На правах рукописи

ШВАРЦ Дмитрий Борисович

КРУГЛЫЕ ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

КООП Иван Александрович	–	доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

СИДОРИН Анатолий Олегович	–	кандидат физико-математических наук, Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, заместитель начальника ускорительного отделения ЛФВЭ.
ЛОГАЧЕВ Павел Владимирович	–	доктор физико-математических наук, член-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, заместитель директора.
ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ	–	Федеральное государственное бюджетное учреждение «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики», г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2013 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «_____» _____2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время светимость всех электрон-позитронных коллайдеров ограничена т.н. эффектами встречи – влиянием на динамику частиц электромагнитного поля встречного сгустка. Поле интенсивного встречного пучка, будучи сильно нелинейным, приводит к росту эмиттанса, деградации удельной светимости, деформации распределения частиц в пучке, падению времени жизни. Создание в 1980–90-е годы специализированных фабрик – коллайдеров с очень высокой светимостью – в сильной степени исчерпало основные возможности по увеличению светимости: наращивание числа сгустков, уменьшение вертикального эмиттанса пучков, усиление финальной фокусировки для снижения величины бета-функции в месте встречи. Единственный параметр, напрямую входящий в выражение для светимости и оставшийся почти неизменным за полвека использования встречных пучков, – это параметр встречи или параметр пространственного заряда. Пороговое значение для параметра встречи, который в линейном приближении соответствует сдвигу частоты бетатронных колебаний в расчёте на одно место встречи, $\xi_{th} \sim 0.05$ универсально для всех лептонных коллайдеров. Поиск решений по увеличению этого параметра становится всё более актуальным. Один из подходов был реализован на накопителе ВЭПП-2000.

В отличие от всех прочих электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-2000 использует круглые встречные пучки. Идея круглых пучков была впервые предложена около 25 лет назад, однако до сих пор не имела практического применения по целому ряду причин. В первую очередь, это связано с трудностью управления накопителем с сильно связанными бетатронными модами. Во-вторых, необычная финальная фокусировка, обеспечивающая круглость пучка в точке встречи, приводит к сложной нелинейной динамике частиц в таком кольце. Однако предварительные компьютерные симуляции предсказывали значительный выигрыш в пороговом значении параметра встречи и, в конечном счёте, значительное увеличение светимости.

Концепция круглых встречных пучков подразумевает организацию магнитной системы накопителя, обладающей дополнительным интегралом в динамике частиц, даже с учетом воздействия со стороны встречных сгустков. В случае круглых пучков сила взаимодействия со встречным сгустком обладают аксиальной симметрией и тогда, при симметрии транспортных матриц двух поперечных степеней свободы от одного места встречи до другого, возникает сохранение продольной компоненты момента импульса. Динамика

частицы в присутствии интенсивного встречного сгустка остаётся сильно нелинейной, но нелинейность становится одномерной. Существует целый ряд работ, показывающий, что снижение размерности стохастического движения стабилизирует его, отодвигая пороги возникновения неустойчивостей. Интерес к интегрируемой нелинейной динамике, а также к частично интегрируемой, снижающей размерность нелинейного движения, не ослабевает не только применительно к коллайдерам. Так, в настоящее время в лаборатории Fermilab сооружается тестовый накопитель электронов IOTA (Integrable Optics Test Accelerator) для получения в сильно нелинейных магнитных полях стабильных пучков с очень большим разбросом бетатронных частот. Таким образом, экспериментальная проверка идеи круглых пучков с одномеризацией нелинейной динамики является актуальной задачей для выбора стратегии по сооружению будущих намного более дорогостоящих экспериментальных установок со встречными пучками на сверхвысокую светимость.

С практической точки зрения, для корректной проверки новой концепции важно уметь оптимально настраивать конкретную машину, обладающую рядом необычных свойств, несвойственных традиционным накопителям. Это потребовало ещё на стадии проектирования и запуска накопителя актуального понимания факторов, критических для оптимизации работы в режиме столкновений. Для этого было проведено моделирование динамической апертуры (ДА) как в режиме одного пучка, так и симулирование эффектов встречи в разных условиях работы. Актуальной задачей для коллайдера является и быстрое измерение важнейшего параметра – светимости.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является получение комплексного опыта работы на установке с круглыми встречными пучками. Этот опыт включает в себя моделирование и экспериментальное измерение эффектов линейной и нелинейной динамики в накопителе с сильной фокусировкой соленоидами и связью бетатронных колебаний. Разностороннее изучение эффектов встречи, получение рекордных значений параметра пространственного заряда привело, в конечном счёте, к достижению рекордно высокой светимости в своём диапазоне энергий.

Важной задачей является также создание инструмента для измерения светимости, пригодного для работы в широком диапазоне абсолютных значений светимости. Сравнение поперечных размеров пучка, измеренных с помощью ПЗС-камер в 16 точках накопительного кольца, с их модельными значениями позволяет с высокой точностью определить размер пучка в месте встречи и вычислить светимость коллайдера.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в получении результатов, положенных в основу диссертации, является определяющим. На стадии проектирования

ВЭПП-2000 автор разрабатывал системы коррекций равновесной орбиты и бетатронной связи, участвовал в расчётах магнитных полей хроматических секступольных линз. Автором проводились магнитные измерения квадрупольных линз и их доработка с целью минимизации высоких мультипольных гармоник поля, влияющих на ДА. Автор проводил многочисленные моделирования хроматических эффектов и нелинейной динамики с учётом нелинейных краевых полей соленоидов. Впоследствии, эти данные сравнивались с экспериментальными измерениями в различных режимах работы ВЭПП-2000. Автор участвовал в моделировании эффектов встречи в линейном и сильно-слабом приближении. Им проведена также юстировка сверхпроводящих соленоидов по измерению откликов равновесной орбиты на вариацию их силы, что дало толчок применению SVD-анализа матрицы откликов для правки орбиты. Наконец, автором лично был создан инструмент для измерения светимости по наблюдаемым размерам пучка.

Научная новизна

Новый подход к получению высокой светимости – круглые встречные электрон-позитронные пучки – впервые был применён на ВЭПП-2000. Это позволило получить рекордное значение параметра встречи – вдвое большее, чем было достигнуто на предшествующем коллайдере ВЭПП-2М. Таким образом, было получено экспериментальное подтверждение тезиса о подавлении эффектов встречи введением дополнительного интеграла движения.

Применение соленоидов для финальной фокусировки с одной стороны позволяет реализовывать режимы работы с циркулярными модами бетатронных колебаний, что до сих пор не применялось в накопителях, с другой стороны – вносит краевые поля нового типа, которые на ВЭПП-2000 в сильной степени определяют нелинейную динамику частиц. Получение в этих условиях высокой светимости является абсолютно новым подходом.

Новым является также способ точного и быстрого определения светимости по большому числу измеренных на разных азимутах размеров пучков.

Научная и практическая ценность

В результате применения концепции круглых встречных пучков накопитель ВЭПП-2000 имеет светимость в 3÷5 раз выше, чем ВЭПП-2М во всём диапазоне энергий. Набранный за первые годы работы двумя детекторами СНД и КМД-3 интеграл светимости ~100 нбн$^{-1}$ уже превышает данные, накопленные на ВЭПП-2М за четверть века его работы, и на порядок превышает суммарную светимость в области энергий 1.4÷1 ГэВ за всю мировую историю использования встречных пучков. Достигнутое значение параметра встречи $\xi \sim 0.1$ является рекордным в данном диапазоне энергий.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка и применение методики первичной юстировки сверхпроводящих соленоидов по откликам равновесной орбиты пучка в специальном электронно-оптическом режиме работы ВЭПП-2000.
2. Изучение хроматических эффектов, в т.ч. при работе накопителя вблизи резонанса связи.
3. Моделирование и измерение ряда эффектов нелинейной динамики в накопителе с сильной фокусировкой продольным полем. Расчёт и экспериментальная проверка динамической апертуры, зависимости частоты бетатронных колебаний от амплитуды для разных режимов работы кольца. Выработка рекомендации по использованию семейств дипольных корректоров в квадруполях.
4. Реализация оперативного измерения светимости по размерам пучков в 16-ти имеющихся точках наблюдения.
5. Экспериментальная демонстрация эффективности метода круглых встречных пучков, предсказанной моделированием. Получение рекордного значения параметра встречи $\xi \sim 0.1$ и рекордной светимости в режиме 1×1 сгусток (3×10^{31}см$^{-2}$с$^{-1}$ на энергии 900 МэВ).

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих конференциях и рабочих совещаниях: 19th IEEE Particle Accelerator Conference (PAC'2001, Chicago, USA), 10th European Particle Accelerator Conference (EPAC'2006, Edinburgh, Scotland), 20th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'2006, Новосибирск, Россия), 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC'2008, Genoa, Italy), 40th ICFA Advance Beam Dynamics Workshop (2008, Novosibirsk, Russia), 21th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'2008, Звенигород, Россия), 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC'2010, Kyoto, Japan), 13th ISTC SAC Seminar "New Perspectives of High Energy Physics" (2010, Новосибирск, Россия), 22th Russian Conference of on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2010, Протвино, Россия), 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC'2011, San Sebastian, Spain), 23th Russian Conference of on Charged Particle Accelerators (RuPAC'2012, Санкт-Петербург, Россия), ICFA mini-workshop on "Beam-Beam Effects in Hadron Colliders" (BB2013, CERN), 25th North American Particle Accelerator Conference (NA-PAC'2013, Pasadena, USA).

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трёх приложений. Материал работы изложен на 108 страницах, включает 78 рисунков, 5 таблиц, и список литературы из 54 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко освещаются результаты работы предыдущего поколения электрон-позитронных коллайдеров в области энергий до 1 ГэВ и мотивация создания нового накопителя ВЭПП-2000. Обсуждается суть концепции круглых встречных пучков.

В первой главе даётся обзор ускорительного комплекса ВЭПП-2000. Для инжекции пучков в экспериментальное кольцо в настоящее время используется инфраструктура комплекса ВЭПП-2М, работавшего при существенно более низких интенсивностях пучков (см. рис. 1). Возможности инжекционной системы являются на сегодня существенным ограничением светимости ВЭПП-2000.

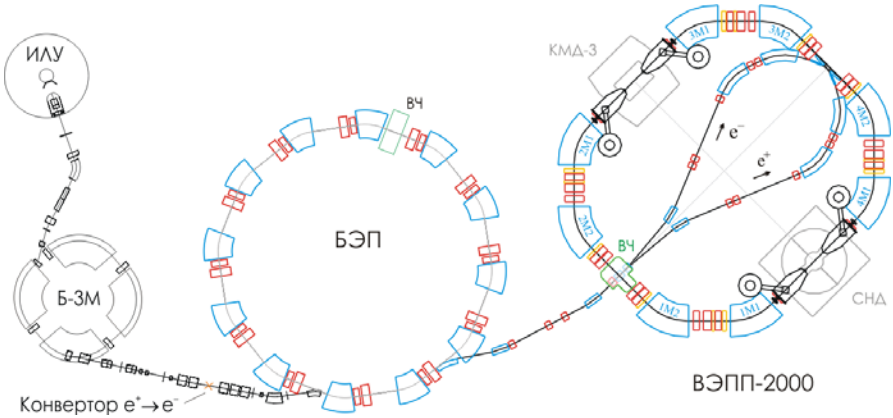

Рис. 1. Комплекс ВЭПП-2000.

Даётся подробное описание самого коллайдера, его магнитной структуры, систем коррекций. Отдельно освещена техническая реализация узлов финального фокуса – сверхпроводящих модулей соленоидов. Этот сложный блок состоит из нескольких катушек, которые при различной коммутации позволяют работать в принципиально разных режимах. Важной составляющей коллайдера для его успешной работы является система диагностики. На ВЭПП-2000 используется система ПЗС-камер для измерения положения и профиля пучка, а также пикап-электроды для быстрых пооборотных измерений.

Вторая глава посвящена рассмотрению всех практически реализуемых на ВЭПП-2000 электронно-оптических режимов работы. Описан технический т.н. «тёплый» режим с выключенными соленоидами, не требующей функционирующей криогенной системы. Он используется для обезгаживания вакуумной камеры синхротронным излучением интенсивного пучка в многосгустковом режиме. Также в этом режиме возможна первичная юстировка соленоидов «по пучку». Основное внимание уделено, конечно, режимам с круглым пучком. Рассмотрены различные опции включения соленоидов. К сожалению, в опциях с циркулярными бетатронными модами не удалось найти схемы секступольной коррекции хроматизма с удовлетворительной ДА. Основным рабочим режимом ВЭПП-2000 стала т.н. «плоская оптика» с встречной полярностью пары соленоидов по разные стороны от места встречи. При таком включении бетатронные моды вне промежутков встречи устроены как в традиционных накопителях, а равенство эмиттансов мод обеспечивается выбором рабочей точки в полосе линейного резонанса связи $\nu_x - \nu_z = 2$. Кроме того, при работе на низкой энергии исследован и применен режим с частичным включением катушек соленоидальных модулей для уменьшения β-функции в местах встречи.

Для основного рабочего режима «плоской оптики» рассмотрена процедура настройки электронно-оптической схемы накопителя для оптимизации эффектов встречи и светимости. Пороговое значение встречного тока, пиковая светимость, удельная светимость и время жизни пучков очень чувствительны к возмущениям структурных функций, к бетатронной связи в арках и к выбору рабочей точки по частоте бетатронных колебаний.

Некоторое внимание уделено хроматическим эффектам, зависимости бетатронных частот и бета-функций от отклонения частицы по энергии. Компенсация линейного хроматизма частот, необходимая для подавления коллективных неустойчивостей типа head-tail, при работе вблизи резонанса связи имеет особенность – т.н. перераспределение хроматизма (см. рис. 2). Из-за связи частоты расщеплены, и точно на резонансе связи хроматизм обеих частот равен среднему. Потенциально, это позволяет корректировать хроматизм обеих частот лишь одним семейством секступолей, но практически это работает лишь в полосе резонанса связи, которая узка, в то время как натуральный хроматизм в жёсткофокусирующем накопителе велик.

Несмотря на то, что для базовой плоской оптики моделирование предсказывает удовлетворительную ДА, на практике, однако, ограничение оказывается гораздо более жёстким. Главными источниками нелинейного поля на ВЭПП-2000 являются хроматические секступоли, а также краевые поля соленоидов финального фокуса. Эти два типа нелинейностей дают вклады в т.н. "кубическую нелинейность" (зависимость бетатронной частоты от амплитуды колебаний) разного знака. Положительный сдвиг частоты с амплитудой от краёв соленоидов, согласно моделированию, отчасти стабилизирует динами-

ку частиц, отодвигая частоту от целого резонанса, контролирующего динамическую апертуру (см. кривые 1 и 3 на рис. 3).

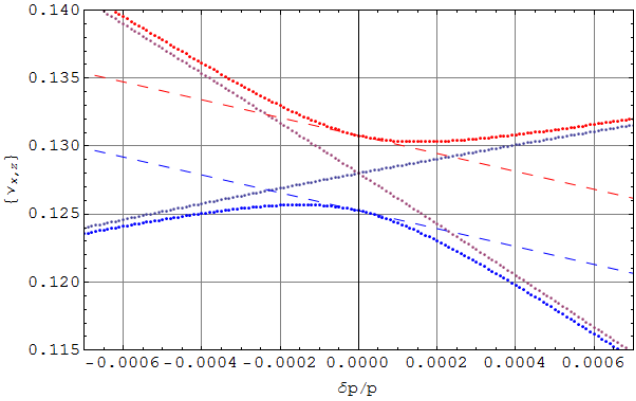

Рис. 2. Хроматизм бетатронных частот, моделирование.

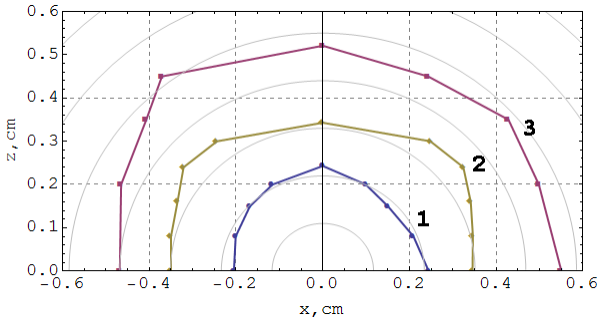

Рис. 3. Расчётная ДА: только хроматические секступоли (1); секступоли и края соленоидов (3); секступоли, края и F1Z-корректоры (2).

К сожалению, значительное влияние на ДА оказывает использование сильных дипольных коррекций, которые из-за компактности кольца вынужденно интегрированы в квадрупольные линзы. Такие корректоры неизбежно содержат секступольную (или скью-секступольную, для Z-корректора) составляющую магнитного поля. Сокращение ДА наблюдается экспериментально и подтверждается моделированием (ср. кривые 2 и 3 на рис. 3).

В третьей главе объясняется подход к получению максимальной светимости для всего диапазона энергий. Важным свойством оптики ВЭПП-2000 является жёсткая связь между величиной бета-функции в месте встречи и радиационным эмиттансом: уменьшение β^* приводит к систематическому росту бета-функции в арках, и, как следствие, росту эмиттанса. При этом

размер пучка в месте встречи $\sigma^* = \sqrt{\varepsilon\beta^*}$ остаётся с высокой точностью неизменным. В этих предположениях выражение для светимости, ограниченной порогом по эффектам встречи, может быть записано следующим образом

$$L = \frac{4\pi f_0 \gamma^2 \xi_{th}^{\ 2}}{r_e^2} \frac{\sigma^{*2}}{\beta^{*2}} .$$

Очевидно, что выгодно минимизировать β^*, однако её минимальное значение ограничивается размером пучка в максимуме бета-функции, в соленоиде. Однако, поскольку с падением энергии уменьшается и радиационный эмиттанс, возможно уменьшать величину β^* со снижением энергии. В итоге оптимальна зависимость ($\beta^* \propto \gamma$, $\varepsilon \propto \gamma$, $\sigma^* \propto \gamma$, $L \propto \gamma^2$), вместо ($\beta^* = \text{const}$, $\varepsilon \propto \gamma^2$, $\sigma^* \propto \gamma$, $L \propto \gamma^4$) для фиксированной оптики. Несмотря на то, что этот подход не учитывает прирост эмиттанса за счёт внутрисгусткового рассеяния на низкой энергии и сокращение ДА при уменьшении β^*, снижение бета-функции в месте встречи с понижением энергии позволяет получить заметный выигрыш при низких энергиях.

Некоторое внимание уделено моделированию эффектов встречи в линейном приближении и с помощью программы *Lifetrac*, симулирующей сильно-слабое приближение – формирование пучка малой интенсивности в присутствии сильного встречного пучка, на распределение которого слабый пучок не влияет. Хотя эти симуляции не описывают полностью реальные эффекты встречи, они дают ряд полезных предсказаний и рекомендаций для настройки машины. Так, например, симуляции показывают опасность некомпенсированной бетатронной связи в арках, в отличие от неточно компенсированного интеграла соленоидального поля, а также указывают на предпочтение смещения рабочей точки вниз от резонанса связи, что полностью подтверждается экспериментальным опытом работы.

Завершается глава обсуждением наблюдаемых эффектов встречи, наиболее неприятные из которых – взаимодействие нелинейностей встречного сгустка с машинными резонансами. Так, зависимость предельного тока встречного пучка от выбора рабочей точки представляет собой очень изрезанную структуру, на которой проявляются резонансы очень высокого порядка. В области энергий, где токи пучков ограничены не скоростью производства позитронов, а эффектами встречи, серьёзным ограничением становится т.н. flip-flop-эффект: самосогласованное решение, когда размеры одного из пучков сильно раздуты, а второго – практически не возмущены. Состояние метастабильно, при "ударе" инфлектора, например, в момент перепуска новой порции частиц, пучки могут "обменяться" размерами. Такая ситуация характеризуется хорошим временем жизни, но крайне низкой удельной светимостью.

В четвёртой главе дано описание метода измерения светимости по размерам пучков в точках вывода синхротронного излучения на ПЗС-камеры. Предполагая хорошо настроенную линейную электронно-оптическую струк-

туру накопителя, что означает хорошее знание транспортных матриц между любыми азимутами кольца, можно восстановить значение динамических бета-функции и эмиттанса в месте встречи, а следовательно, и размеры взаимодействующих сгустков. При этом, для каждой моды обоих пучков эмиттансы $\varepsilon_{x,z}^{+,-}$ и $\beta^{*+,-}_{x,z}$-функции являются свободными параметрами, поскольку они являются результатом самосогласованного действия пучков друг на друга, и в известной степени непредсказуемы. Для вычисления светимости остаётся лишь подставить в общее выражение найденные размеры, и интенсивность пучков, измеряемую с высокой точностью с помощью двух ФЭУ и трансформатора тока для абсолютной калибровки ФЭУ.

$$L = \frac{N_1 N_2 f_0}{2\pi\sqrt{(\sigma_{1x}{}^2 + \sigma_{2x}{}^2)(\sigma_{1y}{}^2 + \sigma_{2y}{}^2)}}.$$

До тех пор пока распределение пучков близко к гауссовому, не слишком деформировано нелинейным резонансом или эффектами встречи, метод даёт хорошее согласие с показаниями детекторов, основанных на измерении упругих рассеяний электронов и позитронов. Данные детекторов требуют заметного времени для набора статистики, в то время как измерения предложенным методом требуют не более 2-3 секунд. При этом время измерения не зависит от величины светимости, что является важным фактором при настройке накопителя, особенно при работе на низкой энергии. Помимо текущих измерений, показания люминометра, наряду с данными детекторов, архивируются, и их можно анализировать задним числом. Так, например, можно изучать зависимость светимости от тока пучка, или зависимость светимости от энергии (см. рис. 4), и прочие корреляции.

На рис. 4 представлена достигнутая за три сезона работы 2010-2013 светимость (мелкие синие, оливковые и фиолетовые точки) во всём диапазоне работы ВЭПП-2000. Красная линия отмечает гипотетическую предельную пиковую светимость при упомянутой выше оптимизации оптики, голубые штрихи – при фиксированной структуре. Чёрными треугольниками, квадратами, дисками, для сравнения, обозначена светимость ВЭПП-2М.

В пятой главе описаны планы развития комплекса ВЭПП-2000 и перспективы круглых встречных пучков в целом. Для достижения проектной светимости в верхней части диапазона энергии ВЭПП-2000 необходима работа коллайдера на пределе интенсивности пучков по эффектам встречи. Во-первых, это требует достаточной скорости производства позитронов. В настоящее время в Институте ведётся запуск нового инжекционного комплекса и сооружение канала транспортировки, которые должны обеспечить комплекс ВЭПП-2000 качественными интенсивными пучками. Во-вторых, для получения максимальной светимости требуется инжекция пучков на энергии эксперимента до энергии 1 ГэВ. Для выполнения обеих этих задач ведётся проектирование и изготовление прототипов для модернизации бустерного накопителя БЭП.

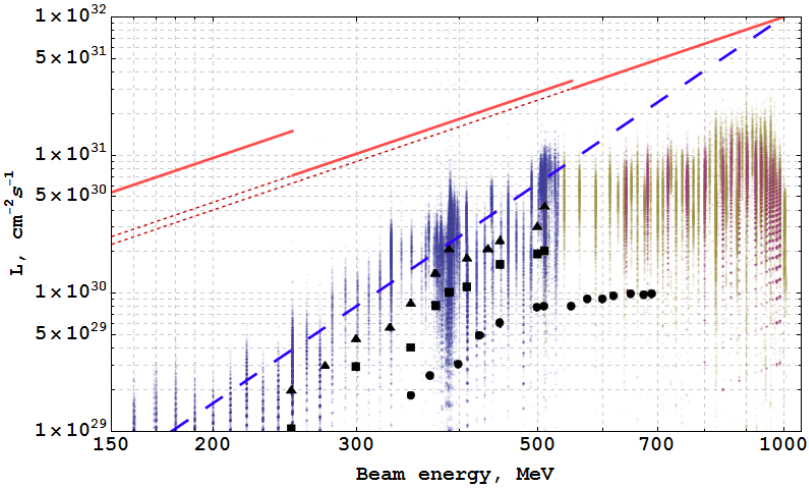

Рис. 4. Светимость ВЭПП-2000.

Вторая часть главы коротко суммирует текущее понимание возможностей применения круглых пучков в электрон-позитронных коллайдерах.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертации.

В приложении А описана поэлементная структура ВЭПП-2000 для разных режимов работы.

В приложении Б сосредоточены калибровки различных магнитных элементов.

В приложении В приведены результаты симуляций эффектов встречи в сильно-слабом приближении программой *Lifetrac*.

Основные результаты опубликованы в следующих работах

1. Shatunov Yu.M., … Schwartz D.B., … et al. Project of a New Electron-Positron Collider VEPP-2000. — Proc. 7th European Particle Accelerators Conference (EPAC'2000), Vienna, Austria, 2000, pp. 439-441.
2. Valishev A.A. … Shwartz D.B., … et al. Correction of the Betatron Coupling and Closed Orbit Distortion at the VEPP-2000 Collider. Proc. 19th IEEE Particle Accelerator Conference (PAC'2001), Chicago, USA, pp.1996-1999.
3. Shatunov P.Yu., … Shwartz D.B., … et al. Magnet structure of the VEPP-2000 electron positron collider. — Proc. 10-th European Particle Accelerators Conference (EPAC'2006), Edinburgh, Scotland, 2006, pp. 628-630.
4. Shatunov Yu.M., … Shwartz D.B., … et al. VEPP-2000 Electron-Positron Collider Commissioning and First Results of Round Colliding Beam Tests. — Proc.11-th European Particle Accelerators Conference (EPAC'2008), Genoa, Italy, 2008, pp. 956-958.

5. Romanov A.L., … Shwartz D.B., … et al. Correction the Round Beam Lattice of VEPP-2000 Collider Using Orbit Response Technique. — Proc. 11-th European Particle Accelerators Conference (EPAC'2008), Genoa, Italy, 2008, pp. 3053-3055.
6. Berkaev D.E., … Shwartz D.B., … et al. First commissioning results of VEPP-2000. // ICFA Beam Dynamics Newsletter 2009, Vol.48, pp. 235-242.
7. Achasov M.N., … Shwartz D.B., … et al. First experience with SND calorimeter at VEPP-2000 collider. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2009, Vol. 598, Issue 1, pp. 31-32.
8. Romanov A.L., … Shwartz D.B., … et al. Round Beam Lattice Correction using Response Matrix at VEPP-2000. — Proc. 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, Japan, 2010, pp. 4542-4544.
9. Shwartz D.B., … et al. Present status of VEPP-2000. // ICFA Beam Dynamics Newsletters, 2010, Vol.53, pp. 28-39.
10. Беркаев Д.Е., Шварц Д.Б., и др. Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000. Первые эксперименты. // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2011, Том 140, Вып.2, стр. 247.
11. Shatunov Yu.M., … Shwartz D.B., … et al. Round Beam Collisions at VEPP-2000. — Proc. 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC'11), San Sebatian, Spain, 2011, pp. 1926-1930.
12. Ачасов М.Н.,… Шварц Д.Б.,… и др. Измерение сечения процесса e+e− -> omega pi0 -> pi0pi0gamma в области энергии 1.1 - 1.9 ГэВ. // Письма в ЖЭТФ (2011), т. 94, вып. 10, с. 796.
13. Shatunov Yu.M., … Shwartz D.B., … et al. Status of electron-positron collider VEPP-2000. — Proc. 23rd Russian Particle Accelerators Conference (RuPAC'2012), Saint-Petersburg, Russia, 2012, pp.15-19.
14. Akhmetshin R.R., … Shwartz D.B. … et al. First Results from the CMD-3 Detector at the VEPP-2000 Collider. // Nuclear Physics B – Proceedings Supplements, Vol. 225-227, 2012, pp. 43-47.
15. Абакумова Е.В., … Шварц Д.Б., … и др. Статус экспериментов с детектором СНД на коллайдере ВЭПП-2000: Препринт 2012-20 – Новосибирск, ИЯФ СО РАН, 2012.

ШВАРЦ Дмитрий Борисович

КРУГЛЫЕ ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ
В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 03.10. 2013 г.
Сдано в набор 07.10. 2013 г.
Формат 60x90 1/16. Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 23

Обработано на PC и отпечатано на
ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11