

На правах рукописи



Богомягков Антон Викторович

**ОДНОЧАСТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ,  
ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ  
СОВРЕМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И  
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ  
КОЛЛАЙДЕРОВ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2024

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

**Научный консультант:** **Левичев Евгений Борисович**  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

**Официальные оппоненты:** **Иванов Сергей Владиславович**  
доктор физико-математических наук, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», директор

**Костромин Сергей Александрович**  
доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, помощник директора по реализации крупных инфраструктурных проектов

**Овсянников Дмитрий Александрович**  
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», заведующий кафедрой

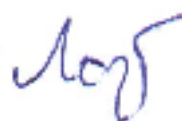
**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита диссертации состоится «18» июня 2024 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «26» апреля 2024 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор РАН



Лотов Константин  
Владимирович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Накопители заряженных частиц предназначены для проведения исследований с пучками высокой энергии. К этому классу относятся электрон-позитронные коллайдеры, источники синхротронного излучения (СИ), охладители для подготовки пучков с нужными параметрами для дальнейшего использования и т.п. В XXI веке эксперименты с использованием источников синхротронного излучения (СИ) и электрон-позитронных коллайдеров потребовали вывода этих установок в новые области параметров — высоких яркости, светимости, энергетического разрешения и т.д. При разработке методов дальнейшего повышения характеристик накопителей частиц оказались существенными физические явления, которыми раньше можно было пренебречь. Изучению таких эффектов и поиску способов преодоления вызванных ими ограничений посвящена данная работа.

Диссертация объединяет результаты исследований, проведённых автором в ИЯФ СО РАН за период 2008–2023 гг., в процессе работы над достижением рекордной точности измерения энергии в накопителях электронов и позитронов, проектами современных  $e^+e^-$  коллайдеров с беспрецедентной светимостью и/или энергией, источников синхротронного излучения со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) эмиттансом. Несмотря на кажущуюся разноплановость таких исследований, их объединяет предмет — ограничения эффективности экспериментальных возможностей установки на предельно достижимом уровне (светимости для коллайдеров, яркости для источников СИ, точности калибровки энергии пучка для исследований узких состояний и т.д.). Кроме того, все эти исследования требуют углублённого анализа динамики пучков, использования нестандартных методик, применения аналитических и численных вычислений повышенной точности. При этом, работа на пределе достигнутых характеристик (или с их превышением) приводит либо к необходимости изучения ранее не рассматривавшихся явлений, либо к обнаружению новых эффектов (например, ограничение динамической апертуры из-за синхротронного излучения в коллайдерах сверхвысокой энергии), либо к исследованию уже известных фактов, но с существенным увеличением уровня точности рассмотрения.

### Степень разработанности темы исследования

Источник СИ 4-го поколения должен обладать горизонтальным эмиттансом  $\varepsilon_x \lesssim 500$  пм; обсуждаются установки с эмиттансом  $\varepsilon_{x,y} = 10$  пм (что является дифракционным пределом для излучаемых фотонов с энергией 10 кэВ). В настоящее время большинство источников СИ принадлежит к 3-му поколению ( $\varepsilon_x \approx 1 - 10$  нм), для многих из них планируют модернизацию с целью уменьшения эмиттанса и перехода в 4-ое поколение. Работающих установок 4-го поколения на данный момент всего три, и в таблице 1 приведены существующие, строящиеся и проектируемые источники СИ 4-го поколения. Основной проблемой

Таблица 1 – Сравнение существующих (\*), строящихся и проектируемых источников СИ 4-го поколения

Установка	Страна	$E$ , ГэВ	$P$ , м	$\varepsilon_x$ , пм
ALS-U [1]	США	2	196	70
SLS 2.0 [2]	Швейцария	2.4	288	131
ELETRA 2 [3]	Италия	2.4	259	212
SOLEIL II [4]	Франция	2.75	354	84
СКИФ [5]	Россия	3	476	72
SIRIUS* [6]	Бразилия	3	518	250
MAX IV* [7]	Швеция	3	528	330
DIAMOND II [8]	Англия	3	560	162
ESRF-EBS* [9]	Франция	6	844	133
APS-U [10]	США	6	1104	42
HEPS [11; 12]	Китай	6	1360	60
Spring-8 II [13]	Япония	6	1436	140
PETRA IV [14]	Германия	6	2304	20
СИЛА [15]	Россия	6	1100	72

этих установок является деградация динамической и энергетической апертур по мере уменьшения эмиттанса. Динамическая апертура становится такой маленькой, что не позволяет использовать традиционных надёжных и эффективных схем инжекции. Кроме того, малая энергетическая апертура ограничивает время жизни пучка, из-за возросшего влияния эффекта Тушека [16; 17] (однократное внутри сгустковое рассеяние) при малых размерах и большом токе пучка. В Новосибирске создаётся источник СИ четвёртого поколения ЦКП “СКИФ”, уникальностью которого является малый эмиттанс  $\varepsilon_x \approx 75$  пм совместно с достаточно большой динамической апертурой, позволяющей применять стандартную схему инжекции, хорошим временем жизни пучка и относительно небольшим периметром.

На рисунке 1 показана достигнутая пиковая светимость в  $e^-e^+$  коллайдерах в зависимости от энергии и года реализации. Возможность дальнейшего

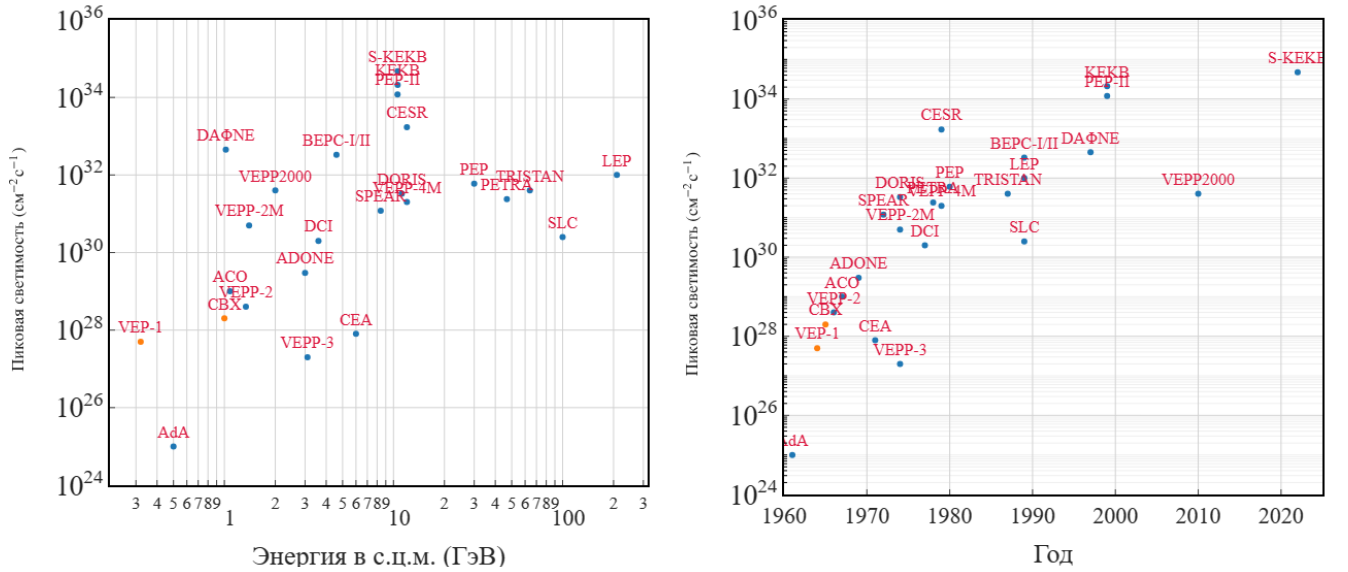


Рисунок 1 – Светимость  $e^-e^+$  коллайдеров в зависимости от энергии в системе центра масс сталкивающихся пучков (слева) и в зависимости от года работы

увеличения светимости в будущих проектах (таблица 2) связывается с использованием новой схемы встречи пучков, названной “крабовой перетяжкой” (по английски Crab Waist) [18].

Таблица 2 – Сравнение существующих (\*) и проектируемых коллайдеров с крабовой перетяжкой

Установка	Страна	$E_{с.ц.м.}$ , ГэВ	$\mathcal{L}$ , $см^{-2}см^{-1}$
ДАФНЕ* [19]	Италия	1.02	$4.5 \times 10^{32}$
SuperKEKB* [20]	Япония	10.58	$4.71 \times 10^{34}$
SuperB [21]	Италия	10	$1 \times 10^{36}$
FCCee [22]	Швейцария	90 – 365	$230 – 1.6 \times 10^{34}$
CEPC [23]	Китай	90 – 360	$230 – 1 \times 10^{34}$
Супер $c-\tau$ фабрика [24]	Китай	2 – 7	$0.5 – 0.8 \times 10^{35}$
Супер $c-\tau$ фабрика [25]	Россия	3 – 7	$0.29 – 1 \times 10^{35}$

Реализация преимуществ новой схемы пересечения встречается со значительными трудностями связанными с ограничением динамической апертуры, времени жизни пучка, организацией сложного участка финального фокуса внутри детектора и т.д. Некоторые (но не все) аспекты новой схемы встречи были успешно испытаны в коллайдере ДАФНЕ [26; 27], что позволило увеличить светимость в три раза. Дальнейшее увеличение светимости ограничивались невозможностью модификации работающей установки с целью реализации полной схемы.

Опыт работы крабовой перетяжки в коллайдере Super-KEKB (работающим в настоящее время) показал увеличение светимости более чем в два раза

до  $\mathcal{L} = 4.71 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{см}^{-1}$  [20], но непредвиденные (и не всегда понятные) трудности не позволяют в настоящее время достигнуть проектной светимости  $\mathcal{L} = 8 \times 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{см}^{-1}$  [28]. Уменьшение динамической апертуры при включении крабового секступоля наблюдается во всех проектах, что приводит к существенному уменьшению времени жизни пучка из-за внутрисгусткового рассеяния (эффект Тушека) [16; 17] в коллайдерах с энергией пучка меньше 3 ГэВ. Например, в Новосибирском проекте Супер  $s$ - $\tau$  фабрики 2011 года время жизни пучка составляет меньше 30 с на энергии пучка  $E = 1.5$  ГэВ при светимости  $\mathcal{L} = 1 \times 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{см}^{-1}$  [25; 29].

В коллайдерах на сверхвысокую энергию с экстремально малой вертикальной бета-функцией в точке встречи (соответственно, очень большие бета-функции в финальных квадрупольных линзах) появилось ограничение динамической апертуры за счёт синхротронного излучения в финальных линзах [30]. Ограничение горизонтальной апертуры было замечено ранее на коллайдере LEP [31], но ограничение вертикальной устойчивой амплитуды движения даже в отсутствие нелинейных элементов было обнаружено впервые с помощью численного моделирования и объясняется ниже.

Измерение массы  $\Upsilon$ -мезона с наилучшей точностью было произведено на ВЭПП-4 с детектором MD-1 и составило  $m_\Upsilon = 9460.40 \pm 0.10$  МэВ [32–34]. В настоящее время на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР [35] запланировано новое измерение массы  $\Upsilon$ -мезона с точностью лучшей 0.05 МэВ.

Параметры  $Z$  бозона  $m_Z = 91187.5 \pm 2.1$  МэВ,  $\Gamma_Z = 2495.2 \pm 2.2$  МэВ с рекордной точностью были определены на LEP [36], а параметры  $W$  бозона были измерены на Тэватроне  $m_W = 80.379 \pm 0.012$  ГэВ [37; 38]. На коллайдере FCC-ee запланировано улучшить точность измерения масс  $Z$  бозона (энергия пучка  $E_0 = 45.6$  ГэВ) до 100 кэВ ( $\Delta E/E_0 \lesssim 2 \cdot 10^{-6}$ ) и  $W$  бозона (энергия пучка  $E_0 = 80$  ГэВ) до 500 кэВ ( $\Delta E/E_0 \lesssim 6 \cdot 10^{-6}$ ) [22], с использованием метода резонансной деполяризации (РД) [39; 40] для калибровки энергии пучка.

**Целями диссертационной работы** являются:

1. обоснование и создание магнито-оптической структуры источника СИ 4-го поколения ЦКП “СКИФ” с рекордно малым (для такого класса установок) горизонтальным эмиттансом,
2. выбор параметров и построение оптической структуры Супер  $s$ - $\tau$  фабрики для достижения беспрецедентной светимости  $\mathcal{L} = 1 \times 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{см}^{-1}$  и времени жизни пучка по эффекту Тушека больше 300 с,
3. исследование новых эффектов в динамике пучка будущего циклического коллайдера на сверхвысокую энергию FCC-ee, ограничивающих его работу,
4. достижение рекордной точности измерения энергии в системе центра масс в экспериментах на накопителях электронов и позитронов.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

1. рассмотрены источники нелинейного возмущения, ограничивающие динамическую апертуру в циклических ускорителях, такие как секступоль, октуполь, комбинации секступолей и октуполей, края квадрупольных линз и нарушение параксиальности,
2. построена теория нелинейного хроматизма оптических функций до 3-го порядка,
3. рассмотрены масштабные свойства источников СИ, определившие фундаментальные подходы к созданию магнитной структуры источника СИ ЦКП “СКИФ”,
4. исследована ячейка с минимальным эмиттансом ТМЕ, на ее основе создана магнитная структура накопителя “СКИФ”,
5. исследовано ограничение динамической апертуры крабовыми секступолями в проекте Супер с- $\tau$  фабрики,
6. найдена оптическая структура Супер с- $\tau$  фабрики, позволяющая достигнуть светимости  $\mathcal{L} = 1 \times 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{см}^{-1}$  и времени жизни пучка по эффекту Тушека больше 300 с,
7. изучено многократное влияние пучкового излучения на параметры пучка, найдены их равновесные значения, и предложены новые параметры FCC-ee,
8. предложена альтернативная структура промежутка встречи с полноценными секциями коррекции хроматизма для FCC-ee,
9. обнаружено и исследовано новое ограничение динамической апертуры синхротронным излучением в финальных линзах FCC-ee,
10. найдены выражения для средневзвешенной по светимости энергии с учётом хроматизмов оптических функций,
11. рассчитаны поправки и ошибки определения энергии в системе центра масс для экспериментов на ВЭПП-4М по измерению массы  $\Upsilon$ -мезона и на FCC-ee по измерению масс и ширин  $Z$  и  $W^\pm$  бозонов.

### **Научная новизна**

1. Впервые сделаны аналитические расчёты динамической апертуры для секступольного возмущения не использующие приближения изолированного резонанса для секступольного возмущения (параграф 1.2), совпадающие с

результатами численного моделирования и объясняющие пороговое уменьшение горизонтальной апертуры при переходе от одномерного движения к двумерному (при бесконечно малой вертикальной амплитуде).

2. Впервые обнаружена интерференция секступольного и октупольного потенциалов в высоких порядках теории возмущений (параграф 1.4), “Замешивание” секступольных и октупольных членов может накладывать ограничения на коррекцию динамической апертуры октупольными линзами.
3. Впервые найдены варианты комбинаций секступолей без квадратичных aberrаций (параграф 1.5), помимо хорошо известной  $-I$  пары секступолей.
4. Впервые для  $-I$  пары секступолей (параграф 1.5)
  - a) оценено искажение фазовых траекторий, не ограничивающее динамическую апертуру непосредственно, но приводящее к потерям частиц на границе физической апертуры из-за большого биения амплитуды,
  - b) рассчитано влияние толщины секступолей на динамическую апертуру и предложен способ коррекции такого влияния,
  - c) аналитически оценены зависимость частоты от амплитуды и ограничение апертуры,
  - d) найдена зависимость динамической апертуры от величины неточности минус-единичного преобразования.
5. Впервые получены выражения для хроматизма оптических функций до третьего порядка (параграф 1.7), позволившие выбрать схему организации секступолей в Супер  $s - \tau$  фабрике для увеличения энергетической апертуры.
6. Впервые найдены и исследованы четыре решения симметричной ячейки магнитной структуры источника СИ типа ТМЕ, прослежена связь с параметрами накопителя.
7. На основе полученных результатов создаётся первый в России источник СИ 4-го поколения ЦКП “СКИФ” со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) горизонтальным эмиттансом  $\varepsilon_x = 72$  пм при энергии пучка 3 ГэВ.
8. Впервые получена структура и параметры Супер  $s-\tau$  фабрики со светимостью  $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  на энергиях пучка 2.5 – 3.5 ГэВ, на энергии 2 ГэВ светимость составила  $\mathcal{L} = 4 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , на энергии 1.5 ГэВ  $\mathcal{L} = 2.9 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  с током пучка в 3 А и временем жизни пучка за счёт эффекта Тушека  $\geq 300$  с.



9. Впервые подробно исследован многократный эффект пучкового излучения (beamstrahlung), приводящий к установлению новых равновесных энергетического разброса и продольного размера, оптимизированы параметры коллайдера FCC-ee, увеличившие светимость 1.5–10 раз в разных экспериментальных режимах работы [41].
10. Впервые для коллайдера на сверхвысокую энергию FCC-ee предложена схема коррекции нелинейного хроматизма дополнительными секступолями в местах с малой бета функцией, но с большой хроматической производной бета функции второго порядка.
11. Впервые обнаружено и объяснено ограничение вертикальной апертуры излучением частиц в полях финальных квадруполь для коллайдеров на сверхвысокие энергии FCC-ee и CEPC.
12. Впервые проведён анализ неточностей определения энергии в системе центра масс для экспериментов по изучению  $\Upsilon$  мезона на ВЭПП-4М (энергия пучка  $E = 4.75$  ГэВ) и для экспериментов на FCC-ee (с энергиями пучка  $E = 45$  ГэВ и  $E = 80$  ГэВ).

### **Теоретическая и практическая значимость**

Проведённые в работе аналитические и численные расчёты различных источников нелинейного возмущения и нелинейного хроматизма позволили

1. получить аналитические выражения для динамической апертуры секступольного возмущения не пользуясь приближением изолированного резонанса и показать принципиальное отличие ограничения области устойчивого движения для двумерной и одномерной нелинейной системы,
2. найти простейшие наборы секступолей без квадратичных aberrаций, помимо  $-I$  пары секступолей,
3. для  $-I$  пары секступолей
  - a) показать искажение фазовых траекторий, не ограничивающее ДА, но приводящее к потерям частиц на границе физической апертуры,
  - b) рассчитать влияние толщины секступолей на ДА и предложить способ коррекции такого влияния,
  - c) найти зависимость частоты от амплитуды,
  - d) найти динамическую апертуру и её зависимость от величины фазовой ошибки,
4. получить аналитические выражения хроматизма оптических функций до 3-его порядка,

5. создать оптическую структуру источника 4-го поколения СИ “СКИФ” со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) горизонтальным эмиттансом,
6. создать оптическую структуру и параметры Супер  $s$ - $\tau$  фабрики с беспрецедентной светимостью,
7. получить алгоритм нахождения равновесных параметров пучка с учётом пучкового излучения в установках на сверхвысокие энергии,
8. предложить новые параметры для коллайдера FCC-ee с большей светимостью,
9. объяснить ограничение динамической апертуры синхротронным излучением в финальных линзах установок на сверхвысокие энергии,
10. сосчитать ошибки и неточности измерения энергии в системе центра масс на установках ВЭПП-4М и FCC-ee.

### **Методология и методы исследования**

В работе используются аналитические и численные методы расчётов динамики пучка в циклических ускорителях. Результаты аналитических расчётов сравниваются с данными компьютерного моделирования. В свою очередь, результаты работы современных и используемых ниже моделирующих программ неоднократно проверялись экспериментально демонстрируя хорошее согласие.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты аналитического расчёта динамической апертуры без использования приближения уединённого резонанса для секступольного возмущения совпадают в первом порядке теории возмущений с результатами численного моделирования для FODO ячейки и для Супер  $s$  –  $\tau$  фабрики, объясняют пороговое уменьшение горизонтальной апертуры при переходе от одномерного движения к двумерному (даже для бесконечно малого вертикального возмущения) для Супер  $s$  –  $\tau$  фабрики.
2. Аналитические расчёты ДА и нелинейных параметров для  $-I$  пары секступолей с учётом их толщины позволяют оценить влияние “компенсированной” пары секступолей на ДА.
3. Полученные аналитические выражения для хроматизма оптических функций до третьего порядка, позволяют выбрать распределение секступолей, увеличивающее энергетическую апертуру в проекте в Супер  $s$  –  $\tau$  фабрики.

4. Рассчитанная оптическая структура источника 4-го поколения СИ ЦКП “СКИФ” со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) горизонтальным эмиттансом  $\varepsilon_x = 72$  пм имеет достаточно большие динамическую и энергетическую апертуры для применения стандартной схемы инъекции электронов.
5. Предложенная оптическая структура и параметры Супер  $s$ - $\tau$  фабрики позволяют получить светимость до  $\mathcal{L} = 10^{35}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на энергиях пучка 2.5 – 3.5 ГэВ, на энергии 2 ГэВ  $\mathcal{L} = 4 \times 10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, на энергии 1.5 ГэВ  $\mathcal{L} = 2.9 \times 10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.
6. Квантовые флуктуации излучения в поле встречного пучка (beamstrahlung), увеличивают равновесный энергетический разброс и длину сгустка.
7. Предложенные параметры коллайдера FCC-ee, позволяют увеличить светимость 1.5–10 раз в разных экспериментальных режимах работы.
8. Для коллайдеров на сверхвысокие энергии (например, FCC-ee и CEPC) вертикальная динамическая апертура ограничена излучением частиц в полях квадрупольных финального фокуса.
9. Систематическая ошибка определения энергии в системе центра масс для экспериментов по изучению  $\Upsilon$  мезона на ВЭПП-4М (на энергии пучка  $E = 4.75$  ГэВ) и для экспериментов на FCC-ee (энергии пучка  $E = 45$  ГэВ и  $E = 80$  ГэВ) может быть уменьшена до 50 кэВ (на энергии пучка  $E_0 = 4.75$  ГэВ), до 100 кэВ (на энергии пучка  $E_0 = 45.6$  ГэВ) и до 500 кэВ (энергия пучка  $E_0 = 80$  ГэВ).

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность работы подтверждается согласованностью теоретических и численных результатов. Опубликованные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на 10 ведущих международных научных конференциях:

1. The 2022 International Workshop on the High Energy Circular Electron Positron Collider, 2022;
2. XXVII Russian Particle Accelerator Conference, 2021;
3. IAS Program on High Energy Physics (HEP 2021), 2021;
4. 29th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop, 2021;
5. 28th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop, 2020;
6. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19), 2019;

7. FCC week 2018;
8. 38th International Conference on High Energy Physics, 2016;
9. 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC15), 2015;
10. 5th International Particle Accelerator Conference , 2014;

и опубликованы в виде 4 статей в сборниках трудов конференций и 7 тезисов докладов.

**Личный вклад автора** в получении результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Список публикаций, рекомендованных ВАК, приведённый в конце автореферата, содержит 12 работ. Авторский вклад соискателя заключается:

в статье 1 — в расчёте и анализе источников нелинейного возмущения, в выборе параметров, проектировании и оптимизации оптической структуры Супер  $s$ - $\tau$  фабрики с новым расположением крабовых секступолей, в расчётах динамической и энергетической апертур, времени жизни пучка по эффекту Тушека;

в статье 2 — в аналитическом и численном расчёте базовой ячейки ТМЕ, аналитическом и численном сравнении ячеек  $m$ ТМЕ и ТМЕ, базовой ячейки и использованной в структуре источника СИ ЦКП “СКИФ”, в расчёте локальной энергетической апертуры и яркости источника СИ ЦКП “СКИФ”, в аналитическом расчёте источника СИ с энергией пучка 6 ГэВ;

в статье 3 — в проведении численного моделирования и аналитическом анализе нелинейного движения частиц, в аналитическом решении шестимерных уравнений движения, построении теории ограничения динамической апертуры синхротронным излучением в финальных линзах, в сравнении результатов аналитических и численных расчётов;

в статье 4 — в аналитической анализе и расчёте нелинейного влияния краевых полей квадрупольных линз;

в статье 5 — в аналитическом расчёте и компьютерном моделировании при сравнении ячеек ТМЕ и SM-ТМЕ, построении численной модели источника СИ на этих ячейках;

в статье 6 — в аналитическом анализе нелинейных свойств промежутка встречи коллайдеров DAΦNE, SuperKEKB, SuperB, Супер  $s$ - $\tau$ , FCC-ee, в построении нескольких численных моделей промежутка финального фокуса для коллайдера с крабовой перетяжкой, в аналитическом расчёте преобразования координат до третьего порядка и в численном сравнении расчётов для существующих и будущих коллайдеров с крабовой перетяжкой;

в статье 7 — в разработке оптической структуры промежутка встречи коллайдера FCC-ee с организацией столкновения пучков по схеме крабовой перетяжки;

в статье 8 — в аналитическом расчёте влияния виглеров на равновесные параметры пучков, в аналитическом расчёте свойств ячейки FODO; в статьях 9, 10, 11, 12 — в аналитическом и численном анализе ошибок и неточностей определения энергии в системе центра масс в экспериментах по измерению масс  $J/\psi$ -  $\psi(2s)$  мезонов и массы  $\tau$  лептона на коллайдере ВЭПП-4М.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 267 страниц, включая 95 рисунков и 31 таблицу. Библиография включает 187 наименований на 23 страницах.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** дано краткое введение в линейную теорию циклических ускорителей, рассмотрены исследуемые в диссертации источники нелинейного возмущения движения частицы во внешнем заданном и не меняющемся во времени (коллективные эффекты не учитываются) электромагнитном поле, такие как: секступольные линзы (корректирующие хроматизм и “крабовые”) и их комбинации, октупольные линзы (которые применяют для увеличения апертуры, уменьшенной секступольными линзами), краевые поля магнитов и высшие члены в параксиальном приближении уравнений движения, нелинейный хроматизм. Результаты первой главы опубликованы в работе [50; 51].

**Во второй главе** обсуждаются подходы к конструированию магнитной структуры ЦКП “СКИФ”, позволившие получить экстремально малый горизонтальный эмиттанс и динамическую апертуру, позволяющую применять простую и надежную схему инжекции. Полученный энергетический акцептанс обеспечивает тушековское время жизни на уровне 5-10 часов. На примере периодической ячейки FODO, состоящей из двух квадрупольных и двух дипольных, изучена связь между глобальными параметрами источника СИ, такими как эмиттанс, периметр кольца, бетатронная частота, динамическая апертура, нелинейный хроматизм и параметрами ячейки – длина, угол поворота, силы квадрупольных и секступольных. Показано, что для большой динамической апертуры необходим малый набег бетатронной фазы, а уменьшение эмиттанса эффективно осуществлять увеличением числа элементарных ячеек.

Далее рассмотрена ячейка TME [52] (Theoretical Minimum Emittance) из трёх квадрупольных и одного диполя, в которой возможно достижение минимального для плоского магнита эмиттанса. Впервые показано, что в такой ячейке существует четыре оптически замкнутых решения. В одном из решений, действительно, достигается минимальный эмиттанс, но с большими силами квад-

руполь и секступоль, приводящими к неприемлемой динамической апертуре. Другое решение mTME (modified TME) обеспечивает эмиттанс в два раза больше, но при более слабых магнитных элементах. Незначительное уменьшение угла поворота магнита приводит к понижению эмиттанса до требуемого значения при более слабых силах квадруполей и секступолей, достаточной динамической апертуре и приемлемом периметре кольца. На основе этого решения создана структура источника СИ четвёртого поколения ЦКП “СКИФ”, уникальностью которого является малый эмиттанс  $\varepsilon_x \approx 72$  пм, периметр 476 м и большая динамическая апертура, достигаемая всего двумя семействами идентичных секступолей. Результаты второй главы опубликованы в работах [53–55].

**Третья глава** посвящена флагманскому проекту электрон-позитронного коллайдера ИЯФ СО РАН — Супер  $s$ - $\tau$  фабрике [29]. Описывается методика расчета и моделирования двухкольцевого коллайдера со схемой встречи пучков типа КП, позволяющего получить максимальную пиковую светимость  $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в диапазоне энергии пучков 2.5–3.5 ГэВ и  $3\text{--}4 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в диапазоне энергии пучков 1–2 ГэВ. Задача получения столь высокой светимости осложнена пожеланием физиков иметь возможность проводить эксперименты с продольно поляризованным пучком электронов, значительно расширяющим возможную научную программу. Результаты третьей главы опубликованы в работе [50] и доложены на следующих конференциях [25; 42; 43].

**В четвёртой главе** рассмотрено влияние синхротронного излучения в двух, активно развивающихся в настоящее время, проектах электрон-позитронных коллайдеров на сверхвысокую энергию (до 175 ГэВ на пучок) — FCC-ee (CERN) [22; 56] и CEPC (ИНЕР, Пекин) [57; 58]. Оба проекта предназначены, прежде всего, для прецизионного исследования бозона Хиггса [59; 60], однако имеют ввиду и более широкую физическую программу в диапазоне энергий от порога рождения  $Z$ -бозона до топ-кварка. При таких энергиях синхротронное излучение играет решающую роль в определении размеров коллайдеров — обе установки будут расположены в тоннеле длиной 100 км. Для CEPC максимальная мощность потерь на СИ ограничена величиной 30 МВт, для FCC-ee — 50 МВт.

Однако СИ не только определяет радиус кривизны магнитного поля этих сверх-коллайдеров, имеются и более “тонкие” эффекты, которые могут лимитировать их параметры и производительность. Два таких эффекта рассматриваются в этой главе на примере FCC-ee.

Первый из них связан с т.н. “пучковым” излучением (beamstrahlung) частицы в коллективном поле встречного сгустка. Это явление хорошо изучено для линейных встречных  $e^+e^-$  коллайдеров на высокую энергию [61; 62], где интенсивное пучковое излучение (ПИ) снижает эффективную энергию столкновений и светимость. После опубликования первых работ по циклическому  $e^+e^-$  коллайдеру FCC-ee В.И. Тельнов показал, что в циклическом ускорителе излучение электроном или позитроном кванта с очень высокой энергией будет приводить к потере частицы за пределами энергетической области устойчивости и, тем са-

мым, ограничивать время жизни пучков и светимость [63]. Однако будет происходить и процесс (более вероятный) излучения сталкивающимися частицами менее жестких фотонов, не приводящих непосредственно к гибели электронов и позитронов, однако существенно влияющих на эмиттанс и энергетический разброс пучков и ограничивающий светимость установки. Ранее такой эффект упоминался в связи с рассмотрением циклических  $e^+e^-$  коллайдеров на сверхвысокую энергию [64], однако впервые был подробно исследован в нашей работе [41]. Его изучение позволило оптимизировать параметры коллайдера FCC-ee и увеличить светимость от 1.5 до 10 раз в зависимости от энергии. Однократное испускание энергичного кванта с последующей потерей частицы и множественное излучение более мягких фотонов можно сравнить с однократным и многократным эффектом Тушека: первый так же определяет время жизни пучка, в то время, как второй — эмиттанс, энергетический разброс и т.д.

Второй эффект был обнаружен при моделировании движения частицы с учетом силы трения из-за синхротронного излучения (квантовая раскачка колебаний не рассматривалась). Было показано, что даже без нелинейностей поперечная динамическая апертура ограничивается, если учитывать СИ из квадрупольных линз. Ограничение горизонтальной апертуры в таких условиях ранее было объяснено Д. Джоветом, и названо им — радиационной бета-синхротронной связью [31], однако, как было выяснено автором диссертации (впервые), ограничение вертикальной амплитуды движения объясняется совсем другим механизмом. Учёт потери энергии от излучения в квадрупольных линзах приводит для движения в вертикальной плоскости к параметрическому резонансу с трением, который описывается уравнением, похожим на уравнение Ван-дер-Поля. Решение полученного уравнения показывает, что с ростом амплитуды вертикальных колебаний затухание сменяется анти-затуханием. Полученное пороговое значение хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [41; 65—67].

**Пятая глава** посвящена проблемам определения энергии в системе центра масс (ЭЦМ) в экспериментах на установках со встречными пучками. Проведение экспериментов на установках со встречными пучками требует не только высокой светимости, но и знания энергии в системе центра масс (ЭЦМ). Светимость определяет статистическую ошибку результатов эксперимента, другими словами как много событий изучаемого эффекта будет зарегистрировано, а неопределённость знания средней ЭЦМ создаёт систематические ошибки, то есть как точно измерены свойства эффекта.

Для определения ЭЦМ проводят калибровку энергии одного или обоих пучков и вычисляют среднюю ЭЦМ, используя измеренные параметры распределения пучков. Каждый шаг этой процедуры имеет свои неточности, поэтому конечная ошибка ЭЦМ требует скрупулёзного анализа различных эффектов связанных с динамикой пучка в ускорителе. В этой главе приведены результаты такого анализа для экспериментов по изучению  $\Upsilon$ -мезона на ВЭПП-4М (энергия пучка  $E = 4.75$  ГэВ). Обсуждение возможных ошибок калибровки энергии столкно-

вений, рассмотрение их источников интересно и для экспериментов на FCC-ee (с энергиями пучка  $E = 45$  ГэВ и  $E = 80$  ГэВ). Результаты пятой главы опубликованы в работах [68—70].

## Заключение

Основные результаты диссертационной работы:

1. впервые сделаны аналитические расчёты динамической апертуры без приближения уединённого резонанса для секступольного возмущения, совпавшие в первом порядке теории возмущений с результатами численного моделирования одномерной (горизонтальной) динамической апертуры FODO ячейки, объяснившие пороговое уменьшение горизонтальной при переходе от одномерного движения к двумерному (т.е., появления вертикальной компоненты даже с бесконечно малой амплитудой) для Супер  $s$ - $\tau$  фабрики,
2. впервые показана интерференция секступольного и октупольного возмущений, говорящая о том, что управление зависимостью частоты от амплитуды с помощью октуполей необходимо производить с определенной осторожностью, поскольку это меняет ширины резонансных зон и ДА,
3. впервые найдены простейшие наборы секступолей без квадратичных аберраций, помимо  $-I$  пары секступолей,
4. впервые для  $-I$  пары секступолей
  - a) показано искажение фазовых траекторий, не ограничивающее ДА, но приводящее к потерям частиц на границе физической апертуры,
  - b) рассчитано влияние толщины секступолей на ДА и предложен способ коррекции такого влияния,
  - c) аналитически оценены зависимость частоты от амплитуды и ДА,
  - d) найдена зависимость ДА от величины фазовой ошибки,
5. на примере FODO ячейки впервые прослежена связь между параметрами источника СИ: эмиттансом, размером кольца и ячейки, силы квадруполей и секступолей, динамической апертурой и нелинейным хроматизмом,
6. впервые найдены и исследованы четыре решения симметричной ячейки ТМЕ, прослежена связь с параметрами накопителя, построена структура источника СИ ЦКП “СКИФ”, демонстрирующая рекордное сочетание эмиттанса и динамической апертуры,



7. впервые объяснено уменьшение динамической апертуры в проектах коллайдеров со встречей пучков по схеме крабовой перетяжки, получено преобразование до четвёртого порядка с учётом интерференции крабового секступоля и краёв финальных линз, проведено сравнение коэффициентов преобразования и динамических апертур для различных коллайдеров, показано, что там где коэффициенты больше, апертура меньше,
8. впервые получена структура и параметры Супер  $s$ - $\tau$  фабрики со светимостью  $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  на энергиях 2.5 – 3.5 ГэВ, на энергии пучка 2 ГэВ светимость составила  $\mathcal{L} = 4 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , на энергии 1.5 ГэВ  $\mathcal{L} = 2.9 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  с током пучка в 3 А и временем жизни пучка за счёт эффекта Тушека  $\geq 300 \text{ с}$ ,
9. впервые детально исследовано влияние многократного пучкового излучения на равновесные длину и энергетический разброс пучка, предложены параметры коллайдера со сверхвысокой энергией FCC,
10. впервые обнаружен и исследован эффект ограничения динамической апертуры излучением из квадрупольных линз коллайдера со сверхвысокой энергией FCC-ее,
11. получены формулы для нелинейного хроматизма частот и бета функций до третьего порядка в виде удобном для анализа и управления, а не в виде многомерных интегралов, предложены способы коррекции нелинейного хроматизма, на примере структуры коллайдера FCC-ее показано увеличение энергетического акцептанса,
12. сосчитано влияние хроматизма бета функции на среднюю энергию встреч в коллайдере ВЭПП-4М и в структуре коллайдера FCC-ее,
13. сосчитаны ошибки и неточности определения энергии в системе центра масс для экспериментов по изучению  $\Upsilon$  мезона на ВЭПП-4М (энергия пучка  $E = 4.75 \text{ ГэВ}$ ) и для экспериментов на FCC-ее (с энергиями пучка  $E = 45 \text{ ГэВ}$  и  $E = 80 \text{ ГэВ}$ ).

## Цитированная литература

1. Design Progress of ALS-U, the Soft X-ray Diffraction Limited Upgrade of the Advanced Light Source / C. Steier [и др.] // 10th International Particle Accelerator Conference. — 2019. — TUPGW097. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPGW097.
2. *Streun A.* SLS 2.0, the Upgrade of the Swiss Light Source // JACoW. — 2022. — T. IPAC2022. — TUPOST032. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOST032.
3. *Karantzoulis E.* ELETTRA status & upgrade // (29th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop). — 11.2021. — URL: [https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/3/attachments/5/29/Elettra\\_status\\_ESLS29.pptx](https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/3/attachments/5/29/Elettra_status_ESLS29.pptx).
4. *al. A. L. et.* TDR baseline lattice for SOLEIL II upgrade project // Proc. IPAC'23 (Venice, Italy). — JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2023. — C. 1054—1056. — (IPAC'23 - 14th International Particle Accelerator Conference ; 14). — ISBN 978-3-95450-231-8. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPM031. — URL: <https://indico.jacow.org/event/41/contributions/874>.
5. *Bogomyagkov A.* SKIF project status // (29th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop). — 11.2021. — URL: <https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/18/attachments/6/46/Bogomyagkov-SKIF.pptx>.
6. Status of Sirius Operation / L. Lin [и др.] // 13th International Particle Accelerator Conference. — 2022. — TUPOMS002. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOMS002.
7. Status of the MAX IV Accelerators / P. Tavares [и др.] // 10th International Particle Accelerator Conference. — 2019. — TUYPLM3. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-TUYPLM3.
8. *Kallestrup J.* Diamond Light Source status upgrade // (29th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop). — 11.2021. — URL: [https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/2/attachments/9/20/Diamond\\_ESLS\\_2021.pptx](https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/2/attachments/9/20/Diamond_ESLS_2021.pptx).
9. *Revol J.-L.* ESRF status development // (29th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop). — 11.2021. — URL: [https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/2/attachments/9/20/Diamond\\_ESLS\\_2021.pptx](https://indico.esrf.fr/event/1/contributions/2/attachments/9/20/Diamond_ESLS_2021.pptx).
10. *Fornek T. E.* Advanced Photon Source Upgrade Project Final Design Report. — 2019. — Май. — DOI: 10.2172/1543138. — URL: <https://www.osti.gov/biblio/1543138>.
11. The HEPS project / Y. Jiao [и др.] // J. Synchrotron Radiat. — 2018. — Т. 25, № 6. — С. 1611—1618. — DOI: 10.1107/s1600577518012110.

12. Modification and optimization of the storage ring lattice of the High Energy Photon Source / Y. Jiao [и др.] // Rad. Det. Tech. Meth. — 2020. — Т. 4, № 4. — С. 415–424. — DOI: 10.1007/s41605-020-00189-7.
13. SPring-8 Upgrade Project / H. Tanaka [и др.] // 7th International Particle Accelerator Conference. — 2016. — WEPOW019. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2016-WEPOW019.
14. Status of the PETRA IV Machine Project / R. Bartolini [и др.] // JACoW. — 2022. — Т. IPAC2022. — TUPOMS029. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOMS029.
15. Fourth-Generation Synchrotron Radiation Source with X-ray Free-Electron Laser SILA: Concept of Accelerator–Storage Complex / M. V. Kovalchuk [и др.] // Crystallography Reports. — 2022. — Т. 67, № 5. — С. 676–683. — DOI: 10.1134/S1063774522050078.
16. Lifetime and beam size in a storage ring / C. Bernardini [и др.] // Phys. Rev. Lett. / под ред. C. Pellegrini, A. Sessler. — 1963. — Т. 10. — С. 407–409. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.10.407.
17. *Piwinski A.* The Touschek effect in strong focusing storage rings. — 1998. — Нояб. — arXiv: physics/9903034.
18. *Raimondi P.* Status on Super-B Effort // Conf. Proc. — 2006. — URL: <http://www.lnf.infn.it/conference/superb06/talks/raimondi1.ppt>.
19. *Zobov M.* New generation electron-positron factories // Phys. Part. Nucl. — 2011. — Т. 42. — С. 782–799. — DOI: 10.1134/S1063779611050066. — arXiv: 1106.5329 [physics.acc-ph].
20. Simulations and experimental results of beam-beam effects in SuperKEKB / D. Zhou [и др.] // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2023. — Т. 26, № 7. — С. 071001. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.071001. — arXiv: 2306.02681 [physics.acc-ph].
21. SuperB: A High-Luminosity Asymmetric e<sup>+</sup> e<sup>-</sup> Super Flavor Factory. Conceptual Design Report / M. Bona [и др.]. — 2007. — arXiv: 0709.0451 [hep-ex].
22. FCC-ee: The Lepton Collider: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 2 / A. Abada [и др.] // Eur. Phys. J. ST. — 2019. — Т. 228, № 2. — С. 261–623. — DOI: 10.1140/epjst/e2019-900045-4.
23. *Gao J.* CEPC Accelerator TDR Status and AC Power Consumptions // JACoW. — 2023. — Т. eeFACT2022. — С. 262–269. — DOI: 10.18429/JACoW-eeFACT2022-FRXAS0102.
24. Progress of Conceptual Study for the Accelerators of a 2-7GeV Super Tau Charm Facility at China / Q. Luo [и др.] // 10th International Particle Accelerator Conference. — 2019. — MOPRB031. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPRB031.

25. *Bogomyagkov A.* Super C-Tau factory status in Novosibirsk // (The 2022 International Workshop on the High Energy Circular Electron Positron Collider). — 10.2022. — URL: <https://indico.ihep.ac.cn/event/17020/contributions/118189/attachments/64353/75182/Bogomyagkov-ctau-CEPC-2022.pptx>.
26. DAFNE upgrade status / D. Alesini [и др.] // Nucl. Phys. Proc. Suppl. — 2008. — Т. 181/182. — С. 385—389. — DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2008.09.070.
27. Present status of the DAFNE upgrade and perspectives / C. Milardi [и др.] // Int. J. Mod. Phys. — 2009. — Т. A24. — С. 360—368. — DOI: 10.1142/S0217751X09043687.
28. Accelerator design at SuperKEKB / Y. Ohnishi [и др.] // PTEP. — 2013. — Т. 2013. — 03A011. — DOI: 10.1093/ptep/pts083.
29. Project of a Super Charm-Tau factory at the Budker Institute of Nuclear Physics in Novosibirsk / A. E. Bondar [и др.] // Phys. Atom. Nucl. — 2013. — Т. 76. — С. 1072—1085. — DOI: 10.1134/S1063778813090032. — [Yad. Fiz.76,no.9,1132(2013)].
30. Design of beam optics for the Future Circular Collider  $e^+e^-$ -collider rings / K. Oide [и др.] // Physical Review Accelerators and Beams. — 2016. — Т. 19, № 11. — С. 111005. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.111005, 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.049901. — eprint: 1610.07170 (physics.acc-ph). — [Addendum: Phys. Rev. Accel. Beams20,no.4,049901(2017)].
31. *Jowett J.* Dynamic aperture for LEP: Physics and calculations // Conf. Proc. — 1994. — Т. C9401174. — С. 47—71. — [47(1994)].
32. *Shamov A. G., Rezanova O. L.* Revision of results on  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$ , and  $\Upsilon(3S)$  masses // Phys. Lett. B. — 2023. — Т. 839. — С. 137766. — DOI: 10.1016/j.physletb.2023.137766. — arXiv: 2210.13930 [hep-ex].
33. High Precision Measurement of the  $\Upsilon$  Meson Mass / A. S. Artamonov [и др.] // Phys. Lett. B / под ред. P. Petiau, M. Porneuf. — 1982. — Т. 118. — С. 225. — DOI: 10.1016/0370-2693(82)90633-5.
34. New Measurement of the  $\Upsilon$  Meson Mass / S. E. Baru [и др.] // Z. Phys. C. — 1986. — Т. 30. — С. 551—558. — DOI: 10.1007/BF01571803. — [Erratum: Z.Phys.C 32, 622 (1986)].
35. The status of VEPP-4 / V. E. Blinov [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2014. — Т. 11. — С. 620—631. — DOI: 10.1134/S1547477114050082.
36. Precision electroweak measurements on the  $Z$  resonance / S. Schael [и др.] // Phys. Rept. — 2006. — Т. 427. — С. 257—454. — DOI: 10.1016/j.physrep.2005.12.006. — arXiv: hep-ex/0509008.

37. *Group T. E. W.* 2012 Update of the Combination of CDF and D0 Results for the Mass of the W Boson. — 2012. — Apr. — arXiv: 1204.0042 [hep-ex].
38. Review of Particle Physics / M. Tanabashi [и др.] // Phys. Rev. D. — 2018. — Т. 98, № 3. — С. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001.
39. Absolute Calibration of Beam Energy in the Storage Ring. Phi-Meson Mass Measurement / A. Bukin [и др.] // International Symposium on High-Energy and Elementary Particle Physics. — 07.1975. — С. 138—147.
40. High precision energy calibration with resonant depolarization at the VEPP-4M collider / V. Blinov [и др.] // Nuclear and Particle Physics Proceedings / под ред. M. Aguilar-Benítez [и др.]. — 2016. — Т. 273—275. — С. 210—218. — DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.028.
41. *Bogomyagkov A., Levichev E., Shatilov D.* Beam-beam effects investigation and parameters optimization for a circular  $e^+e^-$  collider at very high energies // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2014. — Apr. — Т. 17, вып. 4. — С. 041004. — DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.17.041004. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.17.041004>.
42. *Bogomyagkov A. V.* Beam dynamics challenge in Novosibirsk Super C-Tau Factory // (XXVII Russian Particle Accelerator Conference). — 09.2021. — URL: <https://indico.jinr.ru/event/1956/contributions/14532/>.
43. *Bogomyagkov A.* BINP Super Charm-Tau Factory Status // (IAS Program on High Energy Physics (HEP 2021)). — High Energy Physics HKUST IAS (The Hong Kong University of Science, Technology), 01.2021. — URL: [https://indico.cern.ch/event/971970/contributions/4174483/attachments/2173723/3670109/Bogomyagkov\\_CTau\\_2021.pdf](https://indico.cern.ch/event/971970/contributions/4174483/attachments/2173723/3670109/Bogomyagkov_CTau_2021.pdf).
44. *Bogomyagkov A.* SKIF project status // (28th European Synchrotron Light Source (ESLS) Workshop). — 12.2020. — URL: <https://www.esrf.fr/home/events/conferences/2020/28th-esls-workshop.html>.
45. Dynamic aperture limitation in  $e^+e^-$  colliders due to synchrotron radiation in quadrupoles / A. Bogomyagkov [и др.] // (10th International Particle Accelerator Conference (IPAC19)). — 05.2019. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/mopgw059.pdf>.
46. *Bogomyagkov A.* Resonant depolarization precision, relation between spin tune and beam energy // (FCC week 2018). — 04.2018. — URL: <https://indico.cern.ch/event/656491/contributions/2939096/>.
47. Review of interaction regions for future crab waist colliders / A. Bogomyagkov [и др.] // (38th International Conference on High Energy Physics). — 08.2016. — URL: <https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1072524/attachments/1320064/1979311/Bogomyagkov.pdf>.

48. *Bogomyagkov A., Levichev E.* Interaction region for crab waist scheme of the future electron-positron collider (CERN) // (6th International Particle Accelerator Conference (IPAC15)). — 05.2015. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2015/papers/tupty018.pdf>.
49. *Bogomyagkov A., Levichev E., Piminov P.* Interaction Region Lattice for FCC-ee (TLEP) // (5th International Particle Accelerator Conference ). — 06.2014. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/papers/thpri008.pdf>.
50. *Bogomyagkov A., Levichev E., Piminov P.* Final focus designs for crab waist colliders // Physical Review Accelerators and Beams. — 2016. — Т. 19, № 12. — С. 121005. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.121005.
51. Dynamic Aperture of the NICA Collider Optimized with a Genetic Algorithm / A. V. Bogomyagkov [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2019. — Т. 16, № 1. — С. 21–29. — DOI: 10.1134/S1547477119010060.
52. *Lee S., Teng L.* Theoretical minimum emittance lattice for an electron storage ring // Conf. Proc. C / под ред. L. Lizama, J. Chew. — 1991. — Т. 910506. — С. 2679–2681.
53. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk / G. Baranov [и др.] // Physical Review Accelerators and Beams. — 2021. — Т. 24, № 12. — С. 120704. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704.
54. Beam optics and dynamics in electron storage rings with ultralow emittance / G. N. Baranov [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2016. — Т. 13, № 7. — С. 884–889. — DOI: 10.1134/S1547477116070086.
55. *Bogomyagkov A. V., Karyukina K. Y., Levichev E. B.* Reduction of the beam emittance in the charged-particle storage rings with the help of periodic magnetic wigglers // Tech. Phys. — 2016. — Т. 61, № 1. — С. 119–124. — DOI: 10.1134/S1063784216010060.
56. <http://cern.ch/fcc>. — URL: <http://cern.ch/fcc>.
57. *CEPC*. <http://cepc.ihep.ac.cn> : тех. отч. — URL: <http://cepc.ihep.ac.cn>.
58. CEPC Conceptual Design Report: Volume 1 - Accelerator. — 2018. — Сент. — arXiv: 1809.00285 [physics.acc-ph].
59. FCC Physics Opportunities: Future Circular Collider Conceptual Design Report Volume 1 / A. Abada [и др.] // Eur. Phys. J. C. — 2019. — Т. 79, № 6. — С. 474. — DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6904-3.
60. CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 - Physics & Detector / M. Dong [и др.]. — 2018. — Ноябрь. — arXiv: 1811.10545 [hep-ex].
61. *Chen P.* An Introduction to Beamstrahlung and Disruption // Lect. Notes Phys. / под ред. M. Month, S. Turner. — 1988. — Т. 296. — С. 495.

62. *Chen P.* THE NATURE OF BEAMSTRAHLUNG // Conf. Proc. C. — 1987. — T. 870107. — C. 314.
63. *Telnov V. I.* Restriction on the energy and luminosity of  $e^+e^-$  storage rings due to beamstrahlung // Phys. Rev. Lett. — 2013. — T. 110. — C. 114801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.114801. — eprint: 1203.6563.
64. Limitations on Performance of  $e^+e^-$  Storage Rings and Linear Colliding Beam Systems at High Energy / J. E. Augustin [и др.] // eConf. — 1978. — T. C781015. — C. 009.
65. Dynamic aperture limitation in  $e^+e^-$  colliders due to synchrotron radiation in quadrupoles / A. Bogomyagkov [и др.] // Physical Review Accelerators and Beams. — 2019. — T. 22, № 2. — C. 021001. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.021001. — arXiv: 1811.04554 [physics.acc-ph].
66. FCC study: parameters and optics for hadron and lepton colliders / R. Tomás [и др.] // Nuclear and Particle Physics Proceedings / под ред. M. Aguilar-Benítez [и др.]. — 2016. — Т. 273–275. — С. 149–155. — DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.018.
67. Projects for ultra-high-energy circular colliders at CERN / A. Bogomyagkov [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2016. — Т. 13, № 7. — С. 870–875. — DOI: 10.1134/S154747711607013X.
68. Use of the methods of accelerator physics in precision measurements of particle masses at the VEPP-4 complex with the KEDR detector / O. V. Anchugov, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov [и др.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2010. — Т. 53, № 1. — С. 15–28. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441210010021>.
69. Experiments on the physics of charged particle beams at the VEPP-4M electron-positron collider / O. V. Anchugov, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov [и др.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2009. — Т. 109, № 4. — С. 590–601. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063776109100057>.
70. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider: KEDR/VEPP-4M / V. E. Blinov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Т. 598. — С. 23–30. — DOI: 10.1016/j.nima.2008.08.078.
71. *Bogomyagkov A., Levichev E., Sinyatkin S.* Touschek lifetime and luminosity optimization for Russian Super Charm Tau factory // JINST. — 2024. — Т. 19, № 02. — P02018. — DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/P02018.
72. Final analysis of KEDR data on  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  masses / V. Anashin [и др.] // Phys. Lett. B. — 2015. — Т. 749. — С. 50–56. — DOI: 10.1016/j.physletb.2015.07.057.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. *Bogomyagkov A., Levichev E., Sinyatkin S.* Touschek lifetime and luminosity optimization for Russian Super Charm Tau factory // JINST. 2024. Т. 19, № 02. P02018. DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/P02018
2. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk / G. Baranov [и др.] // Physical Review Accelerators and Beams. 2021. Т. 24, № 12. С. 120704. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704
3. Dynamic aperture limitation in  $e^+e^-$  colliders due to synchrotron radiation in quadrupoles / A. Bogomyagkov [и др.] // Physical Review Accelerators and Beams. 2019. Т. 22, № 2. С. 021001. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.021001. arXiv: 1811.04554 [physics.acc-ph]
4. Dynamic Aperture of the NICA Collider Optimized with a Genetic Algorithm / A. V. Bogomyagkov [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. Т. 16, № 1. С. 21—29. DOI: 10.1134/S1547477119010060
5. Beam optics and dynamics in electron storage rings with ultralow emittance / G. N. Baranov [и др.] // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. Т. 13, № 7. С. 884—889. DOI: 10.1134/S1547477116070086
6. *Bogomyagkov A., Levichev E., Piminov P.* Final focus designs for crab waist colliders // Physical Review Accelerators and Beams. 2016. Т. 19, № 12. С. 121005. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.121005
7. Projects for ultra-high-energy circular colliders at CERN / A. Bogomyagkov [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2016. Т. 13, № 7. С. 870—875. DOI: 10.1134/S154747711607013X
8. *Bogomyagkov A. V., Karyukina K. Y., Levichev E. B.* Reduction of the beam emittance in the charged-particle storage rings with the help of periodic magnetic wigglers // Tech. Phys. 2016. Т. 61, № 1. С. 119—124. DOI: 10.1134/S1063784216010060
9. Final analysis of KEDR data on  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  masses / V. Anashin [и др.] // Phys. Lett. B. 2015. Т. 749. С. 50—56. DOI: 10.1016/j.physletb.2015.07.057
10. Use of the methods of accelerator physics in precision measurements of particle masses at the VEPP-4 complex with the KEDR detector / O. V. Anchugov, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov [и др.] // Instruments and Experimental Techniques. 2010. Т. 53, № 1. С. 15—28. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441210010021>



11. Experiments on the physics of charged particle beams at the VEPP-4M electron-positron collider / O. V. Anchugov, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov [и др.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2009. Т. 109, № 4. С. 590—601. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063776109100057>
12. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider: KEDR/VEPP-4M / V. E. Blinov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2009. Т. 598. С. 23—30. DOI: [10.1016/j.nima.2008.08.078](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.078)

Богомягков Антон Викторович

ОДНОЧАСТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ  
СОВРЕМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И  
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ КОЛЛАЙДЕРОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

---

Сдано в набор 13.03.2024.

Подписано к печати 14.03.2024.

Формат 60 × 90/16. Объём 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 1.

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапинтере ИЯФ СО РАН.

630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11.