (1), и попавших в сепаратрису накопителя (2) - от числа захваченных в линейный ускоритель после соленоида.

Для позитронного пучка в линейный ускоритель захватывается 35% частиц, сфокусированных соленоидом. В третьем столбце таблицы рассчитана доля частиц, устойчиво захваченных в накопитель, от числа частиц, сфокусированных соленоидом. Это и есть эффективность впускной системы на участке от фокусирующего позитроны соленоида и до накопителя-охладителя.

Таблица 4

Вид частиц и режим инжекции	Доля частиц, прошедших впускной канал, % (1)	Доля частиц, захваченных накопителем на устойчивую орбиту, % (2)	Полная эффективность впускной системы, % (3)
Позитроны (при наличии ускоряющей секции)	66.1	64	23,6
Позитроны без ускоряющей секции	69	45,6	16,8
Позитроны по прямому каналу	69	44,4	16,4
Электроны поочередно с позитронами по прямому каналу	88	54,4	54.4
Электроны отдельно	96	73,7	73,7

## 8. Исследование возможностей модернизации установки

В данной работе эффективность впускной системы и скорость накопления пучков рассматривались для существующей сейчас конфигурации установки. В будущем, при улучшении параметров инжекционного комплекса, возможны различные варианты модернизации установки. В частности, для увеличения скорости накопления позитронов, можно добиться увеличения акцептанса линейного ускорителя для позитронного пучка. Это можно сделать, например, за счет удлинения соленоида, фокусирующего позитроны после мишени.

Необходимо убедиться, что позитронный пучок с большим эмиттансом также будет захватываться в накопитель. Главное условие пропускания пучка каналом – эмиттанс пучка не должен быть больше акцептанса этого канала. Поэтому задача состоит в том, чтобы найти акцептанс системы "линейный ускоритель + впускной канал + накопитель" и сравнить его с эмиттансом позитронного пучка. Определить величину акцептанса можно тем же способом, что и при нахождении акцептанса накопителя – трекингом пучка большого размера через впускной канал и определением доли захваченных частиц.

На Рис.24 изображен портрет позитронного пучка на фоне поперечных акцептансов впускной системы. Точка моделирования – конец третьей FODO структуры в линейном ускорителе (конец 9 ускоряющей секции). Точка выбрана таким образом, потому что этом участке практически заканчиваются потери позитронов после соленоидальной фокусировки, и эмиттанс пучка, движущегося по ускорителю без потерь, максимален.

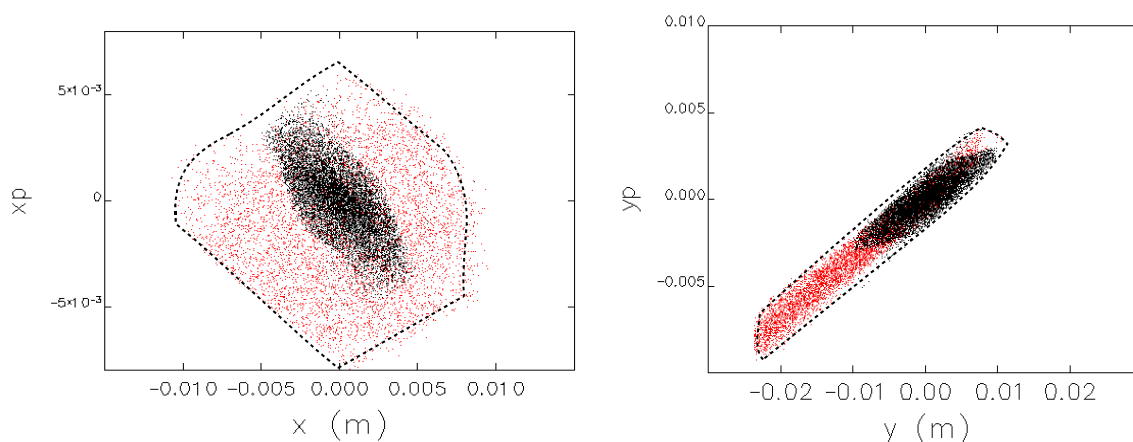


Рис.25. Эмиттанс пучка в линейном ускорителе на фоне поперечного акцептанса

Видно, что область фазового объема, занимаемая пучком, составляет только часть области, вообще доступной для позитронов, захватываемых в накопитель. Акцептанс

впускной системы больше эмиттанса пучка в 3.5 и в 2 раза для горизонтальной и вертикальной координаты соответственно.

Следовательно, увеличение эмиттанса инжектируемого пучка позитронов в пределах акцептанса впускного канала приведет к увеличению доли частиц, захваченных в кольцо, а значит, позволит ускорить их накопление.

## **9. Выводы**

В данной работе были проведены расчеты и оптимизация впускных каналов накопителя-охладителя ВЭПП-5 для электронов и позитронов при различных режимах работы инжекционного комплекса. Расчеты производились с помощью компьютерного моделирования в программе Elegant. Был произведен расчет апертурных потерь и их анализ. Исследовано поведение пучков при инжекции. Проведена общая оценка эффективности впускной системы комплекса.

Кроме того, были рассмотрены возможности модернизации установки и увеличения скорости накопления позитронов. Установлено, что при увеличении эмиттанса пучка после соленоидальной фокусировки также будет увеличиваться число позитронов, захваченных в накопитель при инжекции.

### Приложение. Эксперимент в мае-июне 2007г.

В настоящее время на Инжекционном комплексе ВЭПП-5 проводятся первые эксперименты по инжекции электронного пучка в накопитель. Нынешняя конфигурация установки несколько отличается от проектной. В частности, еще не установлен последний ускоряющий модуль в позитронном линейном ускорителе, включающий в себя 4 ускоряющие секции (11-14), в 7 ускоряющей секции отсутствует сильноточная квадрупольная линза.

Для этих условий также был проведен расчет электронного канала и линейного ускорителя, и определены параметры квадрупольных линз:

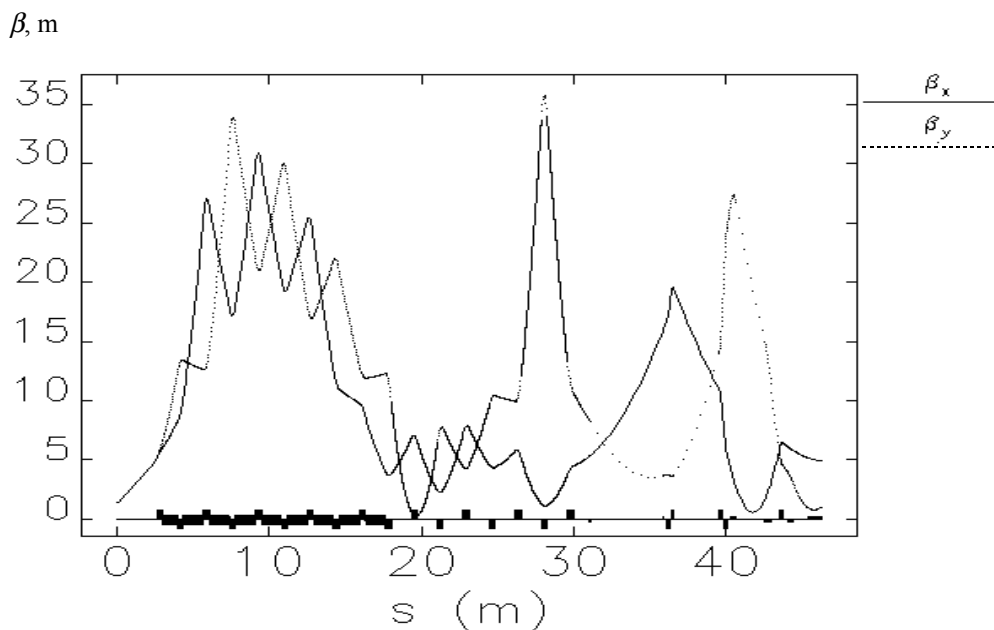


Рис.26. Бета-функции линейного ускорителя и электронного канала для эксперимента

Расчетные потери пучка при инжекции составляют около 4% во впускном канале, а в накопитель после настройки может быть захвачено 50% электронов.