

## ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

*Д. Е. Беркаев<sup>a,b\*</sup>, Д. Б. Шварц<sup>a,b</sup>, П. Ю. Шатунов<sup>a</sup>, Ю. А. Rogovskiy<sup>a,b</sup>,  
А. Л. Романов<sup>a</sup>, И. А. Кооп<sup>a,b</sup>, Ю. М. Шатунов<sup>a,b</sup>, И. М. Землянский<sup>a</sup>,  
А. П. Лысенко<sup>a</sup>, Е. А. Переведенцев<sup>a,b</sup>, А. С. Станкевич<sup>a</sup>, А. И. Сенченко<sup>a</sup>,  
Б. И. Хазин<sup>a</sup>, А. В. Анисенков<sup>a</sup>, С. Е. Гаязов<sup>a</sup>, А. Н. Козырев<sup>a</sup>,  
А. Е. Рыжененков<sup>a</sup>, Д. Н. Шемякин<sup>a</sup>, Л. Б. Эпштейн<sup>a</sup>, С. И. Средняков<sup>a</sup>,  
П. М. Астигеевич<sup>a</sup>, Д. П. Коврижин<sup>a</sup>, К. А. Мартин<sup>a</sup>, А. Е. Образовский<sup>a</sup>,  
И. К. Сурин<sup>a</sup>, Л. В. Кардапольцев<sup>a</sup>, О. В. Беликов<sup>a,b</sup>, К. М. Горчаков<sup>a</sup>,  
А. Н. Кирпотин<sup>a</sup>, А. Н. Скринский<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
630090, Новосибирск, Россия*

<sup>b</sup> *Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 12 ноября 2010 г.

В 2007 г. в Институте ядерной физики (Новосибирск) было закончено строительство электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000. Первый пучок электронов был инжектирован в структуру ускорителя с выключенными соленоидами финального фокуса. Данный режим использовался как для настройки всех подсистем комплекса, так и для тренировки вакуумной камеры с помощью синхротронного излучения при токах электронов вплоть до 150 мА. Структура ВЭПП-2000 с малыми бета-функциями и частично включенными соленоидами была использована для первой проверки схемы «круглых пучков» на энергии 508 МэВ. Изучение эффектов встречи проводилось в «сильно-слабом» и «сильно-сильном» режимах. Измерения размеров пучков в обоих случаях показали зависимость, соответствующую предсказаниям модели для круглых сталкивающихся пучков. С помощью модернизированного детектора СНД (сферический нейтральный детектор) была проведена первая калибровка энергии коллайдера ВЭПП-2000 по измерению кривой возбуждения фи-мезонного резонанса, масса которого известна с высокой точностью из предыдущих экспериментов на ВЭПП-2М. В октябре 2009 г. на комплексе ВЭПП-2000 был установлен детектор КМД-3 (криогенный магнитный детектор) и начала выполняться физическая программа с обоими детекторами частиц СНД и КМД-3 в диапазоне энергий 1–1.9 ГэВ. Этот первый экспериментальный сезон закончился летом 2010 г. прецизионной калибровкой энергии методом резонансной деполаризации.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1974 г. электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2М в Новосибирске успешно работал в диапазоне энергий от порога рождения адронов до 1.4 ГэВ в с.ц.м. Двумя детекторами СНД (сферический нейтральный детектор) и КМД-2 (криогенный магнитный детектор) был набран интеграл светимости порядка  $74 \text{ пб}^{-1}$ . Это позволило детально изучить большинство каналов адронной

$e^+e^-$ -аннигиляции. С другой стороны, общее число полученных в других экспериментах событий в диапазоне энергий до 2 ГэВ, где реализуются возбужденные состояния обычных и странных кварков, не превосходило 10% данных, полученных с помощью ВЭПП-2М. Поэтому весной 2000 г. в ИЯФ СО РАН было принято решение о модернизации ускорительного комплекса ВЭПП-2М с целью повышения светимости до  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и увеличения максимальной энергии до  $2 \times 1 \text{ ГэВ}$ , что позволяет существенно расширить потенциал доступных на ком-

\*E-mail: D.E.Berkaev@inp.nsk.su

плексе экспериментов. Новый проект получил название ВЭПП-2000 [1].

Физическая программа коллайдера ВЭПП-2000 состоит в следующем:

- прецизионное измерение величины  $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ ;
- изучение адронных каналов аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow 2h, 3h, 4h, \dots, h = \pi, K, \eta$ ;
- изучение возбужденных состояний векторных мезонов  $\rho', \rho'', \omega', \varphi', \dots$ ;
- проверка гипотезы сохранения векторного тока (CVC test) — сравнение сечения аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \text{адроны} (T=1)$  со спектром распада  $\tau$ ;
- изучение электромагнитных формфакторов рождения пар нуклон-антинуклон, поиски  $n\bar{n}$ -резонансов;
- рождение адронов в процессе «радиационного возврата»;
- двухфотонная физика;
- проверка теории квантовой электродинамики для высших порядков  $2 \rightarrow 4, 5$ .

Для получения проектных параметров (энергии и светимости) была предложена концепция «круглых пучков» [2]. Главная особенность данной концепции — аксиальная симметрия удара от круглого встречного пучка. Совместно с  $x$ - $z$ -симметрией матрицы бетатронного движения между местами встречи это приводит к сохранению углового момента частиц ( $M = xz' - zx' = \text{const}$ ). Как следствие, это ведет к увеличению стабильности движения частиц даже с учетом нелинейных полей встречного сгустка.

Численное моделирование эффектов встречи в «сильно-слабом» (интенсивность первого сгустка много больше интенсивности второго, так что влиянием второго пучка на первый можно пренебречь) и «сильно-сильном» (интенсивность обоих сгустков примерно равна и нельзя пренебречь их взаимным влиянием друг на друга) приближениях подтвердило эти предположения [2, 3].

## 2. КОМПЛЕКС ВЭПП-2000

Ускорительный комплекс ВЭПП-2000 состоит из коллайдера ВЭПП-2000 и системы накопления и инжекции пучков, включающей накопитель-охладитель БЭП на энергию до 900 МэВ и каналы инжекции, рассчитанные на ту же энергию.

### Система накопления и инжекции

Система инжекции пучков в коллайдер ВЭПП-2000 позволяет накапливать в кольце

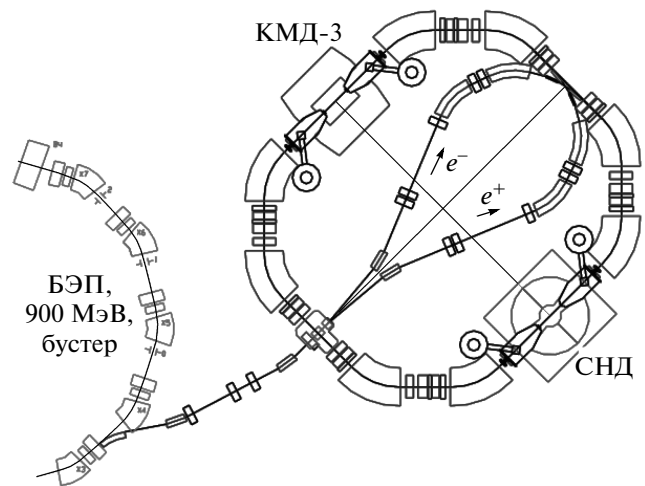


Рис. 1. Схема ВЭПП-2000

БЭП электронные и позитронные пучки до 200 мА ( $\sim 10^{11}$  частиц) с энергией до 900 МэВ. Эксперименты при энергии 900–1000 МэВ требуют подъема энергии пучков непосредственно в коллайдере ВЭПП-2000.

Инжекция в ВЭПП-2000 происходит в дальний от БЭП прямой промежуток с нулевой дисперсией в горизонтальной плоскости. Каналы инжекции [4] позволяют транспортировать  $10^8$ – $10^{11}$  частиц при энергиях 200–900 МэВ.

Инфлекторная система состоит из двух инфлекторных пластин и четырех коммутируемых генераторов (по два для электронов и позитронов) и предполагает накопление пучков с использованием предудара накопленного в ВЭПП-2000 пучка.

Эффективность транспортировки в экспериментах на ВЭПП-2000 достигала 95 %.

### Коллайдер ВЭПП-2000

Магнитная структура коллайдера ВЭПП-2000 [5] состоит из двух суперпериодов, обладающих зеркальной симметрией (см. рис. 1). Она включает два экспериментальных промежутка, предназначенных для установки детекторов (3 м), две прямые секции (2.5 м), предназначенные для инжекции и ВЧ-резонатора, и четыре коротких технических промежутка с четырьмя триплетами квадрупольных линз в них. Каждый триплет вместе с двумя поворотными магнитами с полем 24 кГс представляет собой ахроматический поворот на  $90^\circ$ .

Финальная фокусировка пучков в кольце ВЭПП-2000 выполняется с помощью пары сверхпроводящих соленоидов с полем 130 кГс, которые

**Таблица.** Основные параметры коллайдера ВЭПП-2000 при энергии 1000 МэВ

Параметр	Значение
Периметр, П	24.39 м
Бетатронные функции в местах встречи, $\beta_{x,z}^*$	10 см
Бетатронные частоты, $\nu_{x,z}$	4.1, 2.1
Эмиттансы, $\varepsilon_{x,z}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$ м · рад
Коэффициент уплотнения орбит, $\alpha$	0.036
Синхротронная частота, $\nu_s$	0.0035
Разброс энергий, $\sigma_{\Delta E/E}$	$6.4 \cdot 10^{-4}$
Частота ВЧ	172 МГц
Номер гармоники ВЧ, $q$	14
Напряжение ВЧ, $U$	100 кВ
Число частиц в пучке, $N$	$10^{11}$
Параметр пространственного заряда, $\xi_{x,z}$	0.075
Светимость, $L$	$10^{32}$ см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>

расположены симметрично вокруг каждого из двух мест встречи и обеспечивают равные и малые поперечные размеры сгустков.

Основные параметры коллайдера приведены в таблице.

При включении соленоидов возможны несколько комбинаций их полярностей, например (+ + - -) и (+ + + +), которые обеспечивают поворот плоскости бетатронных колебаний на 90° при прохождении через промежуток встречи. В этом случае радиационные эмиттансы двух нормальных бетатронных мод, возбуждаясь в двух идентичных арках кольца, будут равными ( $\varepsilon_x = \varepsilon_z$ ), что вместе с равными бетатронными частотами мод удовлетворит всем требованиям концепции круглых пучков. Однако самый простой вариант оптики (+ - + -) также не противоречит требованиям концепции, если рабочая точка выбрана на резонансе связи бетатронных колебаний.

#### *Сверхпроводящие соленоиды*

Каждый соленоид состоит из двух частей: главной с полем 130 кГс и длиной 50 см и так называемого «антисолоноида», с полем 80 кГс и длиной

10 см. В свою очередь, главная часть состоит из двух идентичных половин, каждая из которых имеет внутреннюю секцию с намоткой Nb<sub>3</sub>Sn-проводом и внешнюю секцию из NbTi-провода. Для питания каждого соленоида используются три независимых источника тока: для внутренней и внешней секций и секции антисолоноида. Все три сверхпроводящие катушки заключены в магнитное ярмо, расположенное в общем криостате с жидким гелием.

### **3. ВОЗМОЖНОСТИ СТРУКТУРЫ КОЛЛАЙДЕРА**

Магнитная система ВЭПП-2000, несмотря на предельную компактность ее элементов, обладает достаточной гибкостью для реализации нескольких электронно-оптических схем фокусировки. Все они оказались весьма полезными при настройке и дальнейшей работе над физической программой.

#### *Режим с выключенными соленоидами*

На первом этапе запуска оптика коллайдера ВЭПП-2000 была сильно упрощена и приведена к обычной структуре без соленоидов. Такая так называемая «мягкая» оптика (частоты бетатронных колебаний, нормированные на частоту обращения, равны  $\nu_x = 2.4$ ,  $\nu_z = 1.4$ ) существенно отличается от оптической схемы с круглыми пучками. Тем не менее, поведение огибающих бетатронных колебаний ( $\beta_x$  и  $\beta_z$ ) на участке инжекции весьма близко к проектному и имеет подходящие набегу бетатронных фаз между местом впуска и инфлектором. Использование оптики в режиме без соленоидов возможно только ниже 600 МэВ по энергии из-за ограничения градиентов слабых фокусирующих линз в экспериментальных промежутках.

Мягкая оптика использовалась для первого захвата пучков в кольцо, настройки коэффициента перепуска частиц, калибровки системы наблюдения за пучком, а также для тренировки (обезгаживания) вакуумной камеры синхротронным излучением электронов.

Для начала работы с круглыми пучками в первую очередь нужно было провести механическую юстировку охлажденных до температуры жидкого гелия сверхпроводящих соленоидов, подвешенных внутри криостатов. Это также было сделано в режиме «мягкой оптики» при помощи измерений искажения равновесной орбиты пучка при включении соленоида в качестве слабого возмущения.

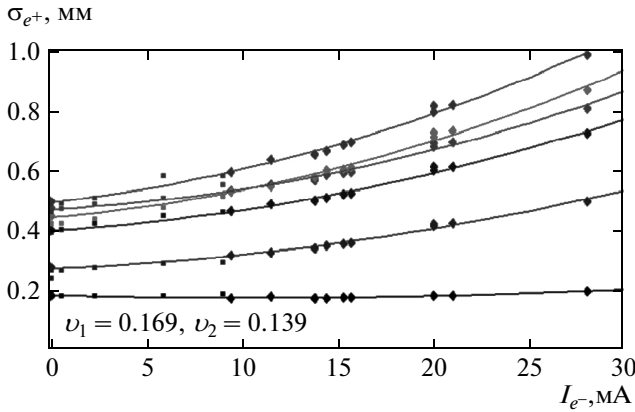


Рис. 2. Экспериментальные зависимости размеров пучка от встречного тока

*Режим с короткими соленоидами*

Конструктивное разделение фокусирующих соленоидов на три секции позволяет оптимально подбирать продольное распределение поля в зависимости от энергии пучков. Так, например, при энергии 500 МэВ (фи-мезонный резонанс) из двух половин главной части соленоида можно использовать только одну, ближайшую к месту встречи, но с более сильным полем. При этом бета-функции в обоих местах встречи  $\beta_x = \beta_z = \beta^* = 4.5$  см. Такая оптика в простейшем режиме круглых пучков (+ - +-) и была использована в первых экспериментах с круглыми пучками в 2008 г. Измерения размеров сталкивающихся круглых пучков в зависимости от тока встречного пучка в «сильно-слабом» и «сильно-сильном» режимах работы показали результаты, весьма близкие к результатам численного моделирования [6]. На рис. 2 представлены экспериментально измеренные зависимости поперечного размера слабого позитронного пучка от встречного тока электронного пучка на различных азимутах кольца ВЭПП-2000. Нижняя кривая отображает горизонтальный размер в месте, где горизонтальная бета-функция имеет минимум в поворотном магните, т. е. ведет себя аналогично бета-функции в месте встречи. Этот график демонстрирует практическое отсутствие зависимости размера пучка от встречного тока, что подтверждает теоретические расчеты и результаты моделирования.

Светимость, задаваемая формулой

$$L = \frac{4\pi\gamma^2 f_0}{r_e} \frac{\varepsilon}{\beta^*} \xi^2, \tag{1}$$

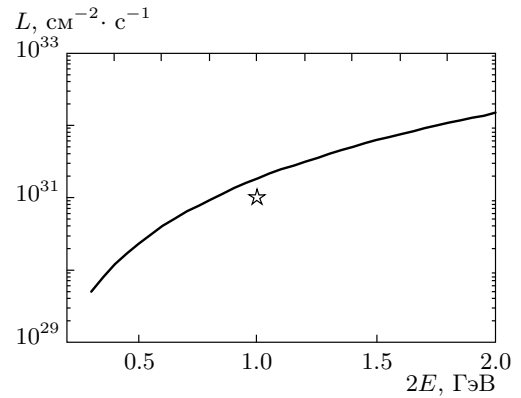


Рис. 3. Зависимость светимости от энергии и достигнутое значение

где  $f_0$  — частота столкновений,  $r_e = 2.81794 \cdot 10^{-13}$  — классический радиус электрона,  $\xi$  — параметр пространственного заряда, выражающий силу электромагнитного взаимодействия встречных сгустков, достигала  $1 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (см. рис. 3), а параметр пространственного заряда, определяемый выражением

$$\xi = \frac{Nr_e\beta^*}{4\pi\gamma\sigma_0^2}, \tag{2}$$

при этом достигал значения порядка 0.1.

*Режим с полными соленоидами*

Работа на высоких энергиях требует использования полной длины соленоидов. Эта оптика соответствует почти в два раза большей бета-функции в месте встречи — 8.5 см, в то время как эмиттансы пучка практически те же самые. Это означает, что для тех же токов пучков светимость (см. формулу (1)) должна снизиться примерно в два раза.

В начале 2010 г. детектор КМД-3 был готов для проведения экспериментов. После его установки на кольцо ВЭПП-2000 совместно с соленоидами финального фокуса потребовалось включение антисоленоидов для компенсации продольного поля этого детектора ( $B = 10$  кГс,  $L_B = 1$  м).

С этого времени ВЭПП-2000 работал в простом режиме круглых пучков, т. е. при соленоидах, включенных навстречу друг другу в каждом месте встречи (+ - +-) . Это соответствует обычным модам бетатронного движения: горизонтальной и вертикальной везде, кроме экспериментального промежутка, в котором они развернуты на большой угол (примерно  $\pi/4$ ). Равные эмиттансы, необходимые для концепции круглых пучков, образуются благодаря малой, но конечной связи бетатронных колебаний

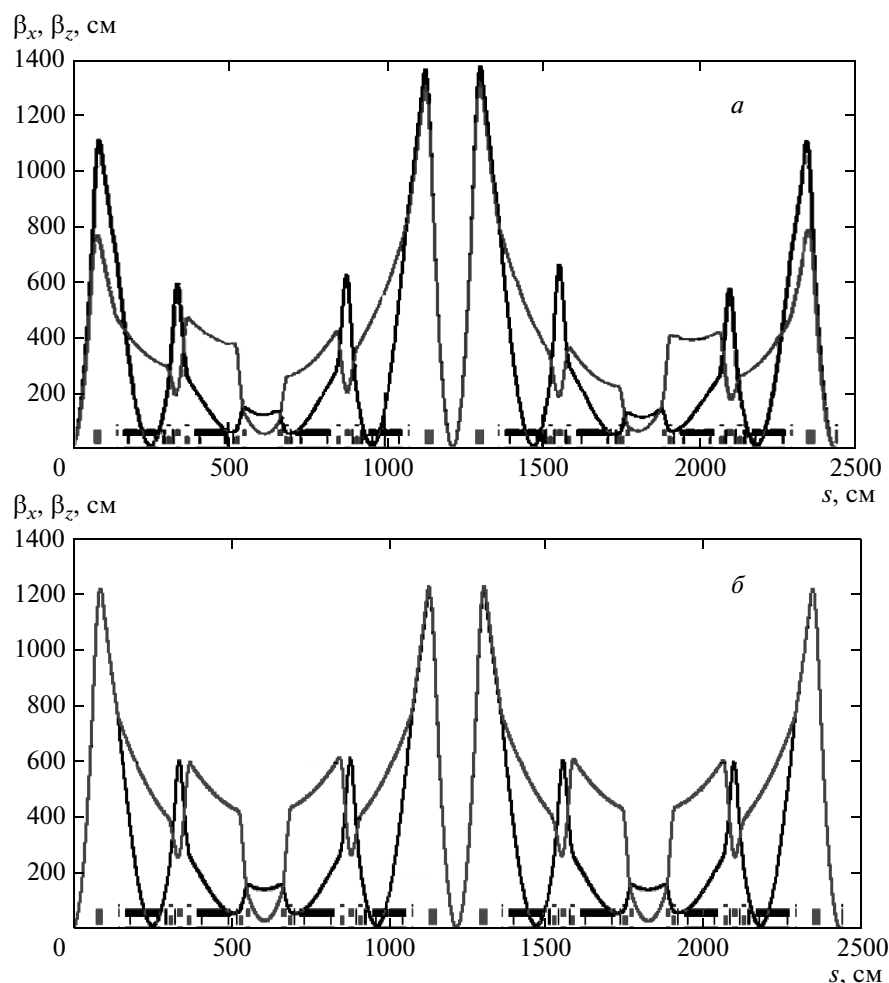


Рис. 4. Оптические функции  $\beta_x$  (черные линии),  $\beta_z$  (серые), измеренные методом анализа матриц отклика до (а) и после (б) процедуры коррекции в зависимости от координаты  $s$  вдоль кольца

(расщепление частот  $\delta\nu \approx 0.001-0.002$ ) и резонансу  $\nu_x - \nu_z = 2$ , на который настроена рабочая точка ВЭПП-2000. В дальнейшем, несмотря на ожидаемые трудности, связанные с малой динамической апертурой, планируется при изучении ВЭПП-2000 перейти к другим схемам полярностей соленоидов:  $(++--)$  и  $(++++)$ .

#### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ ОТКЛИКОВ

В экспериментах на коллайдере ВЭПП-2000 широко применяется методика анализа матриц отклика орбиты. Она была использована еще в «мягкой» оптике для измерения положения и юстировки сверхпроводящих соленоидов. Однако точность измерений координат и углов не превосходила соот-

ветственно 0.1 мм и 1 мрад. Более точные эксперименты по измерению и корректированию положения соленоидов методом анализа матриц отклика были проведены уже в режиме круглых пучков [7].

Другое типичное применение процедуры анализа матриц отклика — измерение и коррекция искажений замкнутой орбиты в кольцах БЭП и ВЭПП. Варьируя градиенты всех квадрупольных линз последовательно, можно измерить искажения замкнутой орбиты в них, сравнивая их с модельными значениями.

Применение метода сингулярного разложения для обращения матрицы отклика также позволяет минимизировать токи в катушках коррекций для конкретной замкнутой орбиты. Это существенно для оптимизации динамической апертуры, поскольку большинство дипольных корректоров совмещены

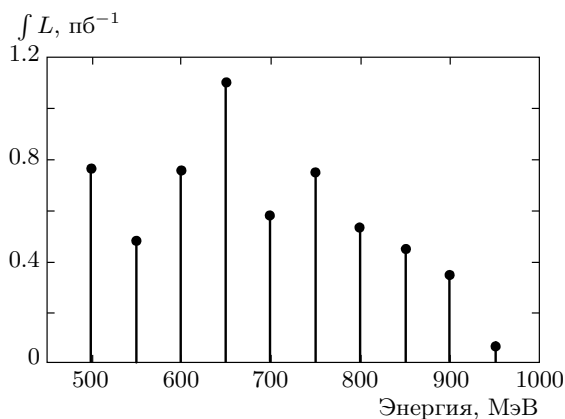


Рис. 5. Интеграл светимости, набранный детектором СНД

с квадрупольными линзами и поэтому имеют сильные нелинейные компоненты поля.

Наконец, анализ откликов орбиты на вариацию дипольных коррекций стал рутинным, но весьма мощным инструментом для коррекций самой структуры ВЭПП-2000 [7, 8]. На рис. 4 представлена оптика коллайдера для структуры с малыми бета-функциями в месте встречи до и после проведения четвертой итерации данной процедуры.

### 5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДЕТЕКТОРАМИ СНД И КМД-3

Первый эксперимент по набору интеграла светимости с двумя детекторами СНД и КМД-3 стартовал в конце 2009 г. Было сделано первое грубое сканирование по энергии в диапазоне от 500 до 950 МэВ (энергия одного пучка). Общий интеграл светимости, набранный обоими детекторами, составил  $\int L \sim 10$  пб<sup>-1</sup>. На рис. 5 представлен интеграл светимости, набранный детектором СНД в каждой точке по энергии. Интеграл, набранный детектором КМД-3 примерно в 1.6 раза меньше.

Несмотря на то что пиковая светимость для заданного параметра пространственного заряда (3) должна быстро расти с увеличением энергии ( $L \propto \varepsilon\gamma^2$ ), в настоящее время существует несколько ограничений, которые не позволяют достичь максимальных токов при высоких энергиях. Главное из них — это недостаток скорости производства позитронов старой системой инжекции (часть комплекса ВЭПП-2М). Данное препятствие будет устранено после ввода в эксплуатацию в ИЯФ СО РАН инжекционного комплекса ВЭПП-5. В итоге максимальная светимость уменьшалась с ростом энергии

с  $1 \cdot 10^{31}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> при 500 МэВ до  $1.5 \cdot 10^{30}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> при 950 МэВ. Проектная светимость может быть достигнута только после модернизации БЭП до энергии 1 ГэВ. Такая модернизация в ИЯФ СО РАН уже начата.

Одной из задач физической программы коллайдера ВЭПП-2000 является изучение рождения нуклон-антинуклонных пар. В результате проведения экспериментов на ВЭПП-2000 ожидается, что будет существенно улучшена точность измерения нейтронного формфактора на пороге и, благодаря хорошему угловому разрешению, будут измерены по отдельности электрический и магнитный формфакторы нейтрона, а также будет проведен поиск связанных  $n\bar{n}$ -состояний вблизи порога.

За время эксперимента при светимости  $L = 10^{32}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> ожидается набрать  $10^5$  событий изучаемого процесса при ожидаемой величине сечения 0.7 нб на пороге, что примерно в 100 раз превышает число событий, имеющих на сегодняшний день по данному процессу.

Поскольку рождающиеся нейтрон-антинейтронные пары являются нерелятивистскими, наилучшим способом подавления фона является использование времяпролетной методики. Значение времени пролета антинейтрона до первого слоя калориметра при его кинетической энергии 5 МэВ составляет приблизительно 8 нс. При такой кинетической энергии практически все антинейтроны аннигилируют в первом слое кристаллов NaJ, так как их эффективная длина аннигиляции при данной энергии равна 5 см, что примерно в два раза меньше толщины кристаллов первого слоя.

Часть статистических данных, полученных в экспериментах на ВЭПП-2000, записана при энергии выше порога рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар. В настоящее время идет обработка событий, набранных обоими детекторами СНД и КМД-3. Первой задачей обработки является измерение физического фона, которым являются все события с рождением многих частиц.

На рис. 6 изображен один из многочисленных «кадров», записанных детектором КМД-3. В трековой камере детектора видны траектории разлета рожденных частиц в магнитном поле детектора.

Предварительным результатом обработки набранной статистики являются измерения сечений с множественным рождением пионов. Одно из таких измерений, а именно сечение рождения четырех  $\pi$ -мезонов, представлено на рис. 7.

Изучение физического фона уже позволило приступить к поиску среди полезных «кадров» собы-

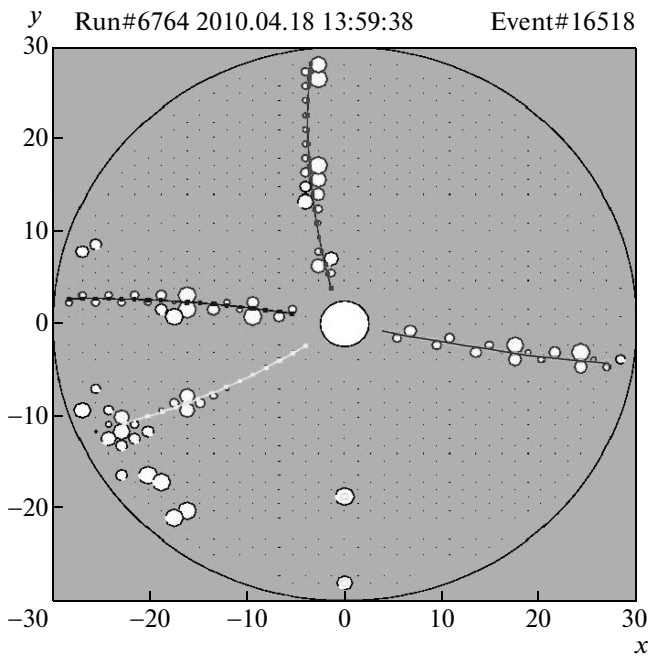


Рис. 6. Треки частиц в центральной части детектора КМД-3

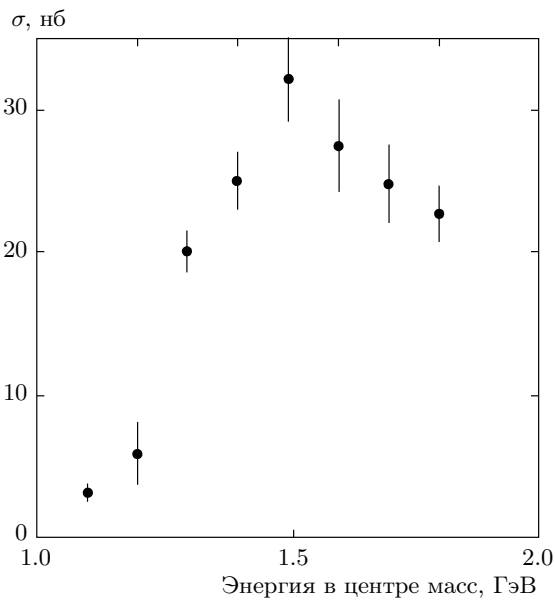


Рис. 7. Сечение рождения четырех  $\pi$ -мезонов при разных энергиях. Данные детектора СНД. Предварительные результаты

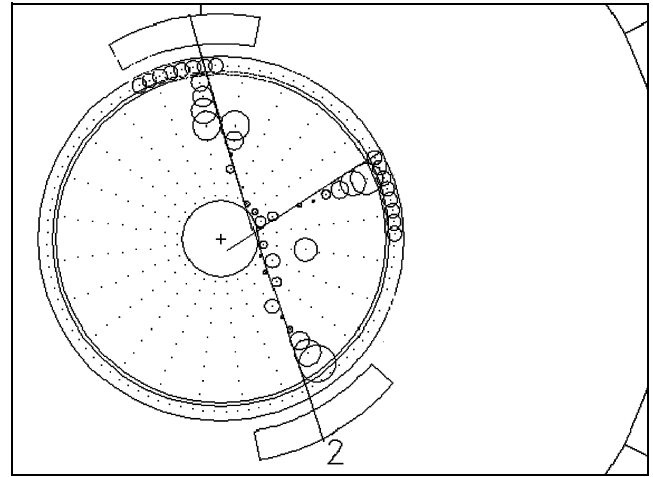


Рис. 8. Одно из событий рождения протона и антипротона

тий, удовлетворяющих критериям отбора для протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар. Одно из таких событий показано на рис. 8. Полное число «кадров» с рождением нуклонов в набранной статистике ожидается в районе нескольких сотен. Этого количества, конечно, недостаточно для точного измерения всех параметров данных процессов. Но это уже позволяет изучить характеристики детекторов, необходимых для измерения процессов рождения протон-антипротонных и нейтрон-антинейтронных пар.

### 6. КАЛИБРОВКА ЭНЕРГИИ

Требования к точности измерения энергии пучков в экспериментах такие, что  $\Delta E/E \leq 10^{-4}$ . Все поворотные магниты ВЭПП-2000 оснащены двумя измерителями магнитного поля на основе ядерного магнитного резонанса (датчик ЯМР). Сами по себе датчики имеют высокую точность, а их измерения показывают высокую стабильность магнитного поля ( $\sim 10^{-5}$ ). В то же время они расположены в магнитном зазоре, но за пределами вакуумной камеры в стороне от орбиты пучка. Грубая калибровка датчиков ЯМР была проделана на основе данных о магнитных измерениях диполей ВЭПП-2000. Для более точной калибровки энергии на ВЭПП-2000 используются два метода.

#### *Фи-мезон*

Масса фи-мезона известна с высокой точностью:  $M_\varphi = 1019.455 \pm 0.020$  МэВ [9]. Таким образом, первая абсолютная калибровка энергии ВЭПП-2000 бы-

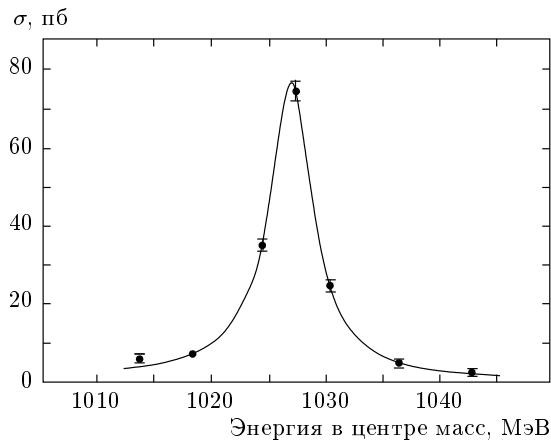


Рис. 9. Резонанс фи-мезона до калибровки энергии (данные группы СНД).  $e^+e^- \rightarrow 3\pi$

ла проведена в эксперименте по измерению положения пика резонанса фи-мезона с помощью детектора СНД. Этот эксперимент показал ошибку калибровки энергии, сделанную по датчикам ЯМР в 3.5 МэВ (см. рис. 9).

Повторные эксперименты по измерению положения пика резонанса фи-мезона показали расхождение менее, чем 0.2 МэВ.

#### Резонансная деполяризация

Для прецизионного измерения энергии применяется так называемый метод резонансной деполяризации. Два счетчика рассеянных частиц располагаются внутри и снаружи кольца в плоскости орбиты пучка в одном из технических промежутков. На больших энергиях основной вклад в скорость выживания частиц из пучка дает так называемое внутрипучковое рассеяние (эффект Тушека). Сравнение времен жизни пучка для случаев одного и двух сгустков, но с тем же общим числом частиц показывает, что внутрипучковое рассеяние дает 80 % потерь частиц при энергии 800 МэВ. Более того, для повышения точности путем регистрации совпадений событий на внутреннем и внешнем датчиках проводился отбор только «чистых» событий рассеяния. Поскольку эффект Тушека имеет зависимость от поляризации пучка, в момент разрушения поляризации должен происходить скачок в скорости счета. Для управляемого разрушения поляризации предназначен высокочастотный деполяризатор на полосковых линиях, установленный в инжекционном промежутке ВЭПП-2000. Частота, на которой происходит деполяризация, однозначно связана с энергией пучка, поэтому, определяя момент скачка счета рассея-

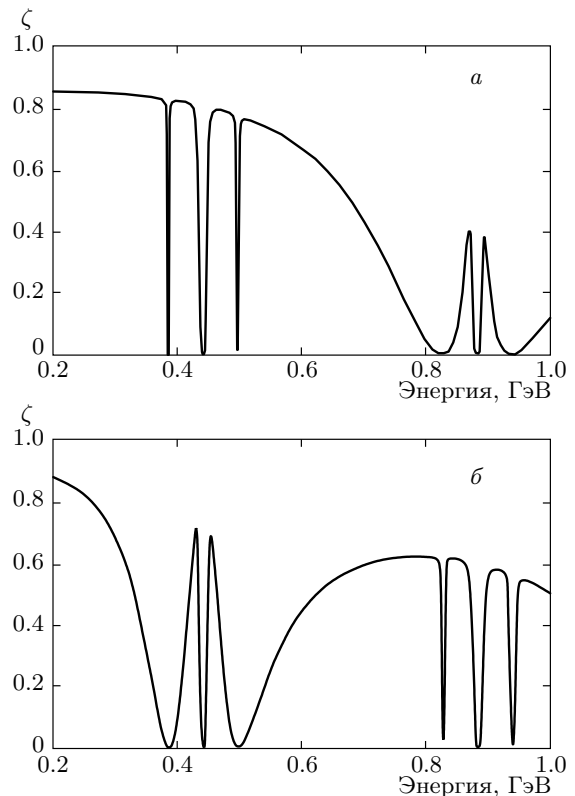


Рис. 10. Расчетные зависимости степени поляризации от энергии пучка для соленоидов, настроенных на низкую (а) и высокую (б) энергии

ных частиц при сканировании частотой деполяризатора, можно с высокой точностью вычислить энергию частиц в кольце.

В соответствии с расчетами [10] скачок скорости счета зависит от соотношения эмиттансов и подавлен в случае круглых пучков по отношению к случаю плоских. Таким образом, эксперименты по калибровке энергии проводились на плоском пучке (противоположная поляриность соленоидов в каждом месте встречи; бетатронные частоты вдали от резонанса связи; бетатронная связь подавлена при помощи системы скью-квадрупольных коррекций). Для экспериментов был выбран позитронный пучок, для того чтобы избежать сложностей, связанных с искажением параметров пучка из-за фокусировки ионами, накапливающимися на равновесной орбите пучка за время поляризации. Время радиационной поляризации при энергии 750 МэВ составило примерно 45 мин.

Численное моделирование, проведенное в программе ASPIRRIN [11], показало значительные различия в степени поляризации для различных схем



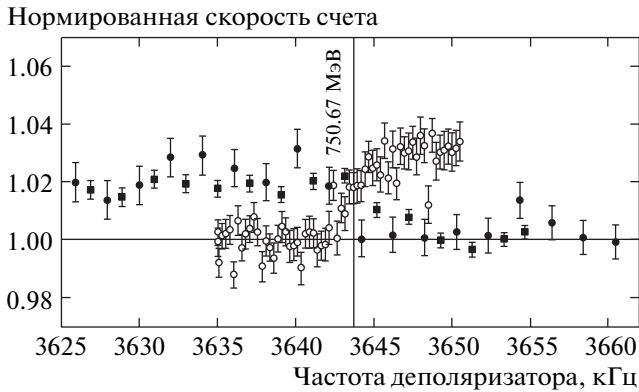


Рис. 11. Скачок скорости счета

включения соленоидов. На рис. 10а показана расчетная степень поляризации для схемы (+ - + -). Данная схема предполагает вторую гармонику продольного поля, которая приводит к сильному целому спиновому резонансу на энергии 880 МэВ, который разрушает поляризацию при данной энергии. Таким образом, данная схема пригодна лишь для поляризационных экспериментов на малой энергии. Узкий резонанс на 440 МэВ с двумя бетатронными сателлитами проявляется при расстройке соленоидов ( $\Delta B_s/B \sim 10^{-3}$  на рис. 10), которая неизбежна в реальных экспериментах. Другая схема (+ - - +) генерирует первую гармонику продольного поля и позволяет достичь 60% поляризации в диапазоне энергии 700–800 МэВ (см. рис. 10б). Данная схема и применялась для экспериментов по калибровке на энергии 750 МэВ.

Результаты, объединяющие три таких эксперимента, представлены на рис. 11. Как видно из этого рисунка, (2.5–3)%-ый скачок скорости счета происходит на энергии  $750.67 \pm 0.03$  МэВ.

Планируется продолжить эксперименты по калибровке энергии коллайдера ВЭПП-2000 методом резонансной деполяризации.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизированный в ИЯФ СО РАН коллайдер ВЭПП-2000 приступил к физической программе и сбору данных с помощью двух современных детекторов: СНД и КМД-3. Все системы комплекса были проверены в экспериментах на энергии вплоть до 950 МэВ.

Были экспериментально апробированы различные варианты электронной оптики коллайдера: техническая «мягкая» оптика; круглый пучок с  $\beta^* = 8.5$  см и введенным магнитным полем детекто-

ра КМД-3; малые бета-функции для более высокой светимости; плоский пучок для применения метода резонансной деполяризации.

Экспериментальные результаты изучения эффектов круглых встречных пучков подтвердили предсказания поведения размеров пучков в «слабо-сильном» и «сильно-сильном» режимах работы. В «слабо-сильном» режиме достигнут параметр пространственного заряда  $\xi = 0.1$ . Пиковая светимость  $L = 1 \cdot 10^{31}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> была получена при энергии 500 МэВ при токах  $I^+ \times I^- = 40 \times 40$  мА<sup>2</sup>. Для достижения проектной светимости на энергии 1 ГэВ требуются как новый инжектор позитронов, так и модернизация кольца БЭП. В настоящий момент эти работы ведутся в ИЯФ СО РАН.

На ВЭПП-2000 проведена прецизионная калибровка системы измерения энергии. Датчики ЯМР откалиброваны по положению пика резонанса фи-мезона и первым экспериментам по резонансной деполяризации.

Детекторы СНД и КМД-3 приступили к сбору экспериментальных данных на коллайдере ВЭПП-2000.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-01060-а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yu. M. Shatunov et al., in *Proc. of the EPAC 2000*, Vienna (2000), p. 439.
2. V. V. Danilov et al., in *Proc of the EPAC 1996*, Sitges (1996), Vol. 2, p. 1149.
3. A. A. Valishev et al., in *Proc. of the PAC 2003*, Oregon (2003), p. 3398.
4. D. E. Berkaev et al., in *Proc. of the EPAC 2006*, Edinburgh (2006), p. 622.
5. P. Yu. Shatunov et al., in *Proc. of the EPAC 2006*, Edinburg (2006), p. 628.
6. D. E. Berkaev et. al., in *Proc. of the EPAC 2008*, Genoa (2008), p. 956.
7. A. L. Romanov et al., in *Proc. of the IPAC 2010*, Kyoto (2010), p. 4542.
8. A. L. Romanov et al., in *Proc. of the RuPAC 2008*, Zvenigorod (2008), p. 64.
9. Particle Data Group (PDG), <http://pdg.lbl.gov/>.
10. V. M. Strakhovenko, arXiv:0912.5429 [physics.acc-ph].
11. E. A. Perevedentsev, Yu. M. Shatunov, and V. Ptitsin, *AIP Conf. Proc.* **675**, 761 (2003).