

НЕДАВНИЙ ПРОГРЕСС НА КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

*С. А. Растигеев^{a,1}, Ю. С. Актершев^a, Е. В. Бедарев^{a,б}, О. В. Беликов^a,
Д. Е. Беркаев^a, Д. Б. Буренков^a, В. С. Денисов^a, Л. Б. Фомин^a,
К. М. Горчаков^a, Г. В. Карпов^a, А. С. Касаев^a, А. Н. Кирпотин^a,
И. А. Кооп^{a,б}, А. А. Краснов^a, А. В. Купуржанов^a, Г. Я. Куркин^a,
А. П. Лысенко^a, С. В. Мотыгин^a, А. В. Отбоев^a, А. В. Павленко^a,
Е. А. Переведенцев^{a,б}, В. П. Просветов^a, Ю. А. Роговский^{a,б},
А. М. Семенов^a, А. И. Сенченко^a, Л. Е. Сердаков^a, Ю. М. Шатунов^{a,б},
Д. Б. Шварц^{a,б}, М. В. Тимошенко^a, В. Д. Юдин^a, И. М. Землянский^a,
Ю. М. Жаринов^a*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ВЭПП-2000 — электрон-позитронный коллайдер с круглыми пучками, созданный в ИЯФ СО РАН. Светимость коллайдера возросла более чем в два раза. Интегральная светимость, накопленная за последний год, превысила $0,3 \text{ fb}^{-1}$, что почти удвоило полную статистику столкновений, накопленную с момента создания коллайдера. Приводятся краткое описание комплекса ВЭПП-2000, текущего состояния и достигнутые результаты.

VEPP-2000 is an electron–positron collider with round beams built and operating at BINP SB RAS. The collider luminosity was increased twofold. The integrated luminosity accumulated over past run has exceeded 0.3 fb^{-1} , which almost doubled the total data collected since the collider operation start. The short description of the VEPP-2000 complex, current status and the achieved results are presented.

PACS: 29.20.db

ОБЗОР ВЭПП-2000

ВЭПП-2000 [1–3] предназначен, в первую очередь, для изучения физики легких мезонов и прецизионных измерений сечений аннигиляции электрон-позитронных пар в адроны. Физическая программа предполагает набор интегральной светимости не менее 1 fb^{-1} на каждый детектор в области энергий пучков 0,2–1 ГэВ.

Комплекс ВЭПП-2000 (рис. 1) создавался на месте предшественника ВЭПП-2М с максимальным сохранением инженерной инфраструктуры. В результате периметр

¹E-mail: s.a.rastigeev@inp.nsk.su

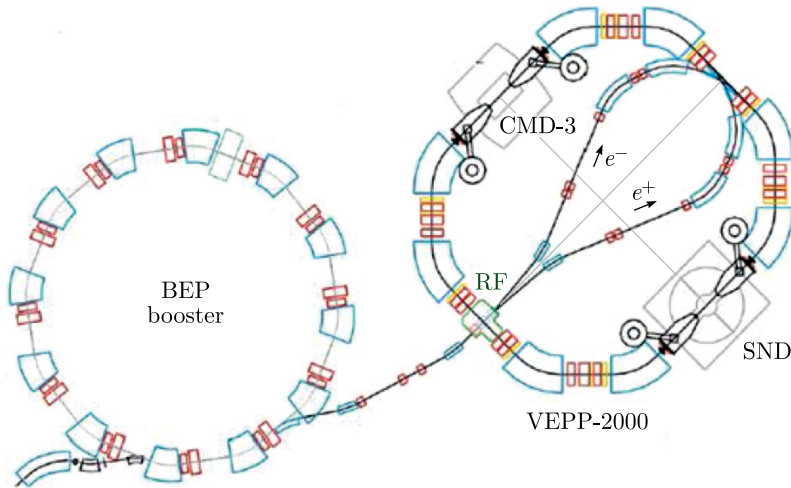


Рис. 1. Комплекс ВЭПП-2000

накопительного кольца коллайдера составил всего 24,4 м, что при высокой плотности расположения оптических элементов и оборудования не позволяет реализовывать разведение пучков, и, соответственно, возможна работа только в режиме 1 на 1 сгусток. Для достижения запланированной светимости применяется концепция круглых пучков [4], что предполагает равенство поперечных эмиттансов и дробной части бетатронных частот, а также аксиальную симметрию и малые поперечные размеры пучков в области столкновений. Таким образом, поперечное движение частиц становится эффективно одномерным, что повышает стабильность при взаимодействии интенсивных встречных пучков.

Оптическая структура кольца ВЭПП-2000 состоит из четырех квадрантов и четырех основных промежутков — двух экспериментальных и двух технических. Каждый квадрант состоит из двух поворотных магнитов, разделенных малым промежутком, где располагается триплет квадрупольных линз для формирования ахроматического поворота и радиальные и вертикальные секступольные линзы, совмещенные с скью-квадрупольными для коррекции хроматизма и связи бетатронных частот. В экспериментальных промежутках расположены детекторы КМД-3 (криогенный магнитный детектор) и СНД (сферический нейтральный детектор), а по краям обоих промежутков размещаются сверхпроводящие соленоиды финальной фокусировки пучков, а также достаточно слабые квадрупольные линзы радиальной фокусировки. В одном техническом промежутке располагаются впускные магниты, в другом — ВЧ-резонатор, а по краям обоих промежутков размещены дублеты квадрупольных линз и секступольные линзы, совмещенные с скью-квадрупольными.

Все квадрупольные линзы кольца накопителя ВЭПП-2000 содержат либо радиальные, либо вертикальные дипольные коррекции, также предусмотрено корректирование поля поворотных магнитов. Важно отметить, что все элементы оптической структуры и корректоры запитаны от персональных источников питания и, соответственно, могут управляться независимо.

Для диагностики пучков предусмотрены 4 электростатических пикапа, расположенных по одному в малых промежутках квадратов, и 16 ПЗС-камер, регистрирующих видимую часть синхротронного излучения с краев поворотных магнитов. Абсолютное значение тока пучков измеряется по феррозонду — трансформатору тока. Точное измерение энергии пучков осуществляется по обратному комптоновскому рассеянию лазерного излучения.

В целом оптическая структура кольца ВЭПП-2000 предполагает бета-функции в местах встречи в диапазоне примерно 5–10 см, нулевую дисперсию в основных свободных промежутках, равные и небольшие дробные части бетатронных частот при целых частях 4 и 2 для радиальных и вертикальных колебаний соответственно, параметр встречи, превышающий 0,1, и светимость на высоких энергиях $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

РАБОТА С ПУЧКОМ И ПОВЫШЕНИЕ СВЕТИМОСТИ

В текущей конфигурации источником электронов и позитронов для комплекса ВЭПП-2000 является инжекционный комплекс (ИК) [5]. Накопленные и охлажденные в ИК 430-МэВ частицы по 250-му каналу поочередно поступают к комплексу ВЭПП-2000 в автоматическом режиме в соответствии с потребностями. Поступающие частицы инжектируются, накапливаются и ускоряются до энергии эксперимента в БЭП (бустер электрон-позитронный) [6]. Далее частицы выпускаются из БЭП и по разветвляющемуся каналу инжектируются в накопительное кольцо ВЭПП-2000. Настройка инжекции в БЭП производится по величине захвата частиц, а канал перепуска из БЭП в ВЭПП-2000 подстраивается по показаниям датчиков положения и размера пучка в канале и проценту перепуска частиц. Рутинная настройка инжекции частиц в накопитель ВЭПП-2000, в первую очередь, осуществляется по показаниям ближайшего пика. По координатам первого пролета пучка через пикап осуществляется нацеливание влета пучка, по минимизации амплитуды синхротронных колебаний — подстройка энергии пучка и точности попадания в равновесную фазу ВЧ, а по амплитудам бетатронных колебаний — подстройка сил и моментов ударов инфлекторов бегущей волны. Следует отметить, что при столкновении интенсивных пучков коэффициент захвата частиц при инжекции может сильно уменьшиться, и требуется дополнительная подстройка инжекции, но уже почти «вслепую», так как пикапы измеряют сумму от слабого инжектируемого и интенсивного циркулирующего пучков.

В настоящем коллайдер работает в режиме «плоской» оптики, когда солениды, расположенные по краям детекторов, включены встречно. Таким образом, по результату прохождения пучком экспериментального промежутка отсутствует поворот плоскости бетатронных колебаний. Поэтому равенство поперечных эмиттансов пучка обеспечивается расположением рабочей точки вблизи резонанса связи бетатронных частот.

Проведенные на этапе создания ВЭПП-2000 измерения магнитных элементов позволяют не только воспроизводить в моделировании текущую оптическую структуру кольца, но и итерационно, почти в автоматическом режиме, корректировать равновесную орбиту и оптические функции кольца по расчетным матрицам откликов на дипольные корректоры [7]. Такая настройка эффективна в качестве базовой, но для

получения максимальных светимостей необходима дополнительная подстройка оптики в ручном режиме.

При наборе интеграла светимости необходимо, чтобы шумы детекторов не превышали некую величину, иначе живое время детекторов резко уменьшается, и ухудшается качество набранной статистики из-за повышенного фона. Для контроля шума детекторов используются данные счета дрейфовых камер, расположенных на внутреннем радиусе детекторов. Настройка режима кольца ВЭПП-2000 осуществляется итерационно, постепенным увеличением токов пучков при приемлемом фоне детекторов. При подстройке бета-функций в месте встречи с сохранением или нарушением круглости пучков и перестройке бетатронных частот вдоль или поперек резонанса связи используются программные «ручки», позволяющие достигать желаемого результата с минимальным изменением остальных параметров посредством рассчитанного изменения уставок сразу многих оптических элементов. Подстройка связи и хроматизма бетатронных частот, а также ахроматичности поворотов осуществляет-

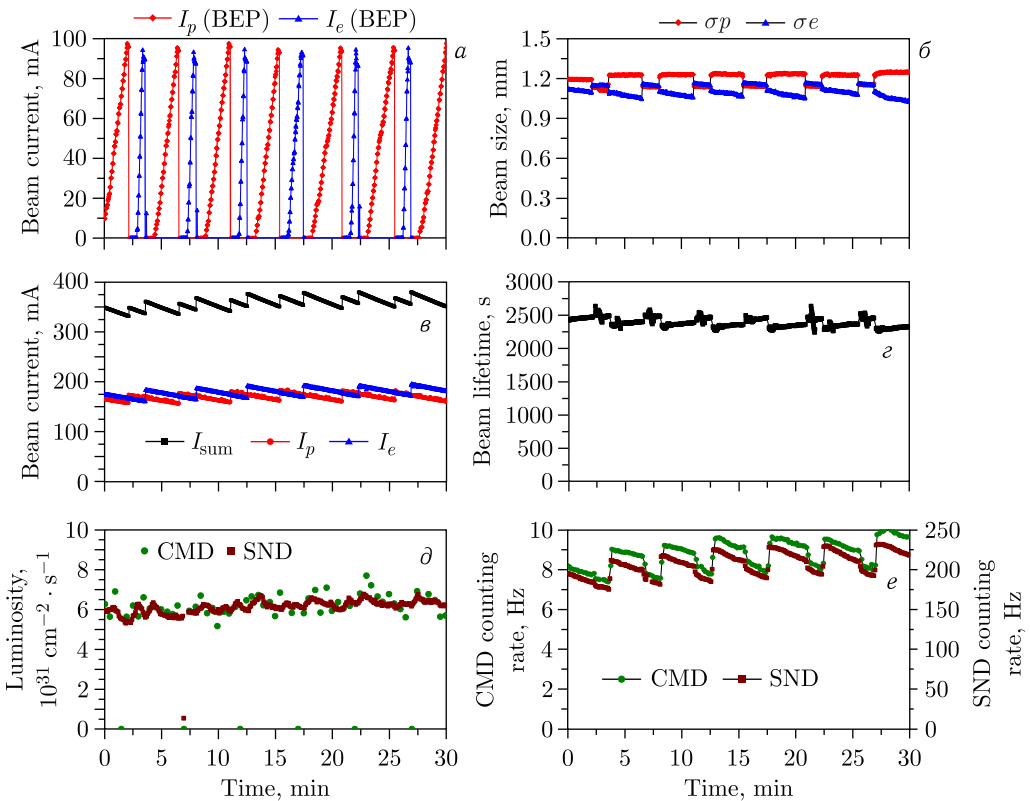


Рис. 2. Пример работы комплекса ВЭПП-2000 на энергии эксперимента 790 МэВ. Приводится временная зависимость тока пучков в бустере БЭП (а), а также для коллайдера ВЭПП-2000 временные зависимости токов пучков (в), светимостей, регистрируемых детекторами (д), вертикальных размеров пучков (б), времени жизни по суммарному току пучков (е) и счета дрейфовых камер на внутреннем радиусе детекторов (е)

ся соответствующими семействами линз, при этом дополнительное небольшое корректирование первых и вторых гармоник воздействия также достаточно эффективно для повышения токов циркулирующих пучков. При подстройке равновесной орбиты дипольными корректорами наиболее эффективны разнообразные комбинации вторых гармоник воздействия. Хотя все элементы и корректоры могут управляться независимо, но неидеальность элементов, особенно в области насыщения магнитных полей, приводит к отчетливому перекрестному влиянию, поэтому процесс настройки осуществляется итерационно. Важно отметить, что когда ВЭПП-2000 настроен при максимальных токах пучков, при меньших токах пучков шумы детекторов всегда в пределах нормы, но не оптимальны для меньших токов пучка, однако перенастройка на минимум шума детекторов при средних токах пучков приводит к ухудшению режима для больших токов и, как следствие, уменьшению светимости коллайдера.

В качестве примера на рис. 2 представлен режим работы комплекса ВЭПП-2000 для последней точки по энергии пучков сезона — 790 МэВ. На рис. 2, *а* приводится процесс накопления электронов и позитронов в БЭП. Видно, что позитроны накапливаются медленнее, чем электроны, что связано с разным темпом поступления частиц с ИК. На рис. 2, *в* — зависимость токов позитронов, электронов и суммарный ток пучков в накопителе ВЭПП-2000. При суммарном токе пучков в пределах 380 мА светимости в каждом из мест встречи примерно равны $0,6 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 2, *д*). Поскольку интенсивности пучков достаточно велики, каждая инжекция частиц вызывает значимое изменение поперечных размеров циркулирующих пучков (рис. 2, *б*). Более интенсивный пучок сжимается, а слабый пучок увеличивается в поперечном размере, что отражается на времени жизни суммарного тока пучков (рис. 2, *з*). При этом возрастает фоновая загрузка детекторов (рис. 2, *е*) — основной ориентир при наборе интеграла светимости. В представленном на рис. 2 режиме, при суммарном токе пучков 380 мА, измеренные частоты σ -моды и π -моды когерентных колебаний равны 0,14 и 0,33 соответственно, что отвечает оценочной величине параметра встречи: 0,15.

Величины средних светимостей по 10 % лучших заходов для всех энергий эксперимента последнего сезона представлены на рис. 3. Для сравнения на рис. 3 также приведены лучшие результаты, полученные в данном диапазоне энергий в предыдущие годы. Виден существенный прогресс в увеличении светимости во всем диапазоне

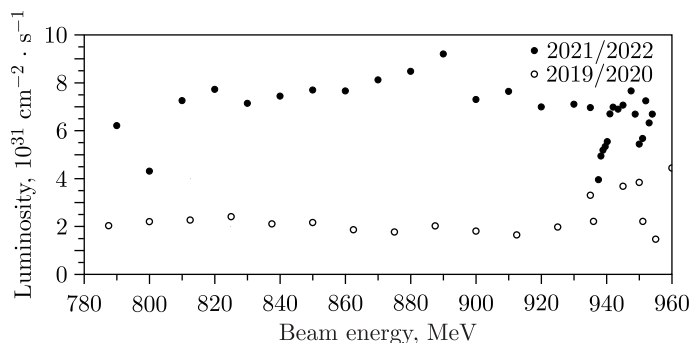


Рис. 3. Сравнение средних светимостей по 10% лучших заходов последнего сезона и результатов, полученных в том же диапазоне энергий пучков в 2019–2020 гг.

энергий последнего сезона. Максимальная светимость $0,9 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ была получена на энергии пучков 890 МэВ при суммарном токе пучков почти 0,5 А.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО НАБОРУ ИНТЕГРАЛА СВЕТИМОСТИ

Последний сезон по набору статистики проходил с декабря 2021 по июнь 2022 гг. В течение сезона энергия пучков изменялась в пределах 790–954 МэВ, зависимость энергии от дня работы приведена на рис. 4, *а* (кривая). Суточный интеграл светимости в зависимости от дня работы приведен на рис. 4, *а* (гистограмма). Видно, что в течение сезона в целом прослеживалось увеличение суточного набора статистики. Провалы до нуля в суточной статистике связаны с ремонтными работами как на ВЭПП-2000, так и на ИК. На рис. 4, *б* приводится распределение по энергии интеграла светимости, набранного за последний сезон и за все предыдущие годы. Пик

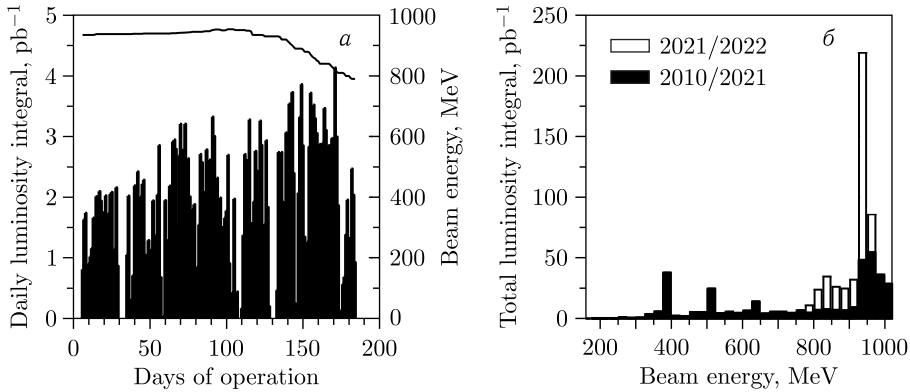


Рис. 4. Суточный интеграл светимости (гистограмма) и энергия пучков (кривая) в течение последнего сезона (*а*), а также распределение по энергии интеграла светимости, набранного за последний сезон и за все предыдущие годы (*б*)

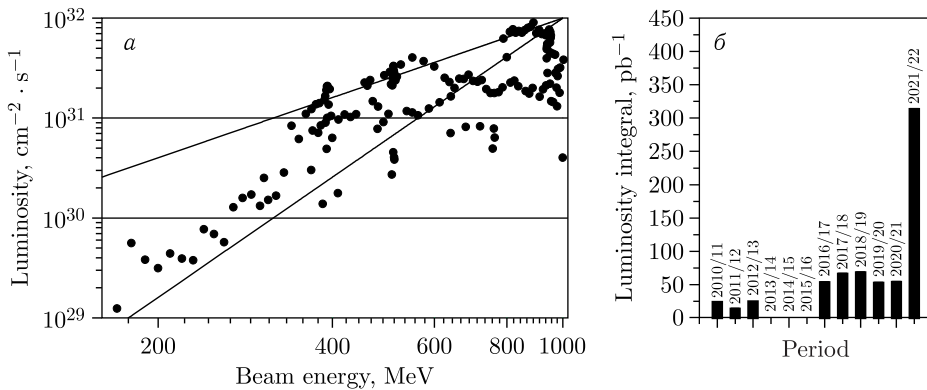


Рис. 5. Средние светимости по 10 % лучших заходов в зависимости от энергии пучков за все время работы комплекса ВЭПП-2000 (*а*) и распределение по сезонам набранных интегралов светимости (*б*)

интеграла светимости расположен в области порога рождения нуклонов при аннигиляции электрон-позитронных пар.

Средние светимости по 10% лучших заходов для всех энергий эксперимента за все время работы комплекса ВЭПП-2000 приведены на рис. 5, а. Также, для наглядности, на рис. 5, а приводятся аналитические кривые зависимости светимости от энергии с сохранением оптики кольца и с уменьшением бета-функций в месте встречи пропорционально энергии пучка. На рис. 5, б приводится распределение по сезонам набранных интегралов светимости. В целом за последний сезон набраны интегралы светимости $0,31 \text{ фб}^{-1}$ (КМД-3) и $0,36 \text{ фб}^{-1}$ (СНД), что почти удвоило интегралы светимости за все время работы ВЭПП-2000: $0,67 \text{ фб}^{-1}$ (КМД-3) и $0,74 \text{ фб}^{-1}$ (СНД).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа с пучком позволила значимо увеличить светимость в диапазоне высоких энергий ВЭПП-2000. Интеграл светимости, набранный за все время работы ВЭПП-2000, возрос за последний сезон примерно с $1/3$ до $2/3$ от целевого уровня, равного 1 фб^{-1} на каждый детектор. Полученные результаты демонстрируют достижение достаточно высокого уровня эффективности коллайдера ВЭПП-2000 с реализованной концепцией круглых пучков по выполнению физической программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu. M. et al.* Project of a New Electron–Positron Collider VEPP-2000 // Proc. of EPAC'2000, Vienna, 2000. P. 439–441.
2. *Shwartz D. et al.* VEPP-2000 Collider Operation in Full Energy Range with New Injector // Proc. of the 26th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2018), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 7–11.
3. *Timoshenko M. et al.* VEPP-2000 Collider Complex Operation in 2019–2021 Runs // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2021), Alushta, Russia, Sept. 27–Oct. 1, 2021. P. 28–33.
4. *Danilov V. V. et al.* The Concept of Round Colliding Beams // Proc. of EPAC'96, Sitges, Spain, 1996. P. 1149–1151.
5. *Maltseva Yu. et al.* VEPP-5 Injection Complex Performance Improvement for Two Collider Operation // Proc. of the 26th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2018), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 39–43.
6. *Shwartz D. et al.* Booster of Electrons and Positrons (BEP) Upgrade to 1 GeV // Proc. of the 5th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2014), Dresden, Germany, June 15–20, 2014. P. 102.
7. *Romanov A. L.* Round Beam Lattice Correction Using Response Matrix at VEPP-2000 // Proc. of the 1st Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2010), Kyoto, Japan, May 23–28, 2010. P. 4542–4544.

Получено 18 ноября 2022 г.