

## НАЧАЛО РАБОТЫ ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000

*Ю. Шатунов<sup>1</sup>, О. Беликов, Д. Беркаев, К. Горчаков, Ю. Жаринов,  
И. Землянский, А. Касаев, А. Кирпотин, И. Кооп, А. Лысенко,  
С. Мотыгин, Е. Переведенцев, В. Просветов, Д. Рабусов, Ю. Роговский,  
А. Сенченко, М. Тимошенко, Д. Шатилов, П. Шатунов, Д. Шварц*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 работает в ИЯФ СО РАН с 2010 г. Применение концепции круглых пучков позволило получить рекордный параметр пространственного заряда  $\xi \sim 0,12$ . Проведение модернизации ВЭПП-2000, включающее подключение к новому инжекционному комплексу ИЯФ, доработку бустера БЭП и каналов перепуска в ВЭПП-2000 для работы на энергии 1 ГэВ, существенно увеличило светимость установки. Продолжается работа по набору статистики.

The electron–positron collider VEPP-2000 has been operating at BINP since 2010. The application of round colliding beams concept allowed us to reach record value of beam–beam parameter  $\xi \sim 0.12$ . Modernization of VEPP-2000 complex, including connection to new BINP Injection Complex, modification of booster BEP and BEP–VEPP-2000 transfer channels to work at 1 GeV, resulted in significant increase in luminosity. Work on data collection with detectors is in progress.

PACS: 29.20.db; 29.27.Ac; 29.27.Fh

### 1. ОБЗОР ВЭПП-2000

Коллайдер ВЭПП-2000 (рис. 1) работает с двумя детекторами СНД и КМД-3 в диапазоне энергий 150–1000 МэВ [1, 2]. Основные параметры установки приведены в таблице.

Для увеличения светимости на ВЭПП-2000 используется концепция круглых пучков [3]: аксиальная симметрия силы взаимодействия встречных пучков вместе с  $x$ – $y$  симметрией матрицы преобразования создают дополнительный интеграл движения  $M_z = x'y - xy'$ . При этом динамика частиц остается нелинейной, но становится одномерной. Этот подход позволяет существенно увеличить предел по пространственному заряду встречных пучков [4]. Круглые пучки предполагают равные и малые  $\beta$ -функции в месте встречи, равные эмиттансы и дробные части бетатронных частот.

---

<sup>1</sup>E-mail: Yu.M.Shatunov@inp.nsk.su

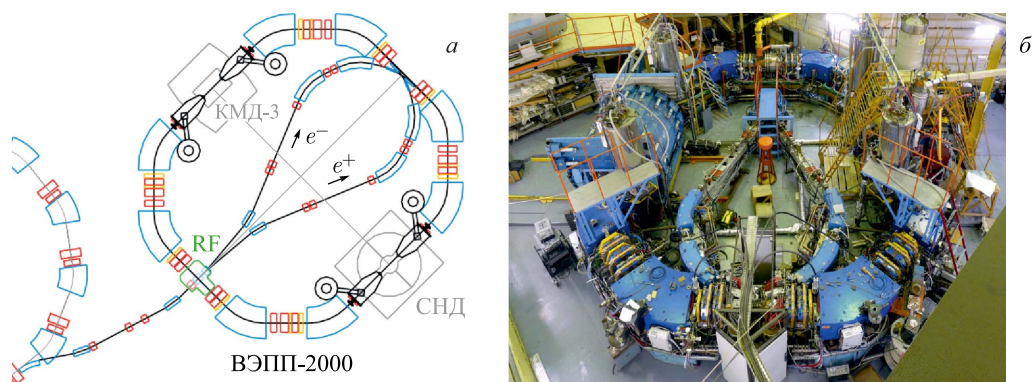


Рис. 1. Схема (а) и фото (б) коллайдера ВЭПП-2000

### Основные параметры ВЭПП-2000 на энергии 1 ГэВ

Параметр	Значение
Периметр, м	24,388
Диапазон энергии, ГэВ	150–1000
Число сгустков	$1 \times 1$
Число частиц в сгустке	$1 \cdot 10^{11}$
Бетатронные частоты	4,1/2,1
Бета-функции в месте встречи, см	8,5
Параметр пространственного заряда	0,1
Светимость, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1 \cdot 10^{32}$

Выполнение концепции на ВЭПП-2000 обеспечивается размещением двух пар 13-Тл сверхпроводящих соленоидов финального фокуса в двух экспериментальных пролетах, симметрично по отношению к местам встречи. Было обнаружено, что только «плоская» комбинация полярностей соленоидов (+ - +- и + - -+) может обеспечить достаточную динамическую апертуру для проведения экспериментов.

## 2. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ВЭПП-2000

Экспериментальная программа [5, 6] включает в себя:

- 1) прецизионное измерение параметра  $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ ;
- 2) изучение конечных состояний адронов  $e^+e^- \rightarrow 2h, 3h, 4h, K$   $h = \pi, K, \eta$ ;
- 3) изучение векторных мезонов  $\rho', \rho'', \omega', \phi', K$ ;
- 4) сравнение сечений  $e^+e^- \rightarrow \text{адроны} (T = 1)$  со спектральными функциями  $\tau$ -распадов;
- 5) изучение электромагнитного формфактора нуклонов на пороге рождения  $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}, n\bar{n}$ ;
- 6) измерение сечений с использованием ISR;
- 7) изучение QED-процессов высоких порядков.

Необходимый интеграл светимости составляет  $1 \text{ фб}^{-1}$ . Еще одна важная экспериментальная задача для ВЭПП-2000 — изучение адронного вклада в величину  $(g - 2)$  мюона. Для этих экспериментов нужна абсолютная калибровка энергии на уровне  $10^{-4}$  во всем диапазоне энергий.

### 3. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ВЭПП-2000

К моменту остановки на модернизацию в 2013 г. на ВЭПП-2000 был набран интеграл светимости по  $60 \text{ пб}^{-1}$  на детектор, пиковая светимость на энергии 900 МэВ составила  $2,5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , получено рекордное значение параметра пространственного заряда  $\xi = 0,12$  на одно место встречи. В разных диапазонах энергии мы сталкивались с различными ограничениями максимально достижимой светимости: это эффект flip-flop на средних энергиях; дефицит позитронов выше 500 МэВ; необходимость доускорять пучок в кольце ВЭПП-2000 на энергиях выше 800 МэВ. Для решения двух последних проблем проведена модернизация, которая включает в себя: подключение к инжекционному комплексу (ИК), апгрейд бустера БЭП и каналов перепуска, модификации в ВЭПП-2000.

Подключение к ИК (рис. 2) позволило получить охлажденные пучки электронов и позитронов высокой интенсивности (до 100 мА) с высокой частотой повторения на высокой энергии (400 МэВ). Хорошее качество пучка из ИК дало возможность провести модернизацию БЭП — уменьшить апертуру и поднять максимальную энергию до 1 ГэВ [7]. Это привело к необходимости переделки каналов перепуска БЭП-ВЭПП-2000 и небольшим изменениям в кольце ВЭПП-2000.

В январе 2016 г. пучок электронов с энергией 390 МэВ из ИК был проведен по каналу транспортировки К-500 до ускорительного комплекса ВЭПП-2000 и захвачен в БЭП. В июне 2016 г. был получен захват позитронного пучка из ИК. Достигнутый темп накопления (рис. 3) составил  $2 \cdot 10^8 e^+/\text{с}$  на энергии 390 МэВ, что на порядок превышает возможности прежней системы конверсии. После настроек и оптимизации БЭП стабильно работает с пучками на энергии до 1 ГэВ.

В кольце БЭП был установлен новый ВЧ-резонатор (110 кВ, 174,382 МГц); проведена переделка магнитов для возможности работы на энергии 1 ГэВ (изменение профиля полюсов, уменьшение апертуры и подъем питающего тока до 10 кА). Проведена работа по модификации полюсов и ярма квадруполь для согласования с кривой насыщения диполей и усиления секступольной компоненты. Вакуумная камера БЭП локально деформирована под новые апертуры магнитных элементов. Для выпуска из БЭП установлены новые импульсные С-образные шихтованные магниты ВУМР. Также сделан вывод синхротронного излучения для совместных экспериментов с ЦЕРН.

Для инжекции на 1 ГэВ в ВЭПП-2000 были установлены новые вакуумные камеры в двух дипольных магнитах с дополнительными инфлекторными пластинами. Также в

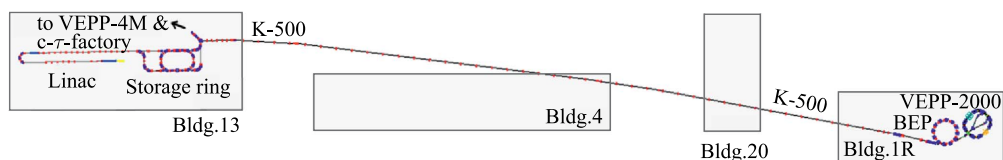


Рис. 2. Схема модернизированного комплекса ВЭПП-2000

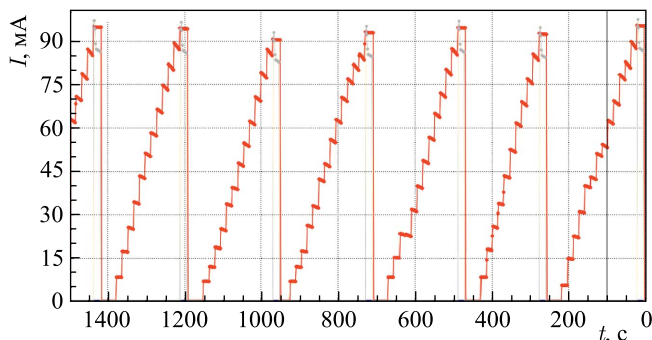


Рис. 3. Циклы накопления позитронов в БЭП и выпуска в ВЭПП-2000

кольцо был установлен еще один скрепер. Еще одной важной работой на ВЭПП-2000 стала замена зеркал вывода СИ для диагностики пучков. Новая конструкция зеркала позволит работать с большим током пучка на энергии до 1 ГэВ.

#### 4. РАБОТА ВЭПП-2000 ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

После модернизации [8] и настройки устойчивой работы с ИК на ВЭПП-2000 продолжился набор интеграла светимости. Первый этап был посвящен работе на высокой

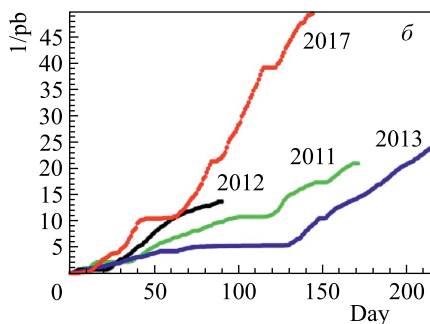
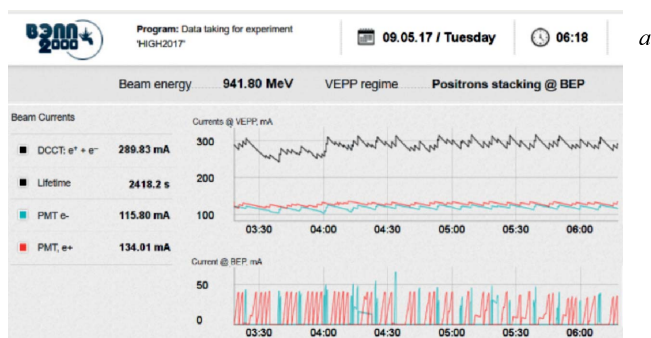


Рис. 4. а) Измерение в реальном времени токов пучков в БЭП и ВЭПП-2000. б) Интеграл светимости по данным КМД-3

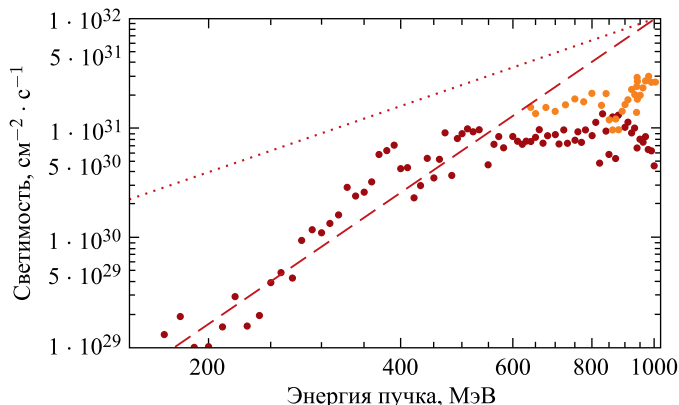


Рис. 5. Достигнутая средняя светимость на КМД-3. Светлые точки показывают светимость после модернизации комплекса

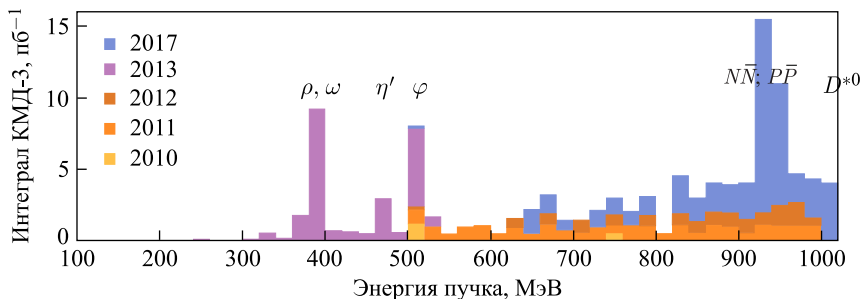


Рис. 6. Распределение по энергии набранного КМД-3 интеграла светимости

энергии. На рис. 4 показаны токи пучков в бустере БЭП и коллайдере ВЭПП-2000 во время проведения эксперимента, а также набранный детектором КМД-3 интеграл светимости в сравнении с предыдущими годами.

После модернизации светимость установки существенно выросла (рис. 5). Максимальная достигнутая светимость составила  $4 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Дальнейшее увеличение токов пучков и, соответственно, светимости ограничено эффектом flip-flop, существенно уменьшающим время жизни пучков.

На рис. 6 показано распределение набранных детектором КМД-3 данных в зависимости от энергии. Помимо основного диапазона набора статистики данные также были получены в диапазоне порога рождения нуклонов и на энергии 1003,5 МэВ — чуть выше максимальной проектной энергии накопителя, эта энергия соответствует массе  $D^{*0}$ -мезона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведения модернизации и подключения к инжекционному комплексу коллайдер ВЭПП-2000 продолжил регулярную работу по набору экспериментальных данных. За первый сезон работы двумя детекторами уже набрано свыше  $100 \text{ пб}^{-1}$ .

Работа по модернизации комплекса частично поддержана в рамках гранта РФФ №14-50-00080. Работа выполнена на УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61917X0008).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shwartz D. et al.* Implementation of Round Colliding Beams Concept at VEPP-2000 // Proc. of eeFACT'16, Daresbury, UK, 2016. P. 32–38.
2. *Шатунов П. Ю. и др.* Статус и перспективы ВЭПП-2000 // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, №7(205). С. 1554–1563.
3. *Danilov V. V. et al.* The Concept of Round Colliding Beams // Proc. of EPAC'96, Sitges, Spain, 1996. P. 1149–1151.
4. *Shwartz D. et al.* Recent Beam–Beam Effects and Luminosity at VEPP-2000 // Proc. of IPAC'14, Dresden, Germany, 2014. P. 924–927.
5. *Fedotov G. V. et al.* Overview of the CMD-3 Recent Results at  $e^+e^-$  Collider VEPP-2000 // Eur. Phys. J. Web Conf. 2016. V. 130. P. 01014.
6. *Logashenko I. B.* Measurement of Hadronic Cross-Sections at VEPP-2000 // PoS ICHEP2016, Chicago, USA, 2016. P. 544.
7. *Shwartz D. et al.* Booster of Electrons and Positrons (BEP) Upgrade to 1 GeV // Proc. of IPAC'14, Dresden, Germany, 2014. P. 102–104.
8. *Shwartz D. et al.* Re-commissioning and Perspectives of VEPP-2000  $e^+e^-$  Collider // PoS ICHEP2016. 2016. P. 054.