

УДК 621.384.63

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000 ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДВА ГОДА¹

© 2025 г. С. А. Растигеев^{a,*}, Ю. С. Актершев^a, Е. В. Бедарев^{a,b}, О. В. Беликов^a,
Д. Е. Беркаев^a, В. С. Денисов^a, Э. А. Эминов^{a,b}, Л. Б. Фомин^a, К. М. Горчаков^a,
Г. В. Карпов^a, А. С. Касаев^a, А. Н. Кирпотин^a, З. Э. Коншин^a, И. А. Кооп^{a,b}, А. А. Краснов^a,
А. В. Купуржанов^a, Г. Я. Куркин^a, А. П. Лысенко^a, С. В. Мотыгин^a, А. А. Мурасев^a,
А. В. Отбоев^a, Е. А. Переведенцев^{a,b}, В. П. Просветов^a, Ю. А. Роговский^{a,b}, А. М. Семенов^a,
А. И. Сенченко^a, Ю. М. Шатунов^{a,b}, Д. Б. Шварц^a, М. В. Тимошенко^a, В. Д. Юдин^a,
И. М. Землянский^a, Ю. М. Жаринов^a

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова

* e-mail: S.A.Rastigeev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 17.04.2024 г

ВЭПП-2000 — электрон-позитронный коллайдер с круглыми пучками, созданный и работающий в ИЯФ СО РАН. Интегральная светимость, накопленная за последние два года, достигла 0.5 фбн^{-1} при пиковой светимости $0.9 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Представлено краткое описание комплекса ВЭПП-2000, современное состояние и достигнутые результаты.

DOI: 10.7868/S3034564225070062

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые установки со встречными пучками появились примерно 60 лет назад. В настоящее время экспериментальные данные с коллайдеров являются одним из основных источников информации о фундаментальных свойствах материи. ВЭПП-2000 — один из двух действующих в России коллайдеров. Состояние дел на ВЭПП-2000 и, соответственно, объем набранных статистических данных на территории России, во многом характеризуют российский вклад в мировую науку в области физики высоких энергий.

2. КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 [1–3] предназначен, в первую очередь, для изучения физики легких мезонов и прецизионных измерений сечений аннигиляции электрон-позитронных пар в адроны. Для выполнения физической программы используется два детектора — криогенный магнитный детектор (КМД-3) и сферический нейтральный детектор (СНД). При этом предполагалось, что за время эксплуатации комплекса необходимо набрать интеграл светимости не менее 1 фбн^{-1} на каждый детектор в области энергий пучков 0.2–1 ГэВ.

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

Коллайдер ВЭПП-2000 создан в ИЯФ СОРАН на основе инженерной инфраструктуры комплекса предшественника ВЭПП-2М, что радикально снизило стоимость, но во многом определило концепцию нового комплекса. В рамках существующего экспериментального зала периметр коллайдера ВЭПП-2000 составил всего 24.4 м с отсутствием возможности разведения пучков в паразитных местах встречи, т.е. возможен лишь режим столкновения 1×1 стукот. Однако для выполнения программы по набору статистики столкновения частиц необходимо достижение достаточно высокого уровня светимости $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при максимальной энергии 1 ГэВ на пучок. Для достижения запланированной светимости предложена и реализована концепция круглых пучков [4], что предполагает равенство поперечных эмиттансов и дробной части бетатронных частот, а также равенство и малые значения бета-функций в области столкновений. Таким образом, поперечное движение частиц становится эффективно одномерным, и устраняется отрицательное влияние нелинейных резонансов связи, что повышает стабильность при взаимодействии интенсивных встречных пучков, а характерные параметры встречи превышают значение 0.1.

Концепция круглых пучков реализована с использованием сверхпроводящих соленоидов, обеспечивающих требуемые параметры финальной фокусировки в местах встречи. Кроме того, в зависимости от полярности включения соленоидов возможно применение различных схем реализации концепции встречных пучков, как с поворотом плоскости поперечных колеба-

ний частиц при прохождении места встречи, так и без поворота. Таким образом, возрастают возможности достижения запланированного уровня светимости. В целом кольцо коллайдера ВЭПП-2000 (рис. 1) образуется двумя одинаковыми арками, разделенными промежутками мест встречи, где располагаются детекторы и соленоиды финальной фокусировки. Каждая арка состоит из двух ахроматических поворотов, разделенных техническим промежутком. В одном таком промежутке располагаются впускные магниты, в другом – ВЧ-резонатор, а по краям обоих промежутков размещены дублеты квадрупольных линз и секступольные линзы, совмещенные с повернутыми на 45° относительно продольной оси квадрупольными линзами. Каждый ахроматический поворот состоит из двух магнитов, разделенных малым промежутком, где располагается триплет квадрупольных линз, а также радиальные и вертикальные секступольные линзы, совмещенные с повернутыми на 45° относительно продольной оси квадрупольными линзами. Все квадрупольные линзы кольца накопителя ВЭПП-2000 содержат либо радиальные, либо вертикальные дипольные коррекции, также возможно корректирование поля каждого из поворотных магнитов. Для диагностики пучков предусмотрены 4 электростатических пикапа, расположенные по одному в малых промежутках квадратов, и 16 ПЗС-камер, регистрирующих видимую часть синхротронного излучения с краев поворотных магнитов. Абсолютное значение суммарного тока пучков измеряется по феррозонду – трансформатору тока. Индивидуальные значения

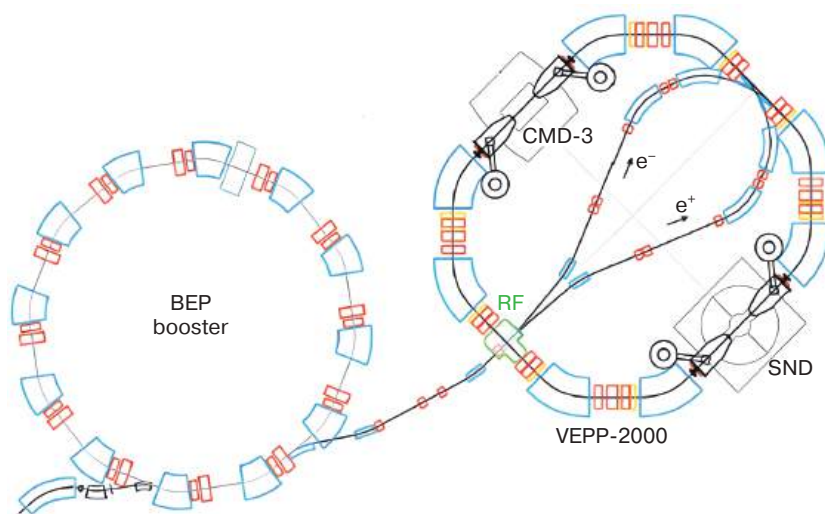


Рис. 1. Комплекс ВЭПП-2000.

токов электронов и позитронов контролируются по показанию электростатических пикапов в момент пролета соответствующих пучков. Точное измерение энергии пучков осуществляется по обратному комптоновскому рассеянию лазерного излучения. Первичным источником электронов и позитронов для комплекса ВЭПП-2000 служит отдельный объект – инжекционный комплекс (ИК) [5], с которого поступают частицы с постоянной энергией примерно 430 МэВ. Электроны и позитроны поочередно инжектируются, накапливаются и ускоряются до энергии эксперимента в электронно-позитронный бустер (БЭП) [6]. Далее частицы выпускаются из БЭП и по разветвляющемуся каналу инжектируются в накопительное кольцо коллайдера ВЭПП-2000.

3. РАБОТА С ПУЧКОМ И ПОВЫШЕНИЕ СВЕТИМОСТИ

При малом периметре кольца коллайдера ВЭПП-2000 возникает необходимость в плотной расстановке элементов, совмещении функций элементов и работе в области насыщения магнитных полей. Данное обстоятельство существенно осложняет настройку оптимальных режимов столкновения частиц, однако индивидуальное питание каждого элемента оптической структуры предоставляет широкие возможности по повышению светимости. На исследуемой рабочей точке по бетатронным колебаниям возможны тонкая регулировка оптической структуры и орбиты пучков, минимизация дисперсии в области столкновения частиц, компенсация хроматизма и регулировка связи поперечных колебаний.

В настоящее время коллайдер работает в режиме оптики, когда соленоиды, расположенные по кроям детекторов, включены встречно. Таким образом, плоскость бетатронных колебаний не разворачивается по результату прохождения частицами детекторного промежутка, а равенство поперечных эмиттансов пучка обеспечивается расположением рабочей точки вблизи резонанса связи бетатронных частот.

Для набора статистики необходимо, чтобы пучковые фоны детекторов не превышали некую величину, иначе живое время детекторов резко уменьшается и ухудшается качество набранной статистики. Для контроля фона 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 [7]. Данная процедура требует много времени, однако при наборе статистики шаг по переходу на новую энергию сталкивающихся пучков обычно не превышает 10 МэВ, поэтому режим в целом сохраняется, и возможна оптимизация по повышению светимости непосредственно в процессе набора статистики столкновений. Выбор рабочей точки крайне важен для достижения высокого уровня светимости, однако исследование новых рабочих точек невозможно в режиме набора статистики столкновений частиц, поскольку на больших токах пучков сдвиг вдоль резонанса связи даже на несколько тысячных вызывает неприемлемое увеличение фоновой загрузки детекторов. На данный момент наиболее хорошо оптимизирован режим при дробной части частот бетатронных колебаний равной примерно 0.18. В рабочей точке 0.18 при максимальных токах сталкивающихся пучков частота π -моды колебаний пучков достигает величины 0.36. Интересен процесс прохождения резонанса $1/3$. При увеличении токов частота π -моды перескакивает с уровня примерно 0.31 сразу на 0.34 за счет изменения поперечного размера пучков. Сначала оба пучка синхронно увеличиваются в поперечном размере, потом синхронно сжимаются. Пучки при этом остаются устойчивыми, но при данном процессе временно снижается удельная светимость и, как следствие, набор статистики менее эффективен. При дальнейшем увеличении токов пучков более интенсивный пучок резко сжимается, а более слабый увеличивается в размерах, что сопровождается резким уменьшением времени жизни слабого пучка и быстрой потерей части размера пучка. Иногда возможно восстановление устойчивого состояния посредством выравнивания токов пучков дополнительной инъекцией частиц, и в какой-то момент размеры пучков сравниваются. Если такого эффекта быстро достичь не удастся, то проводится сброс обоих пучков и постепенное поочередное накопление токов сталкивающихся пучков с нулевого уровня. С недавних пор достаточно перспективно выглядит режим при дробной части частот бетатронных колебаний примерно 0.12, а ранее непродолжительное время использовался режим при 0.14. В иных рабочих точках пока не удастся

за разумное время достичь неплохой светимости, чтобы совместить продолжительную тонкую настройку режима с набором статистики столкновений.

Для иллюстрации некоторых процессов, происходящих при наборе статистики, на рис. 2 представлен режим работы комплекса ВЭПП-2000 для последней в описываемый период точки по энергии пучков – 641 МэВ. На рис. 2а 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. 2б показана зависимость токов позитронов, электронов и суммарный ток пучков в накопителе ВЭПП-2000. При суммарном токе пучков примерно 220 мА, светимости в каждом из мест встречи примерно равны

$0.3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. (рис. 2с). Поскольку интенсивности пучков достаточно велики, каждая инжекция частиц вызывает значимое изменение поперечных размеров циркулирующих пучков (рис. 2д). Более интенсивный пучок сжимается, а слабый пучок увеличивается в поперечном размере, что отражается на времени жизни суммарного тока пучков (рис. 2е). При этом возрастает фоновая нагрузка детекторов (рис. 2ф) – основной ориентир при наборе статистики. В представленном на рис. 2 режиме при суммарном токе пучков 230 мА измеренные частоты σ -моды и π -моды когерентных колебаний равны соответственно 0.12 и 0.3, что отвечает оценочной величине параметра встречи: 0.15.

Величины средних светимостей (10% лучших) при всех энергиях эксперимента за последнее два года представлены на рис. 3. Для сравне-

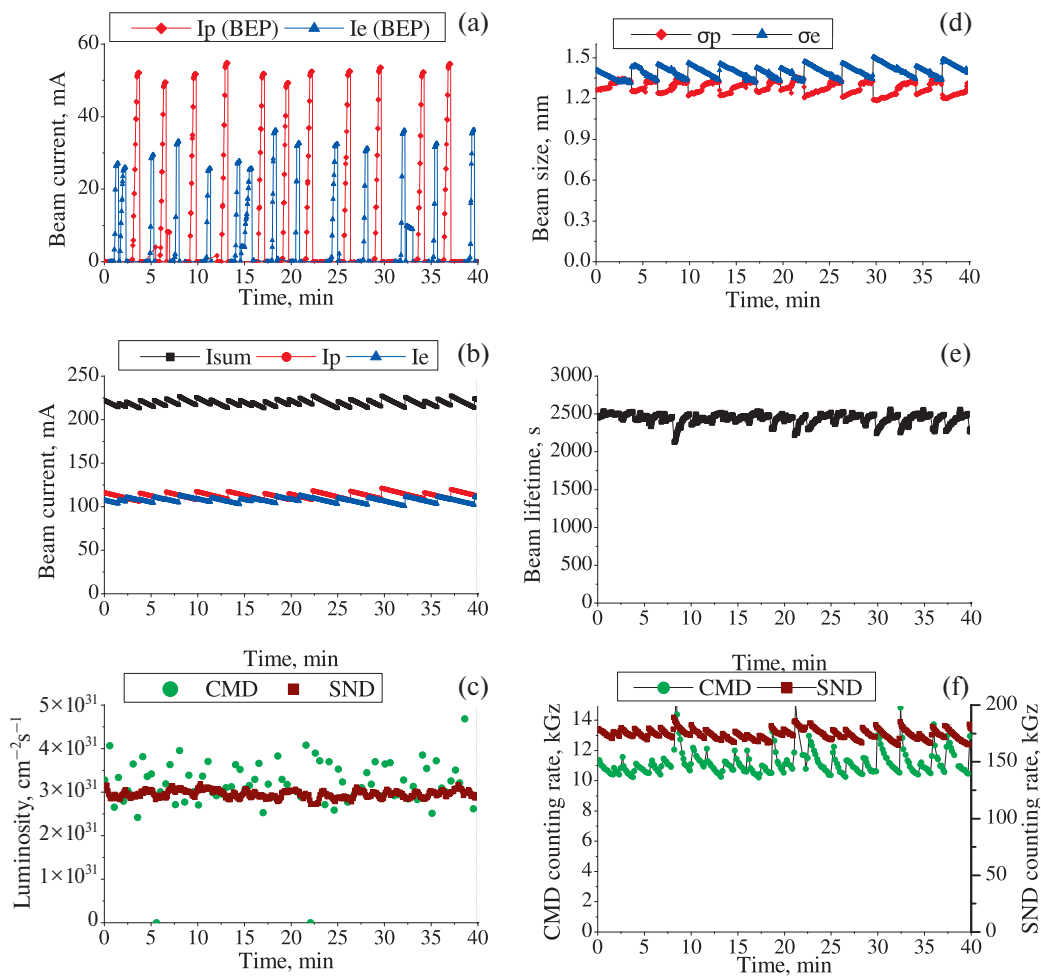


Рис. 2. Пример работы комплекса ВЭПП-2000 при энергии эксперимента 641 МэВ. Приводится временная зависимость тока пучков в бустере БЭП (а), а также временные зависимости токов пучков для коллайдера ВЭПП-2000 (б), светимостей, регистрируемых детекторами (с), вертикальных размеров пучков (д), времени жизни по суммарному току пучков (е) и счета дрейфовых камер в внутреннем радиусе детекторов (ф).

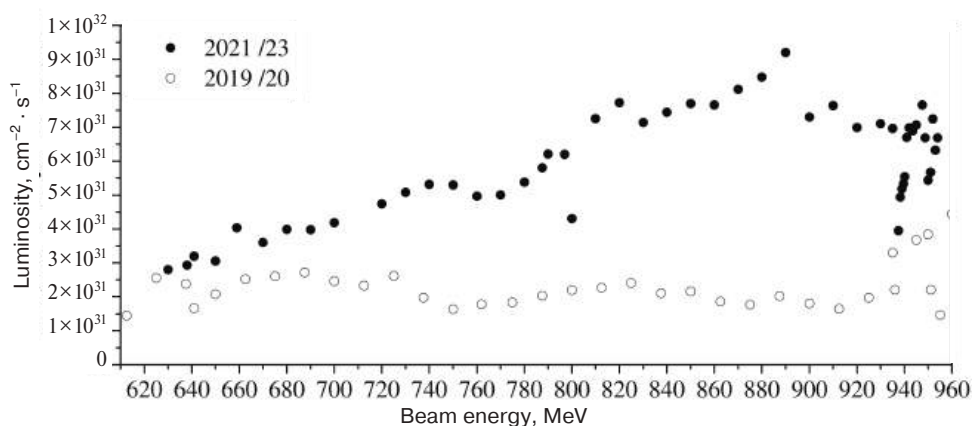


Рис. 3. Сравнение средних светимостей (10% лучших) за последние два года и результатов, полученных в том же диапазоне энергий пучков в 2019–2020 годах.

ния на рис. 3 также приведены лучшие результаты, полученные в данном диапазоне энергий в предыдущие годы. Здесь и далее приводятся данные с детектора КМД-3, отметим, что данные с детектора СНД, характеризующие светимость и объем набранной статистики, различаются незначительно, так как оба места встречи реализованы идентично. Из рис. 3 виден существенный прогресс в увеличении светимости. Максимальная светимость $0.9 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ была получена при энергии пучков 890 МэВ при суммарном токе пучков почти 0.5 А.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО НАБОРУ СТАТИСТИКИ СТОЛКНОВЕНИЙ

За последние два года состоялись 9-й и 10-й сезоны работы коллайдера ВЭПП-2000 по набору статистики столкновений, проходившие соответственно с декабря 2021 г. по июнь 2022 г. и с февраля по июнь 2023 г. В соответ-

ствии с физической программой энергия сталкивающихся пучков постепенно снижалась, охватив диапазоны 790–954 МэВ в 9-м сезоне и 630–797 МэВ в 10-м сезоне. На рис. 4 приводится распределение по энергии интеграла светимости, набранного за последние два сезона и за все предыдущие годы. Пик интеграла светимости расположен в области порога рождения нуклонов при аннигиляции электрон-позитронных пар. Средние светимости для (10% лучших) для всех энергий эксперимента за все время работы комплекса ВЭПП-2000 приведены рис. 5. Также для наглядности на рис. 5. приводятся аналитические кривые зависимости светимости от энергии с сохранением оптики кольца и с уменьшением бета-функций в месте встречи пропорционально энергии пучка. На рис. 6. видно значительное увеличение объема набираемой статистики столкновений за два последних сезона. В целом за последние два сезона набран интеграл светимости 0.5 фбн^{-1} на каждый детек-

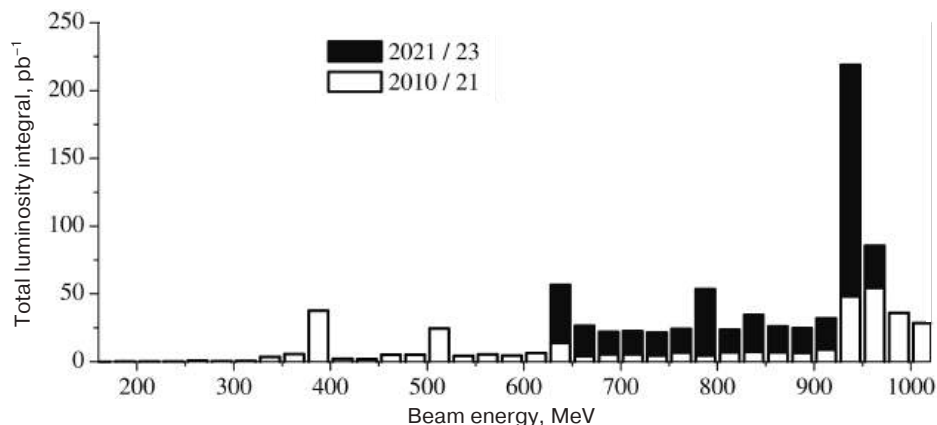


Рис. 4. Распределение по энергии интеграла светимости, набранного за последнее два сезона и за все предыдущие годы.

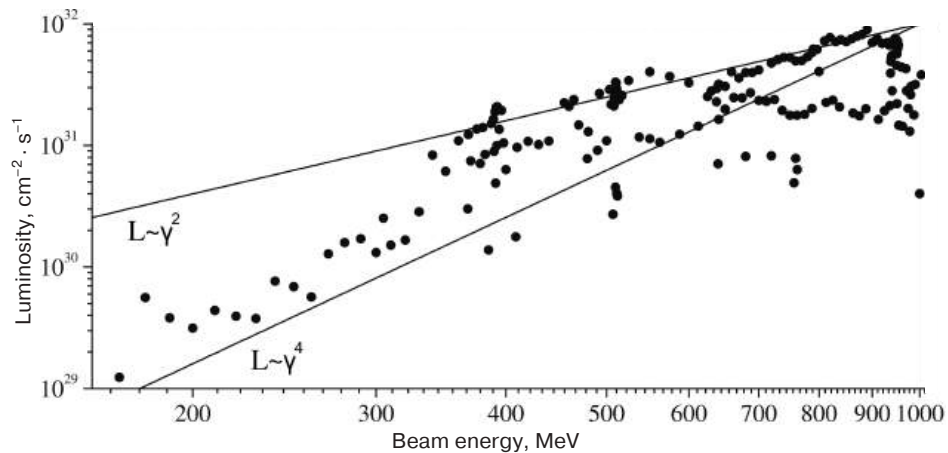


Рис. 5. Средние светимости (10% лучших) в зависимости от энергии пучков за все время работы комплекса ВЭПП-2000.

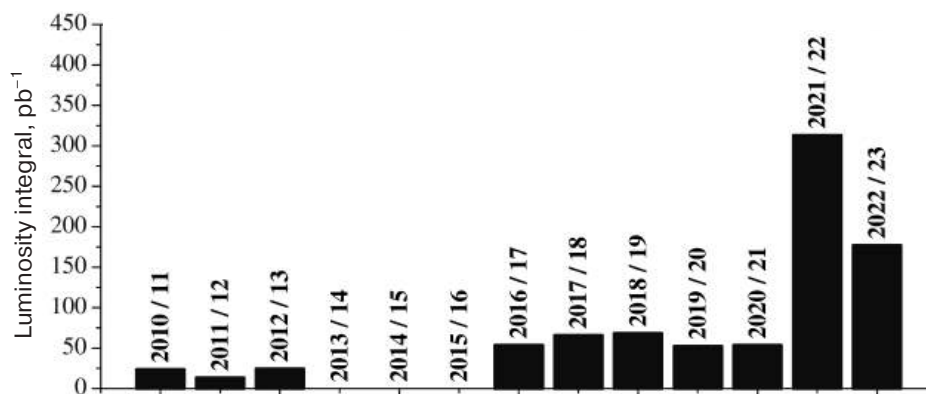


Рис. 6. Распределение по сезонам набранных интегралов светимости.

тор, в то время как за предыдущие 8 сезонов набран интеграл светимости 0.3 фбн^{-1} на каждый детектор. Таким образом, производительность коллайдера ВЭПП-2000 по реализации физической программы значительно возросла за два последних года.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа с пучком позволила значимо увеличить светимость в диапазоне высоких энергий ВЭПП-2000. Интеграл светимости, набранный за все время работы ВЭПП-2000, увеличился за последние два года примерно с 30% до 80% от целевого уровня равного 1 фбн^{-1} на каждый детектор. Полученные результаты демонстрируют достаточно высокий уровень эффективности концепции круглых пучков, реализованной на коллайдере ВЭПП-2000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu.M., Evstigneev A.V., Ganyushin D.I. et al.* // Proc. Of EPAC'20. Vienna, Austria, 2000. P. 439.
2. *Shwartz D.B., Anashin V.V., Batrakov A.M. et al.* // Proc. of RUPAC'18. Protvino, Russia, 2018. P. 7. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-MOXMH02>
3. *Timoshenko M.V., Aktershev Yu., Belikov O.V. et al.* // Proc. of RUPAC'21. Alushta, Russia, 2021. P. 28. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2021-TUY01>
4. *Danilov V.V., Ivanov P.M., Koop I.A., et al.* // Proc. of EPAC'96. Sitges, Spain, 1996. P. 1149.
5. *Maltseva Yu.I., Andrianov A., Astrelina K. et al.* // Proc. of RuPAC'18. Protvino, Russia. 2018. P. 39.
6. *Shwartz D.B., Berkaev D.E., Bochek D.V. et al.* // Proc. Of IPAC. Dresden, Germany. 2014. P. 102. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-MO-PRO018>
7. *Rastigeev S.A., Aktershev Yu.S., Bedarev E.V. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20. № 4. P. 866. <https://doi.org/10.1134/S1547477123040556>