

# СОСТОЯНИЕ РАБОТ НА УСТАНОВКЕ СО ВСТРЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫМИ ПУЧКАМИ ВЭПП-4

Группа ВЭПП-4

Докладчик И.Я.Протопопов  
Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск

Подходит к концу сооружение накопителя ВЭПП-4, который будет работать в электрон-позитронном варианте с энергией пучков до  $2 \times 7$  ГэВ. При этом существующее кольцо ВЭПП-3 используется в качестве промежуточного накопителя электронов и позитронов. Через электронно-оптический канал накопленные частицы перебрасываются в ВЭПП-4 при энергии до  $1,8 \text{ ГэВ} / \gamma$ .

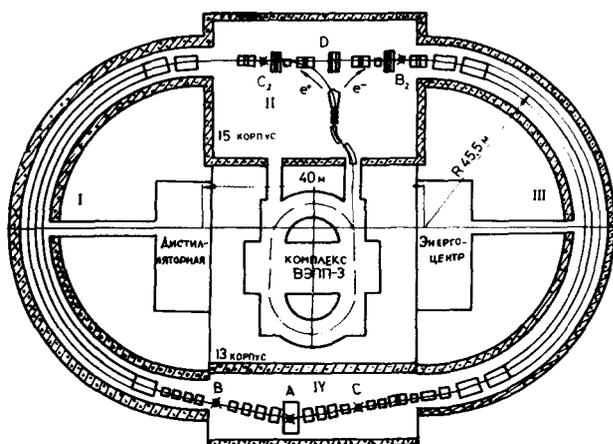


Рис. I

В качестве источника позитронов используется разработанный в Институте импульсный линейный ускоритель электронов на энергию выше 30 МэВ с током не менее 20 А при длительности импульса 30 нс. ВЧ питание линейного ускорителя осуществляется от мощного (более 50 МВт) импульсного гирокона.

Позитроны после конвертора, или в других циклах электроны, инжектируются в синхротрон Б-4, где ускоряются до энергии 400-500 МэВ, достаточной для их инжекции и накопления в ВЭШ-3.

Подобная схема получения позитронов должна обеспечить скорость их накопления в ВЭШ-3 не менее 3 мА/мин, что с запасом обеспечивает накопление нужных токов в ВЭШ-4.

В настоящее время на линейном ускорителе проведены первые эксперименты, получен расчетный коэффициент конверсии, идет выведение на расчетные параметры.

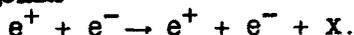
Описание позитронного источника, синхротрона Б-4, накопителя ВЭШ-3, канала транспортировки пучков до ВЭШ-4 можно найти в /2-5/.

Электрон-позитронный накопитель ВЭШ-4 имеет два полукольца со средним радиусом 45,5 м, соединенных двумя длинными промежутками. В одном из них, длиной 40 м, расположен впуск частиц в накопитель, резонаторы ВЧ системы и четыре дублета квадрупольных линз, осуществляющих фокусировку и согласование промежутка с подукольцами.

Второй промежуток длиной около 55 м предназначен для проведения экспериментов. В нем расположены три места встречи и 15 квадрупольных линз, согласующих промежутки и создающих в местах встречи необходимые параметры пучков.

В центральном месте встречи будет установлен магнитный детектор МД-1 с объемом поля  $9,5 \text{ м}^3$ , являющийся частью магнитной структуры накопителя. Поле в детекторе направлено перпендикулярно плоскости орбиты пучков, что позволяет проводить анализ продуктов реакции, вылетающих даже под нулевым углом.

С каждой стороны от МД-1 стоят дополнительные поворотные магниты, поле в которых направлено в ту же сторону, что и в МД-1. Между поворотным магнитом и линзой находится система пропорциональных камер для регистрации рассеянных электронов в процессах двойного электроорождения



Эта система обеспечивает регистрацию рассеянных электронов с потерей энергии 14-50%. Кроме того, предусматривается смещение положения орбиты по радиусу внутрь для регистрации электронов с меньшей потерей энергии. Так, при энергии 3,5 ГэВ можно регистрировать электроны с потерей энергии 5%. Точность измерения энергии рассеянных электронов будет составлять около 1%. Эффективность

регистрации зависит от процесса и энергии и составляет от I до 30%.

Одной из серьезных проблем при проведении экспериментов с использованием МД-I является проблема фона от синхротронного излучения.

Подукольцо ВЭШ-4 включает в себя 19 элементов периодичности типа FBDB с совмещенными функциями фокусировки и поворота. Элемент периодичности состоит из двух магнитных блоков - фокусирующего и дефокусирующего. Каждый магнитный блок на 2/3 занят однородным и на 1/3 фокусирующим (дефокусирующим) полями.

Конструктивно магниты состоят из двух половин с разъемом в медианной плоскости; в верхней половине расположены две шины обмотки сечением  $45 \text{ см}^2$ . Между магнитами шины соединены через развязку, выполненную гибким проводником большого сечения.

Обмотки, расположенные в магнитах, и отдельно стоящие дипольные магниты в прямолинейных промежутках создают систему коррекции орбиты по радиусу и вертикали в 53 точках азимута.

Коррекция квадратичной и кубической нелинейности производится с помощью обмоток, расположенных в фокусирующих частях магнитов, и отдельно стоящих секступолей и октуполей в прямолинейных промежутках. Около 40 элементов на кольце позволяют получать повернутое квадрупольное поле.

Для существенного изменения частот бетатронных колебаний (до  $\Delta Q \approx 1$ ) в фокусирующих (и дефокусирующих) частях магнитов полуколец размещены мощные дополнительные обмотки.

На равновесной орбите ВЭШ-4 нормально отсутствует радиационное затухание радиальных бетатронных колебаний. Для его получения и регулировки в магнитную систему накопителя введен специальный магнит длиной 2,6 м, позволяющий перераспределять декременты между радиальными и фазовыми степенями свободы.

Магнитная система накопителя рассчитана на протон-антипротонный вариант ВАШ-НАП и позволяет иметь энергию до 20 ГэВ, что значительно выше максимальной энергии, допускаемой планируемой ВЧ мощностью и размером вакуумной камеры. На энергии 7 ГэВ радиальный размер электронного и позитронного пучков с учетом необходимого запаса для обеспечения высокого времени жизни составляет 2/3 размера камеры. Существующая система мощной коррекции частот обеспечивает возможность повышения жесткости магнитной системы накопителя, что позволит иметь энергию 8,5 ГэВ.

Силовое питание магнитов кольца производится от генератора постоянного тока, обеспечивающего получение в ВЭШ-4 максимальной энергии, питание элементов прямолинейных участков - от тиристорных преобразователей. Раздельное питание элементов экспериментального промежутка обеспечивает гибкость в получении требуемых размеров пучков в местах встречи и позволяет создавать структуру промежутка, оптимальную для эксперимента.

Вакуумная камера накопителя сформирована из цельнотянутой нержавеющей трубы. Максимальный внутренний размер камеры  $60 \times 27 \text{ мм}^2$ . На концах трехметровых участков камеры, сваренных между собой через сильфоны, установлены трёхэлектродные магнитоэлектродные насосы. Внутренняя по радиусу часть камеры занята распределённым магнитоэлектродным насосом, работающим на собственном поле накопителя. На противоположной стороне камеры расположен приемник синхротронного излучения, изготовленный из сплюсненной медной позолоченной трубки, охлаждаемой водой. В прямолинейных промежутках приемники излучения выполнены в виде тонкостенных вертикальных стержней из алюминия; большая часть синхротронного излучения проходит сквозь стенку трубки и поглощается в охлаждающей воде.

Проектный вакуум в камере накопителя ВЭШ-4 с пучком  $10^{-8}$  тор на полукольцах и лучше  $10^{-10}$  в местах встречи  $1/6$  луч-

Для наблюдения за пучками на кольце ВЭШ-4 установлены 52 пикап-станции, что соответствует 6 точкам наблюдения на одну волну бетатронных колебаний. Предусмотрена возможность использования пикап-электродов для наблюдения за током и положением пучков на первом обороте после инжекции. Для этой же цели на кольце установлены динофоры и сетчатые вторичноэмиссионные датчики. Естественно, используется возможность наблюдать за пучком по его синхротронному излучению в видимой и рентгеновской областях спектра.

Ускорение частиц и компенсация радиационных потерь в ВЭШ-4 будет осуществляться 6 резонаторами (возможно увеличение их числа до 10), работающими на 221 гармонике частоты обращения ( $\lambda = 1,65$  метра). Питание резонаторов будет осуществляться от разрабатываемого в Институте ВЧ генератора-гироконе мощностью в несколько мегаватт. Ввод этого генератора на полную мощность позволит получить предельную энергию. Уже достигнутая на гироконе ВЧ мощность 0,5 МВт позволяет получить энергию 6 ГэВ. Кроме того, на ВЭШ-4 установлена легко управляемая вспомогательная ВЧ сис-

тема, предназначенная для компенсации нестабильностей ускоряющего напряжения основной системы. На начальном этапе запуска накопителя она позволит иметь энергию пучков до 3,9 ГэВ.

Все системы комплекса управляются и контролируются с помощью ЭВМ /8,9/. Для этого используются 5 универсальных машин типа "Одра-1325" с оперативной памятью 32 К слов и внешней памятью на диске в 256 К слов каждая. Разработанная в Институте система передачи данных позволяет просто присоединять оконечные устройства на большом удалении их от машины. Достаточное количество программ обеспечивает контроль и управление комплексом, контроль и наладку аппаратуры.

Для организации мест встречи пучков в экспериментальном промежутке оказалось удобным разбить его на две части: симметризирующую (центральное место встречи смещено на 2,3 метра от середины промежутка) и симметричную, включающую в себя 12 квадрупольных линз, магнитный детектор МД-1 и два дополнительных магнита. В этой части расположены три места встречи: центральное - А и два боковых - В и С.

Выбранный вариант экспериментального промежутка и огибающие пучка показаны на рис. 2. Параметры мест встречи приведены в табл. I.

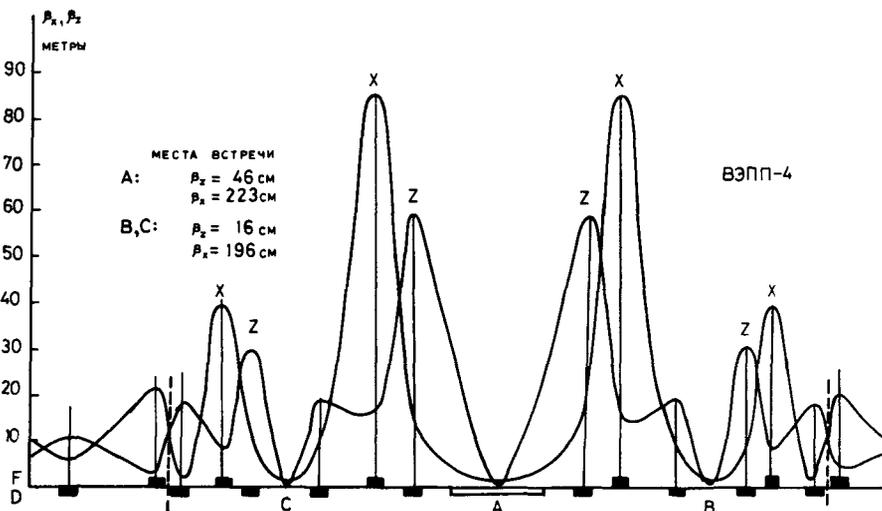


Рис. 2.

Максимальная светимость в боковом месте встречи показана на рис. 3. При больших энергиях светимость ограничена мощностью ВЧ, вкладываемой в пучки. В расчётах принято  $\Delta Q_{\text{встр.}} = 0,05$ .

Таблица I

Параметры мест встречи на ВЭП-4

Место встречи	Светимость $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	$\beta_z$ (см)	$\beta_x$ (см)	$\psi$ (см)	$\ell$ (м)
А	$4 \cdot 10^{31}$	46	223	100	9,5
В,С	$10^{32}$	16,5	195	15	2,8

Здесь:  $\ell$  - длина участков встречи, свободных от квадрупольных линз.

Уменьшая  $\beta_z$  в месте А до 10–15 см, можно с потерей вертикального фазового объема накопителя поднять светимость до  $L = 10^{32}$ . Это возможно, если осуществить перестройку фокусирующей системы промежутка после накопления пучков, как это было предложено в [3].

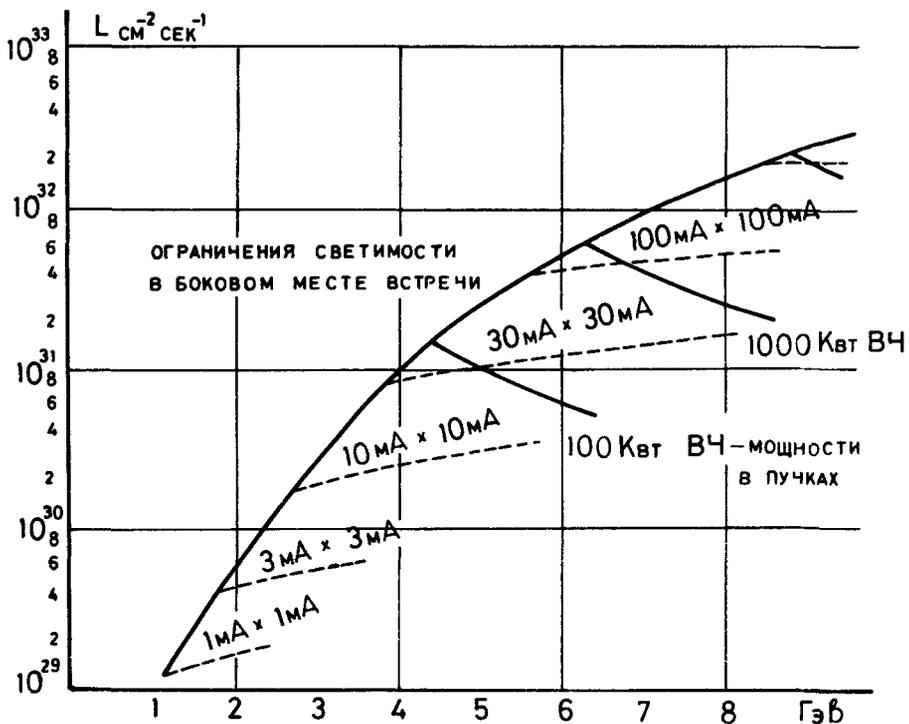


Рис.3

Для уменьшения электромагнитного взаимодействия пучков орбиты  $e^+$  и  $e^-$  могут разводиться с помощью электростатических плас-

тин. Достаточное их количество позволяет проводить эксперименты в произвольном месте встречи, а также в любой их комбинации, разводя пучки в неиспользуемых местах встречи, в том числе и на противоположном азимуте. Разведение орбит осуществляется по вертикали на величину  $\approx 10 \sigma_z$ , для этого на максимальной энергии требуется приложить к пластинам разность потенциалов не более 50 кВ.

Предусмотрена возможность многоструктовой работы. При определенной кратности длин бетатронной и ВЧ волн, искажением орбиты электростатическими пластинами вне подуклодец можно так разместить возможные места встречи вдоль искаженной орбиты, чтобы на всем кольце оказалось хорошее разведение пучков.

Например, при 224 гармонике ВЧ в ВЭШ-4 можно развести таким способом 32 возможных места встречи 16 ступок, если их равномерно расположить по кольцу в каждой четырнадцатой сепаратрисе. При этом максимальное искажение орбиты лишь вдвое больше величины разведения пучков.

При  $N$ -ступках и разведении их во всех местах встречи, кроме одного, максимальная светимость увеличивается в  $N$  раз при сохранении сдвига частоты бетатронных колебаний. Это оказывается особенно полезным на малых энергиях, когда ограничение светимости определяется только поперечным фазовым объемом пучка.

В настоящее время на накопителе ВЭШ-4 получен циркулирующий пучок электронов с энергией до 1,5 ГэВ.

Инжекция электронов происходит на 1,35 ГэВ. Получен удовлетворительный коэффициент захвата частиц в синхротронный режим ускорения. Исполнение магнитных элементов и их геодезическая выстанка хорошие; захват частиц получен без использования элементов коррекции орбиты. Начиная с токов 0,05 мА оказалось возможным использование системы пикап-электродов для наблюдения искаженной орбиты.

С помощью пучка проведено предварительное изучение основных параметров накопителя и его реальной апертуры. При токе более 0,1 мА наблюдалась поперечная неустойчивость, по-видимому, типа head-tail, которая была устранена введением положительного хроматизма. Кроме того, наблюдалась когерентная фазовая неустойчивость, подавленная перестройкой высших гармоник резонатора. Изучение накопителя продолжается.

В следующем году планируется запуск позитронного источника,

мощной высокочастотной системы и начало работ со встречными электрон-позитронными пучками.

Таблица основных параметров накопителя  
ВЭПП-4

Максимальная энергия		- 7 ГэВ
Максимальная возможная светимость в месте встречи:		-
	в месте встречи А	- $4 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
	в месте встречи В,С	- $1 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Периметр		- 366,2 м
Частоты бетатронных колебаний		- 9,2
Коэффициент уплотнения орбит		- 0,0204
Время затухания		- 3 мс
Горизонтальный фазовый объём		- 3,3 мрад.см
Вертикальный фазовый объём		- 0,8 мрад.см
Энергетический разброс ( $\delta_e, \delta$ )		- $1,7 \cdot 10^{-3}$
Частота обращения		- 0,819 МГц
Гармоника ВЧ		- 221
Радиационные потери на обороте		- 5,9 МэВ
Полное ускоряющее напряжение		- 10 МВ
Элемент периодичности		
Максимум $\beta_x$		- 12 м
Максимум $\beta_z$		- 12 м
Максимум $\psi$		- 2,3 м

Л и т е р а т у р а

1. A.N.Skrinsky. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-20, NO.3, 756 (1973).
2. Г.И.Будкер и др. VI Международная конференция по ускорителям частиц высоких энергий, Ереван, 1969, т.2, 37 1970.
3. Status report on electron-positron storage ring VEPP-3. The VIII inter.conf. on High Energy Accel., CERN, p.138 (1971).
4. Т.А.Всеволожская и др. Схема инжекции электронов и позитронов в ВЭПП-4, III Совещания по ускорителям, I22 (1973).
5. Г.И.Будкер и др. Источник позитронов для ВЭПП-4. Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям, Дубна, 1976.
6. В.В.Анашин. Вакуумные системы накопителей заряженных частиц ИЯФ. Там же.
7. Г.И.Будкер и др. Высокочастотная система ВЭПП-4 на основе гирокона. Там же.

8. С.Д.Белов и др. Структура системы автоматизированного управления накопителя ВЭШ-4. Там же.
9. В.И.Нифонтов. Организация управления ускорительно-накопительными комплексами в ИЯФ при помощи ЭМ. Доклад на настоящей конференции.

## ДИСКУССИЯ

О.А.Вальднер: На какие параметры проектируется новый линейный ускоритель - инжектор электронов?

И.Я.Протопопов: Энергия не менее 30 МэВ, ток около 20 А.

И.Енчевич: Пожалуйста, проведите сравнение между инжекторами на базе импульсного трансформаторного ускорителя, которым вы пользовались до сих пор, и линейного ускорителя с ГИРОКОНОм, который вводится в действие?

И.Я.Протопопов: Имеющаяся система для ВЭШ-3 обеспечивала очень малый позитронный ток. Эта схема состояла действительно из импульсного трансформатора, инжекции в синхротрон Б-4 и конверсии электронов при 450 МэВ в позитроны с энергией 200 МэВ с последующим захватом в ВЭШ-3. Сейчас схема изменяется. Это схема ускорения электронов в линейном ускорителе до энергии не менее 30 МэВ и конверсии их в позитроны, после чего осуществляется захват в Б-4, ускорение, перевод и накопление в ВЭШ-3. Эта новая схема должна обеспечить увеличение скорости накопления позитронов в ВЭШ-3 примерно на два порядка.

L.C.Teng: Could you give some more operating characteristics of the GYROCON: the electron beam source and energy, frequency and the power-conversion efficiency?

А.Н.Скринский: Сейчас на непрерывном ГИРОКОНе получена мощность 1 МВт в кратковременных режимах в течение нескольких минут, а в длительных многочасовых режимах - 0,5 МВт. Отношение высокочастотной мощности к мощности электронного пучка, вводимого в ГИРОКОН, составляет 80%. При больших энергиях и больших снимаемых мощностях эффективность должна возрасти до 90%. Энергия электронного пучка 200-300 кэВ, длина волны в ГИРОКОНе 1,6 м.