

ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ НАКОПИТЕЛЬ С ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТЬЮ – ВЭПП-2М

Г.М.Тумайкин

Институт ядерной физики СО АН СССР, г.Новосибирск

Эксперименты по физике высоких энергий со встречными электрон-позитронными пучками на накопительном кольце ВЭПП-2М с максимальной энергией до 2х670 МэВ /1,2/ были начаты в 1974 г. В течение 1975 и 1976 гг. проведен цикл экспериментов от 2х300 МэВ до 2х670 МэВ. Значительная часть времени работы накопителя была использована для изучения радиационной поляризации и экспериментов с поляризованными пучками /3/, а также использования синхротронного излучения.

В течение этого времени также велась работа по изучению эффектов встречи и дальнейшему увеличению светимости установки. Ниже приведено сравнение светимости на одно место встречи (см. $^{-2}$ сек-1) накопителя с другими установками при энергии 2х510 МэВ:

Adone	ВЭПП-2	АСО	ВЭПП-2М
$1 \cdot 10^{28}$	$2 \cdot 10^{28}$	$1 \cdot 10^{29}$	$1,2 \cdot 10^{30}$

1. Описание комплекса ВЭПП-2М (рис. 1). Жесткофокусирующее накопительное кольцо ВЭПП-2М сооружено на базе ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2 /4/, на котором ранее были проведены первые эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках. Слабофокусирующее кольцо ВЭПП-2 используется в качестве бустерного накопителя, а инжектором в него, как и ранее, является электронный синхротрон Б-3М на энергию 250 МэВ. Инжекция в бустер ВЭПП-2 как электронов, так и позитронов, получаемых посредством конверсии электронов, производится поочередно на энергии 120 МэВ. Затем накопленный в ВЭПП-2 пучок ускоряется и переводится в кольцо ВЭПП-2М. Перевод пучков обычно идет на той энергии, при которой проводится эксперимент. Это обеспечивает непрерывность работы, а средняя светимость оказывается близкой к максимальной.

Впуск в ВЭПП-2М производится в вертикальном направлении, инфлектор расположен через 3/4 бетатронного колебания. Имеется прединфлектор, воздействующий только на накопленный пучок, чтобы приблизить его при впуске новой порции частиц к септум-магниту. Такой метод (рис. 2) позволяет в 2-3 раза увеличить акцептанс накопителя.

Средняя скорость накопления позитронов в кольце ВЭПП-2М 1 мА/мин. Системы контроля параметров пучков и положения равновесной орбиты основаны на наблюдении синхротронного излучения. Точное измерение циркулирующего тока проводится с помощью ферромагнитного датчика, работающего по принципу компенсации второй гармоники.

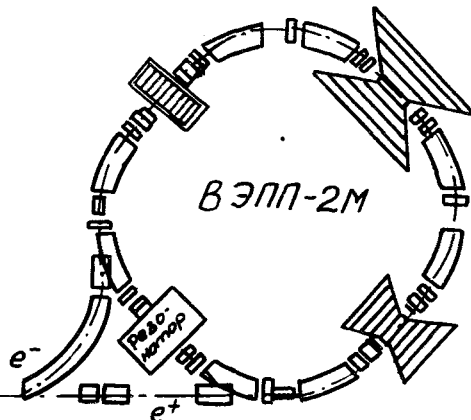
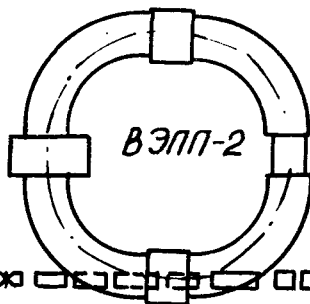
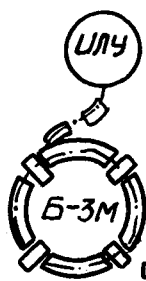


Рис. 1. Схема комплекса ВЭПП-2.

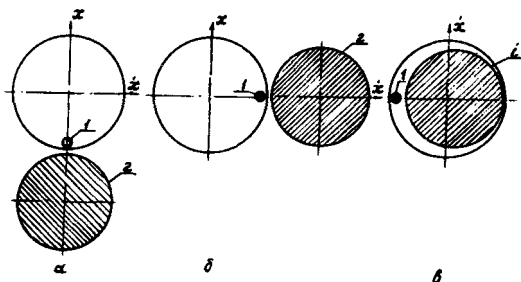


Рис. 2. Положение эмиттанса циркулирующего (1) и накопленного (2) пучков у септум-магнита (а), перед инфлектором (б), после инфлектора (в).

Управление всеми основными элементами комплекса и контроль параметров ведется от вычислительной машины М-6000 /5/.

2. Магнитная структура ВЭПП-2М.

Структурно накопитель состоит из 8 секций магнитной системы, четырех коротких и четырех длинных промежутков. Элемент периодичности имеет зеркальную симметрию. Каждая секция имеет поворотный магнит с однородным полем и две квадрупольные линзы. В одном из длинных промежутков расположен резонатор, три остальных используются для экспериментов. В коротких промежутках расположены дополнительные квадрупольные линзы, позволяющие менять вертикальную β -функцию в области взаимодействия, впускные магниты, пластины инфлекторов и электростатические квадрупольи.

Основные параметры магнитной системы

Максимальная энергия	670 МэВ
Периметр кольца	1788 см
Частоты бетатронных колебаний ν_x, ν_z	~ 3.06
Коэффициент пространственного уплотнения орбит α	0,17
Максимальное поле в магнитах	18,25 кГс
Градиент магнитного поля в основных линзах	6,4 кГс/см
Длина экспериментального промежутка	110,56 см
Значения β_x, β_z, η_x в месте встречи (см)	6,5; 45; 41

Структура 1/4 кольца приведена на рис. 3.

Для коррекции хроматизма, кубичной нелинейности и связи бетатронных колебаний первоначально было установлено 16 секступольных, 16 октупольных линз и 2 повернутых квадрупольа. В процессе работы с целью подавления связи и уменьшения вертикальной η_x -функции шесть октупольных линз были заменены повернутыми квадрупольами. В результате было получено $\Delta(\nu_x - \nu_z) = 0,0005$ (вблизи резонанса связи $\nu_x - \nu_z = 0$), и соотношение эмиттансов вертикальных и радиальных колебаний

$$(\epsilon_z / \epsilon_x)^{1/2} = 0,06 \text{ при } \nu_x = 3,08 \text{ и } \nu_z = 3,06.$$

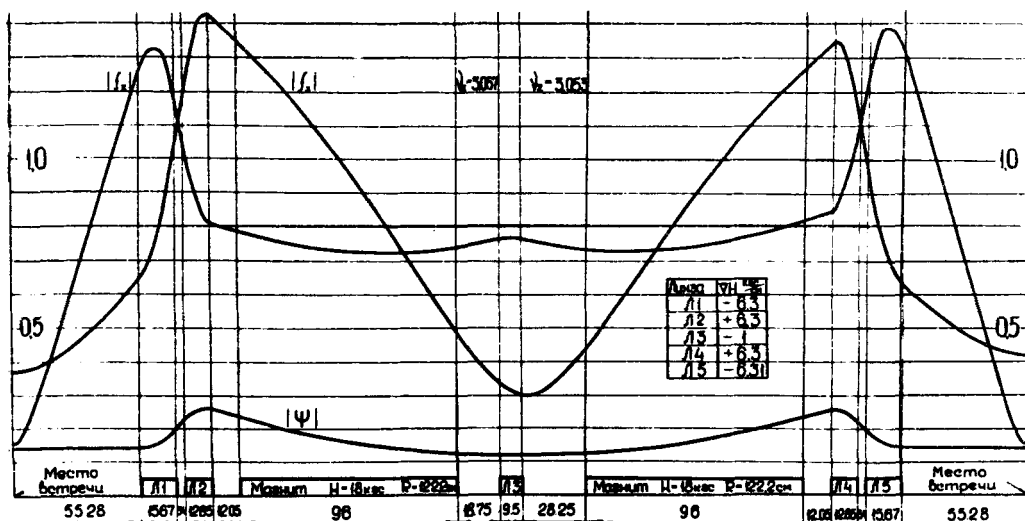


Рис. 3. Структура 1/4 кольца ВЭПП-2М.

3. Наблюдаемые когерентные неустойчивости. В режиме одного сгустка наблюдались два типа неустойчивостей.

Продольная когерентная неустойчивость дипольного типа, по-видимому, была обусловлена взаимодействием пучка с паразитными модами ускоряющего резонатора. Соответствующей перестройкой высших гармоник резонатора неустойчивость была подавлена. При этом в зависимости от положения перестраиваемых электродов наблюдались:

- а - когерентные колебания большой амплитуды;
- б - небольшое увеличение размеров (в 1,5-2 раза);
- в - периодические всплески больших амплитуд с последующим затуханием;
- г - подавление неустойчивости до естественных размеров.

Вертикальная когерентная неустойчивость наблюдалась только при отрицательном хроматизме: $E \cdot \partial \nu / \partial E$. Порог составлял несколько миллиампер. При положительном хроматизме неустойчивость не наблюдалась.

Радиальные когерентные связанные колебания были обнаружены в режиме двух пучков. Неустойчивость проявлялась в значительном (4-5 раз) увеличении радиальных размеров пучков при токах больше чем 3 мА x 3 мА ($E=510$ МэВ). Неустойчивость была подавлена введением дополнительного быстрого затухания посредством согласования радиальных пластин, расположенных внутри вакуумной камеры.

4. Светимость. Ограничение на величину светимости обычно связано с достижением порогового значения сдвигов частот бетатронных колебаний из-за взаимодействия частиц с полем встречного пучка. Эксперименты обычно велись при бетатронных частотах $\nu_z = 3,086$, $\nu_x = 3,06$. Выбор этих значений обусловлен, во-первых, желанием работать чуть выше целого резонанса, где истинный сдвиг частоты меньше, чем полученный из линейного приближения $1/6$. Во-вторых, в этой области нет сильных нелинейных резонансов 3,4,5-го порядков. В-третьих, рабочая точка на сетке резонансов для малых колебаний, смешающаяся из-за встречного пучка, при $\Delta \nu_z > \Delta \nu_x$ не пересекает линейного резонанса связи $\nu_z - \nu_x = 0$.

Сдвиг частоты может быть получен расчетным путем из измерений поперечных размеров, светимости и числа частиц, а также непосредственными измерениями частоты малых бетатронных колебаний методом резонансной раскочки. Получено хорошее совпадение при определении $\Delta \nu$ разными методами.

Было проведено измерение сдвига частот $\Delta \nu_x$ крит., начиная с которого увеличивается поперечный размер слабого пучка. Полученные результаты для различных пар мест встречи практически не отличаются друг от друга:

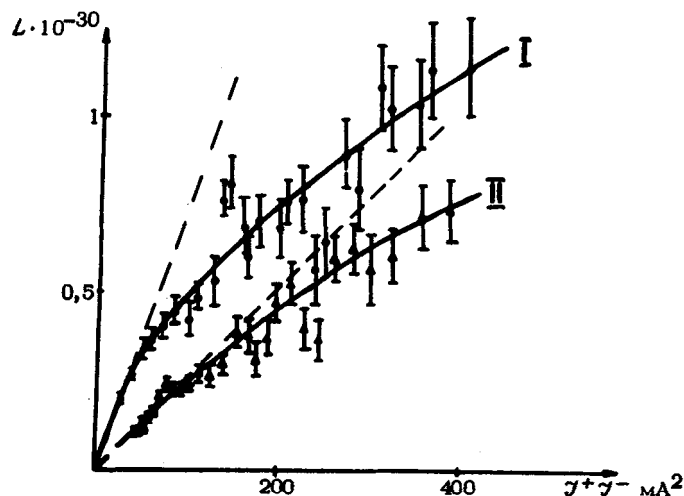


Рис. 4. Зависимость светимости от произведения токов встречных пучков для двух различных значений начальных вертикальных размеров (энергия 510 МэВ).

Тип места встречи	β_x (см)	β_x (см)	σ_x (мм)	σ_x (мм)	$\Delta \psi_x$ критическое
1	5,8	39	0,008	0,25	0,05
2	334	415	0,06	0,73	0,04
3	158	268	0,041	0,58	0,04
4	154	25	0,041	0,21	0,04

Если токи электронов и позитронов различаются не более чем на 20–30%, то увеличиваются поперечные размеры обоих пучков.

Максимальное значение светимости было получено в условиях, когда начальные вертикальные размеры пучков были подавлены специальными повернутыми квадрупольными, а самосогласованное увеличение вертикальных размеров в 2–3 раза происходило за счет эффектов встречи. Если же такие размеры создать введением связи, то светимость уменьшается (рис. 4). Пунктирные кривые экстраполировали бы значение светимости на область больших токов, если бы размеры пучков не увеличивались.

Приведем значения светимости для различных энергий:

E(МэВ)	200	380	510	620	670
$(10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1})$	0,01	0,25	1,2	1,5	1

Работы по увеличению светимости ведутся в нескольких направлениях. Во-первых, имеются предпосылки увеличить значение максимального сдвига частоты вертикальных бета-тронных колебаний при уменьшении γ_x -функции в области взаимодействия /7/. Другой способ связан с экспериментами по увеличению радиального эмиттанса пучков при воздействии на них шумовым возмущением. Третий способ рассчитан на организацию многосуступочного режима с разведением пучков в "ненужных" местах встречи.

5. Постановка экспериментов /8/. Для проведения экспериментов используются три экспериментальных промежутка.

Основная часть экспериментов выполнена на детекторе "ОЛЯ" с телесным углом $0,65 \times 4\pi$ стерадиан. Проведено подробное исследование области энергий от 2х380 до 2х670 МэВ. Изучено поведение сечений в реакциях $e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-, \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0 \pi^+ \pi^-$ и др. Полученные данные указывают на значительное отклонение от кривой Брайта-Вигнера в сечении образования двух π -мезонов в области энергий 1 200 МэВ.

Проведен цикл экспериментов по изучению радиационной поляризации. Для измерения степени поляризации была использована зависимость скорости потерь при внутреннем рассеянии от взаимной ориентации спинов взаимодействующих частиц. Полученные значения времени и степени поляризации совпадают с теоретическими.

Разработан метод абсолютной калибровки энергии с использованием резонансной деполяризации. Получена точность измерения абсолютного значения энергии $\leq 1 \cdot 10^{-4}$. Это позволило провести серию метрологических экспериментов. В частности, улучшена среднемировая точность измерения массы π -мезона. Проведен эксперимент по измерению массы заряженных каонов. В экспериментах по резонансной деполяризации одновременно электронного и позитронного пучков удалось провести сравнение аномальных магнитных моментов электрона и позитрона. Получена граница относительной разности $\frac{\Delta M'}{M'} \leq 1 \cdot 10^{-5}$ (прежнее значение составляло $\sim 1 \cdot 10^{-3}$).

Начаты эксперименты еще на двух других промежутках. На одном из них предполагается провести изучение формфакторов заряженных π -мезонов и K-мезонов. На другом установлен времяпролетный спектрометр с искровыми счетчиками для изучения формфактора заряженных π -мезонов вблизи порога рождения. В конце 1977 г. планируется установка детектора со сверхпроводящим магнитом.

6. **Синхротронное излучение.** На накопителе имеются три вакуумных канала для работы с синхротронным излучением. Спектр СИ накопителя ВЭПП-2М простирается от видимого света до мягкого рентгена (до 10 \AA). Каналы СИ оснащены спектрометрами скользящего и нормального падения с дифракционными решетками. В настоящее время на этой аппаратуре ведутся систематические исследования высоковозбужденных состояний простых молекул. Начаты работы по изучению многоэлектронных процессов при фотоионизации атомов.

Смонтирована установка для использования излучения накопителя в качестве абсолютного радиометрического стандарта в области длин волн от 700 до 3000 \AA .

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, В.Е.Балакин, Л.М.Барков, В.Н.Боровиков, И.Б.Вассерман, Э.И.Зинин, М.М.Карлинер, И.А.Кооп, А.А.Лившиц, А.П.Лысенко, С.И.Мишнев, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Э.М.Трахтенберг, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов. III Всесоюзное совещание по ускорителям, т. 1, "Наука", 1973, стр. 318.
2. И.Б.Вассерман, И.А.Кооп, В.П.Кутовой, А.П.Лысенко, С.И.Мишнев, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, В.Г.Шамовский, Ю.М.Шатунов. V Всесоюзное совещание по ускорителям, Москва, 1976 г.
3. С.Н.Середняков, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов. ЖТФ, т. 71, вып. 6, 1976, стр. 2025-2032.
4. В.Л.Ауслендер, Г.И. Будкер и др. Труды 7-й Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий. Ереван (1969), т. 2, стр. 26.
5. В.А.Гусев, М.Н.Захваткин и др. Система автоматического управления и контроля ускорительно-накопительным комплексом ВЭПП-2М. V Всесоюзное совещание по ускорителям. Москва, 1976.
6. F. Amman Int. Conf. on High-Energy Acceler. CERN (1971). p. 471.
7. И.Б.Вассерман и др. Изучение стохастических эффектов при взаимодействии встречных пучков. Доклад на настоящей конференции.
8. В.А.Сидоров. Результаты экспериментов на ВЭПП-2М; А.Н.Скринский. Радиационная поляризация: получение, управление, применение. Труды XVIII Международной конференции по физике высоких энергий, Тбилиси, 1976, т. 1, стр. В.13, В.22.