

УТВЕРЖДАЮ
Ректор НИЯУ МИФИ



В.И. Шевченко

_____ 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

на диссертацию

Богомягкова Антона Викторовича

**«Одночастичные эффекты, ограничивающие параметры современных
источников синхротронного излучения и электрон-позитронных
коллайдеров»,**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника в диссертационный совет 24.1.162.02, созданный на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Актуальность исследования.

Диссертация А.В. Богомягкова посвящена важнейшим на данном этапе развития ускорительной техники в России и мире вопросам создания

источников синхротронного излучения с поперечным эмиттансом, близким к дифракционному пределу, и лептонных коллайдеров с экстремальной светимостью на уровне $10^{35} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Данная работа особенно актуальна в настоящее время для ядерной физики, физики высоких энергий, физики элементарных частиц в России в связи с интенсивным строительством нового поколения экспериментальных установок, создаваемых в нашей стране после 25 летнего перерыва.

Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Автореферат в полной мере и корректно отражает содержание диссертации. Основные публикации автора по теме диссертации, список которых приведен в автореферате, корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Научная новизна диссертации состоит в использовании гамильтонова формализма при исследовании динамики пучков электронов в циклических ускорителях, причем рассматриваются гамильтонианы с учетом членов третьего-седьмого порядка малости. Это позволяет более точно провести работу по выбору рабочей точки накопителя, коррекции хроматичности, подавлению одночастичных эффектов, в том числе – в точке встречи. Рассмотрение динамики с учетом членов высоких порядков выполнено впервые. Полученные результаты использованы при проектировании источника синхротронного излучения «СКИФ», строительство которого ведется в настоящее время.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений, содержащих необходимые

математические выкладки. Общий объем диссертации составляет 267 страниц.

Во введении описываются цели и основные задачи выполненных исследований, современное состояние работ в области источников синхротронного излучения с пучками экстремальной яркости и коллайдеров с рекордной светимостью.

Первая глава содержит описание методов аналитического исследования динамики пучков электронов в накопителях, использованных при анализе динамики в ускорительных комплексах «СКИФ», «Супер с – τ фабрика» и CERN FCCee. Подробно исследуется влияние секступольного возмущения на динамическую апертуру накопителя. Показана интерференция секступольного и октупольного возмущений в третьем порядке теории возмущений и изучено ее влияние на ширину резонансов и динамическую апертуру. В приближении линз конечной длины рассмотрена возможность построения систем секступолей без квадратичных аберраций. Получены более точные аналитические выражения для хроматизма оптических функций с разложением до третьего порядка малости, что позволяет увеличить энергетический аксептанс накопителя.

Во второй главе рассматривается магнитная структура источника синхротронного излучения четвертого поколения «СКИФ». Показана возможность построения накопителя на энергию 3 ГэВ с длиной орбиты менее 500 м с возможностью получения горизонтального эмиттанса около 70 пм·рад. Такой малый эмиттанс предлагается получить за счет оптимизации магнитной структуры кольца и использования antiband дипольных магнитов. Также рассматривается возможность увеличения динамической апертуры накопителя за счет корректного выбора параметров семейств секступольных линз.

В третьей главе рассматривается коллайдер «Супер с – τ фабрика» и его магнитная структура. Большое влияние уделено оптимизации системы «grab waist» столкновения для данного коллайдера. Показано, что при реализации

всех требований к «crab waist» (перетяжка пучка в точке встречи, минимизация горизонтального эмиттанса, оптимизация бета-функции в точке встречи и т.д.) можно увеличить светимость данного коллайдера до $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне энергии 2,5–3,5 ГэВ и до $4 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для энергии 1–2 ГэВ. Описывается влияние крабовых секступолей на динамическую апертуру коллайдера. Проанализированы и другие источники нелинейных возмущений динамики в коллайдере «Супер с – τ фабрика». Исследован эффект сдвига частоты бетатронных колебаний, возникающего при столкновении пучков, и разработан критерий оценки предельно допустимого сдвига.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния синхротронного излучения на параметры лептонных коллайдеров на сверхвысокие энергии. Основное внимание направлено на изучение влияния излучения отдельного электрона на поперечный эмиттанс пучка. Данный эффект рассматривается на примере коллайдера CERN FCCee.

В пятой главе рассматривается возможность проведения экспериментов на встречных пучках с возможностью достижения энергетических разрешений, требуемых в современных задачах (на уровне 100 кэВ при энергии 2–160 ГэВ).

В заключении приведены основные результаты работы.

В целом необходимо отметить, что выполненные работы являются очень важными для создания новых источников синхротронного излучения четвертого поколения и электрон-позитронных коллайдеров с экстремальными параметрами, в частности источника СИ «СКИФ» и коллайдеров «Супер с – τ фабрика» и CERN FCCee.

В ходе работы автором получены следующие основные результаты:

1. Разработана магнитная структура источника синхротронного излучения четвертого поколения «СКИФ». Показана возможность построения накопителя с горизонтальным эмиттансом около 70 пм·рад при энергии пучка 3 ГэВ и длине орбиты накопителя менее 500 м.

2. Разработана магнитная структура коллайдера «Супер с – τ фабрика». Показана возможность построения накопителя, обеспечивающего светимость до $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в диапазоне энергии 2,5–3,5 ГэВ и до $4 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ для энергии 1–2 ГэВ.

3. Показана возможность использования магнитной структуры типа ТМЕ, отличающейся от классической схемы возможностью использования секступолей с меньшими полями для достижения такой-же величины поперечного эмиттанса.

Результаты диссертации внедрены в ходе проектирования строящегося в Новосибирске «Сибирского кольцевого источника фотонов».

Научная и практическая значимость результатов.

Выносимые на защиту положения и результаты являются новыми, тематика исследований, представленных в диссертации, имеет большую научную и практическую значимость в связи с необходимостью получения пучков заряженных частиц с поперечным эмиттансом, близким к дифракционному пределу, в источниках синхротронного излучения, а также рекордных значений светимости в лептонных коллайдерах. В диссертации содержатся результаты исследований, использованные при проектировании источника синхротронного излучения «СКИФ», строительство которого ведется в настоящее время в Новосибирске, а также важные практические результаты и рекомендации, необходимые для получения рекордной

светимости при сохранении большого времени жизни в лептонных коллайдерах «Супер с – τ фабрика» и CERN FCCee.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждается корректным использованием аналитических методов, программ и методов математического моделирования, а также многократной перекрестной проверкой основных результатов несколькими математическими методами и/или несколькими пакетами, предназначенными для численного моделирования динамики пучка в циклических ускорителях.

Также работа прошла апробацию на основных международных научных конференциях по ускорителям заряженных частиц, семинарах в ведущих ускорительных центрах, результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Личный вклад автора состоит в развитии и обосновании нового подхода к созданию магнитных структур накопителей для источников синхротронного излучения и лептонных коллайдеров с большой динамической апертурой при малом поперечном эмиттансе пучка, разработке структуры строящегося источника синхротронного излучения «СКИФ» и структуры проектируемого коллайдера «Супер с – τ фабрика» с обоснованием возможности достижения рекордной светимости до $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне энергии 2,5–3,5 ГэВ.

Работа не лишена некоторых недостатков:

1. Недостаточное внимание уделено сравнению аналитических результатов, полученных для накопителей «СКИФ» и «Супер с – τ фабрика», с результатами численного моделирования. Не акцентировано, какие эффекты не могут быть учтены в расчетах известными программами без использования результатов этой работы.

2. Не приведена оценка соотношения вклада в динамику пучка поправок, вызванных высшими порядками нелинейности структуры по сравнению с основными нелинейными эффектами.

3. Не рассматриваются отдельно и в совокупности с регулярными периодами особенности построения периодов инъекции установок «СКИФ» и «Супер с – т фабрика». Не приведено описание изменений структур инжекционных периодов, необходимых для сохранения периодичности и динамической апертуры.

4. Для коллайдера CERN FCCee не рассматривается возможность получения энергетического разрешения на уровне 100 кэВ при энергии более 90 ГэВ в системе центра масс.

5. Автор в работе не использует общепринятую на сегодняшний день методику frequency map analysis для анализа динамической апертуры.

6. В главе, посвященной накопителю «СКИФ», автор утверждает, что стоимость источника СИ меньше в случае малого ее периметра, но большего числа магнитных элементов, в сравнении с большим периметром накопителя при меньшем числе магнитных элементов. Данное утверждение не очевидно.

7. В главе 4 автор делает утверждение, что у всех магнитных структур с магнитами с разделенными функциями времени затухания соотносятся как $T_x = T_y = 2T_s$, что требует дополнительного обоснования и оценки точности данного соотношения.

8. В тексте диссертации имеется ряд неточностей, например, в таблице 2.3 неправильно указана величина потерь энергии пучка на синхротронное излучение за оборот – показана величина потерь на период.

Отмеченные замечания не снижают, однако, научной значимости и практической ценности работы.

Заключение.

Диссертация А.В. Богомягкова представляет собой законченную научную работу, направленную на достижение новых научных и

практических результатов в актуальной области ускорительной техники, проведенную с целью решения важных научных задач, направленных на развитие методов исследования динамики лептонных пучков в циклических ускорителях, оптимизацию магнитных структур накопителей в широком диапазоне энергий пучка от 1 до 90 ГэВ. В диссертации изложены новые научно обоснованные научно-технические решения, позволяющие создавать источники синхротронного излучения с эмиттансом лучше 100 пм·рад и лептонные коллайдеры с экстремальной светимостью до 10^{35} см⁻²с⁻¹ в диапазоне энергии 2,5–3,5 ГэВ, что является важным научным достижением.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы для использования в ИЯФ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, РФЯЦ ВНИИЭФ и других организациях, разрабатывающих ускорители заряженных частиц, в том числе и в зарубежных ускорительных центрах.

В целом по актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертация А.В. Богомякова «Одночастичные эффекты, ограничивающие параметры современных источников синхротронного излучения и электрон-позитронных коллайдеров» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Богомяков Антон Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за развитие методов исследования динамики пучков в циклических ускорителях и методов оптимизации магнитных структур накопителей в широком диапазоне энергий пучка.

Диссертация А.В. Богомякова рассмотрена на открытом заседании кафедры электрофизических установок Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409,
г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. +7 (495) 788-56-99, info@mephi.ru)
01 апреля 2024 г. Отзыв согласован на заседании НТС кафедры
электрофизических установок, протокол от 01 апреля 2024 г. № 26.

Отзыв составили:

Заведующий кафедрой электрофизических
установок НИЯУ МИФИ, доктор
физико-математических наук, доцент
тел.: +7(495)788-56-99, доб. 9940
e-mail: smpolozov@mephi.ru



Полозов Сергей Маркович

Доцент кафедры электрофизических
установок НИЯУ МИФИ, кандидат
технических наук, старший научный
сотрудник
e-mail: virashchikov@mephi.ru



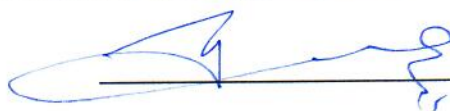
Ращиков Владимир Иванович

Доцент кафедры электрофизических
установок НИЯУ МИФИ, кандидат
физико-математических наук
e-mail: vsdyubkov@mephi.ru



Дюбков Вячеслав Сергеевич

Председатель Совета по аттестации
и подготовке научно-педагогических
кадров НИЯУ МИФИ, доктор физико-
математических наук, профессор
тел.: +7 (495) 788-56-99 доб. 9991
e-mail: nakudryashov@mephi.ru



Кудряшов Николай Алексеевич

09 апреля 2024 г.