

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

**Иванова Сергея Владиславовича**

на диссертационную работу

**Богомягкова Антона Викторовича**

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

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время в мире наблюдается устойчивый интерес к разработке и сооружению электронных (и позитронных) кольцевых накопителей заряженных частиц с экстремальными параметрами пучка (разумеется, с их инжекционными каскадами). Можно выделить два класса этих востребованных ускорительных установок.

Во-первых, это электронные накопители — источники синхротронного излучения (далее, СИ), вышедшие уже на уровень 4-го поколения установок с энергией пучка 3 – 6 ГэВ и горизонтальным эмиттансом масштаба 500 – 10 пм. Последний призван обеспечить экстремально высокую яркость СИ, близкую к дифракционному пределу для длины волны СИ в 1 Å. Основные области применения источников СИ — физика конденсированных сред, материаловедение, биология и медицина. В настоящее время в Российской Федерации реализуются два проекта современных источников СИ 4-го поколения: установка ЦКП СКИФ (Новосибирск) (строительство) и СИЛА (Москва/Протвино) (НИОКР, изыскания и проектные работы).

Во-вторых, это электрон-позитронные ( $e^+e^-$ ) коллайдеры — установки со встречными сталкивающимися пучками, предназначенные для экспериментальных исследований в области физики частиц и фундаментальных взаимодействий. Основным направлением развития этого класса установок является получение экстремально высокой светимости столкновений на уровне  $10^{35} - 10^{36} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и приемлемого времени жизни пучка. С 2010-х годов в ИЯФ СО РАН ведется углубленная концептуальная и инженерная проработка предложения национальной установки Супер с-τ фабрика, физическое



обоснование которой к настоящему времени достигло высокой степени готовности. Важным предшественником этого проекта является действующий  $e^+e^-$  коллайдер ВЭПП-4М, на котором осуществляется практическая отработка существенных ориентированных методических и практических вопросов (например, методики калибровки энергии сталкивающихся пучков в с.ц.м.). В ЦЕРН ведётся работа над международным проектом  $e^+e^-$  коллайдера мега класса FCC-ee.

В этом контексте особую значимость приобретают поисковые расчётно-методические работы по современным вопросам одночастичной нелинейной динамики пучка в кольцевых накопителях заряженных частиц с экстремальными параметрами.

В свете изложенного **актуальность темы** обсуждаемой диссертации не вызывает сомнений.

### **Практическая значимость полученных автором результатов**

Разработка нового поколения кольцевых источников СИ и  $e^+e^-$  циклических накопителей выдвигает на передний край новые задачи нелинейной динамики частиц пучка, которые ранее не были существенными и лимитирующими. Требуется систематическая работа над расчётно-теоретическими, численными и смешанными методами анализа и синтеза новых магнитооптических решений, обладающими повышенной точностью и достаточным потенциалом для преодоления объективно возникающих трудностей.

Несмотря на различие функционального назначения двух обсуждаемых в диссертации классов накопительных установок (источники СИ,  $e^+e^-$  коллайдеры) перед их проектами стоят сходные задачи получения достаточных динамической и энергетической (импульсной, хроматической) апертур, приемлемого времени жизни плотного пучка малого фазового объёма в условиях неизбежного технологического применения сильных сосредоточенных нелинейных внешних магнитных полей (секступольных, октупольных) и наличия иных возмущающих факторов поперечного движения (например, отклонение траекторий пучка от параксиальных вблизи точек встречи, эффекты встреч).

Автор диссертации придерживается единого и последовательного методического подхода к анализу различных вопросов поперечного движения частиц в кольцевом накопителе. Он основан на гамильтоновом формализме описания движения консервативной системы и методах теории возмущений 1-3-го порядков. Отдельные аспекты динамики системы, связанные с потерями энергии частиц на СИ (т.е. с не консервативностью объекта изучения), затрагиваются в Главе 4 диссертации.

Подтверждением корректности расчётов служит, например, (1) воспроизведение известных классических результатов — теории изолированного поперечного резонанса, эффектов двумерной нелинейности бетатронного движения из-за октупольной (в 1-м порядке) и секступольной (во 2-м порядке теории возмущений) нелинейностей магнитного поля и др.; (2) результаты численного трекинга частиц в различных



магнитооптических структурах; (3) отсылки на практические примеры эксплуатации действующих установок–аналогов.

Привлекательный и вполне востребованный по ходу проведения диссертационных исследований подход автора также ориентирован на поиск огрублённых амплитудно-масштабных параметров (факторов, свойств), являющихся ранними и репрезентативными индикаторами аномального поведения пучка. Они становятся убедительным и действенным инструментом для сложной многофакторной численной оптимизации технических решений сложной магнитной оптики, проводимой автором.

Используя предложенный подход, автор выполнил большой объем работ по созданию или улучшению параметров магнитной оптики нескольких установок: источник СИ 4-го поколения Сибирский кольцевой источник фотонов (ЦКП СКИФ);  $e^+e^-$  коллайдер Супер с-т фабрика (оба — ИЯФ СО РАН), коллайдер FCC-ee (ЦЕРН; в рамках МНТС). Отработаны вопросы прецизионной калибровки энергии столкновений в действующем  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-4М. Исследованы вопросы нелинейной динамики вблизи точки встреч в тяжело-ионном коллайдере НИКА (ОИЯИ).

Оригинальные методические решения и расчётно-теоретические подходы к анализу и синтезу магнитной оптики кольцевых ускорителей заряженных частиц, обоснованные и предложенные в диссертации, представляют самостоятельный практический интерес. Полученный опыт и разработанная методика могут быть полезны при создании и настройке оптики иных ускорительных установок.

Все перечисленные положения свидетельствуют о высокой **практической значимости** результатов диссертации.

### **Научная новизна диссертационной работы**

Многие предложения и разработки, изложенные в диссертации, обладают существенными элементами научно-технической новизны. Их список содержит 12 позиций, размещённых автором на стр. 12–14 текста работы. Они с необходимостью диктуются:

1. самим предметом разработки — уникальной и сложной нелинейной магнитной оптикой новых кольцевых электронных накопителей с экстремальными параметрами пучка, не имеющей прямых отечественных и зарубежных аналогов;
2. отсутствием (или малым объёмом) критической научно-технической информации, доступной в литературе, по противодействию новым лимитирующим факторам, выявленным при разработке источника СИ ЦКП СКИФ,  $e^+e^-$  коллайдеров Супер с-т фабрика и FCC-ee и при повышении точности экспериментальных измерений на действующей установке ВЭПП-4М.



## **Достоверность полученных результатов**

Результаты диссертации достоверны, поскольку они получили подтверждение перекрёстным применением альтернативных и комплементарных методов расчёта и сравнением с многочисленными действующими установками-аналогами.

## **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений на 37 стр. Общий объем диссертации 267 стр. Библиография включает 187 наименований на 23 стр. В работе приведено 95 иллюстраций и 31 таблица.

Во введении содержится краткий обзор современного состояния дел и тенденций в области создания магнитной оптики кольцевых электронных накопителей — источников СИ или  $e^+e^-$  коллайдеров. Таким образом, представлен контекст, в котором решались задачи диссертации. Сформулирована цель работы, обоснована актуальность и практическая значимость проблемы выявления, расчёта и противодействия деструктивным лимитирующим эффектам одночастичной нелинейной поперечной динамики частиц.

Первая глава представляет систематическое и подробное (почти 60 стр.) изложение расчётно-аналитических методов анализа динамики частиц в кольцевом ускорителе, применяемых в ходе исследований. Результаты главы используются далее во всех последующих главах. Она является теоретическим базисом всей диссертации. Столь детальное описание методики является сильной стороной работы, свидетельствующей об уважении к читателю и способствующей последующему самостоятельному использованию разработок автора.

Во второй главе проводится исследование актуальных вопросов магнитной оптики и поперечной динамики кольцевого источника СИ 4-го поколения ЦКП СКИФ. Глава имеет особое значение, поскольку ЦКП СКИФ находится в стадии строительства, а электрофизическое оборудование передано в производство. Не будет преувеличением утверждать, что материалы диссертации легли в основу физического обоснования и проекта магнитооптической системы ЦКП СКИФ, его ключевой технологической системы. По этой причине практическая значимость второй главы особенно весома.

Третья глава посвящена изучению актуальных вопросов динамики пучка в  $e^+e^-$  коллайдере Супер с-т фабрика. Поскольку работа над предложением установки ведётся уже давно, с 2010 года, на долю автора диссертации достались преимущественно сложные вопросы «верхнего уровня» — организация оптики участка (точки) встреч пучков и пересечения пучков по схеме «крабовой перетяжки» — с присущими им лимитирующими факторами, требующими обоснованного противодействия. Эти вопросы решены.

В четвертой главе проводится оценка деструктивных эффектов излучения, ограничивающих параметры  $e^+e^-$  коллайдеров на сверхвысокую энергию. Это электромагнитное излучение в поле встречного сгустка и в квадрупольных линзах вокруг точек встреч. Расчёты проводятся для проекта установки FCC-ee.



Пятая глава посвящена вопросам энергетического разрешения и калибровке энергии встречных столкновений в  $e^+e^-$  коллайдерах FCC-ee и ВЭПП-4М.

В заключении кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертации и вынесенные на защиту.

В шести приложениях приводится схема расчётов и сводка формул, что представляет самостоятельную ценность в образовательных и справочно-аналитических целях для самостоятельных расчётов динамики частиц.

Внутри глав поддерживается единый и достаточно лаконичный (но не в ущерб ясности и полноте информации) стиль изложения.

### **Замечания и недостатки**

1. Автор диссертации неоднократно меняет изложение от 1-го лица множественного числа к единственному и назад. Желательно было бы избегать такого разнообразия в одной научной работе.
2. В тексте встречаются, впрочем, весьма немногочисленные опечатки. Например, в Табл. 2 на стр. 8 в качестве единицы измерения у светимости  $L$  указаны  $\text{см}^{-2}\text{см}^{-1}$ . В формуле (3.4) на стр. 117 пропущен знак «минус». В комментариях к формуле (2.3) на стр. 90 текстовый фрагмент о минимизации эмиттанса «...увеличением фокусировки или увеличением угла поворота...» следует понимать, как «...увеличением фокусировки или уменьшением угла поворота...».

Следует подчеркнуть, что перечисленные выше **замечания и недостатки непринципиальны**. Они относятся к оформлению, а не к сути работы и не умаляют положительные стороны диссертации.

### **Оценка автореферата диссертации**

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Замечаний к автореферату нет.

### **Выводы**

Тема выполненной диссертации актуальна и имеет чёткую практическую направленность. В результате проведённой работы были изучены актуальные вопросы нелинейной поперечной динамики, существенные для нового поколения кольцевых электронных накопителей (ЦКП СКИФ, Супер  $s$ - $t$  фабрика и FCC-ee), и изучены вопросы калибровки энергии столкновений на FCC-ee и в действующей установке ВЭПП-4М. Предложены и обоснованы современные магнитооптические решения. Разработки магнитной оптики для ЦКП СКИФ переданы в производство.



В работе обобщены результаты исследований автора в ИЯФ СО РАН в период 2008–2023 годов по указанному направлению. В ходе работы удалось предложить и обосновать решения по достижению экстремальных параметров пучка, предусмотренных в новых установках (поперечный эмиттанс, динамическая и импульсная апертуры, время жизни и т.п.).

Цель, обозначенная во введении работы в части изучения специальных вопросов динамики пучка в установках ЦКП СКИФ, Супер с–т фабрика, коллайдер FCC-ee, коллайдер ВЭПП-4М, была достигнута.

Подход автора к решаемой задаче прагматичен и последователен. Расчётные, решения, методические подходы и рекомендации хорошо обоснованы.

Диссертация является добротным, последовательным и законченным научно-техническим трудом по физике пучков заряженных частиц и ускорительной технике. В диссертации решена задача синтеза и анализа специальных магнитооптических решений для современных кольцевых накопителей — источников СИ и  $e^+e^-$  коллайдеров.

Диссертация представляет несомненный практический интерес. Нет сомнения, что её результаты будут в полной мере использованы в ИЯФ СО РАН (Новосибирск) при реализации проектов ЦКП СКИФ и Супер с–т фабрика. Опыт разработки и внедрения оригинальных магнитооптических и габаритно-компоновочных решений может быть рекомендован к использованию в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва) в работах над проектами источников СИ КИСИ–Курчатов и СИЛА, как и в других ускорительных центрах, эксплуатирующих источники СИ и ускорители заряженных частиц, в том числе протонные и ионные (НИЦ КИ – ИФВЭ, ОИЯИ).

Основные результаты работы опубликованы её автором в 23 печатных работах, из них 12 — статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК.

Работа прошла достаточную апробацию на профильных научно-технических конференциях и совещаниях (11 докладов) по тематике ускорителей и накопителей заряженных частиц и их применения.

Содержание диссертации полностью и точно отражено в её автореферате.

Материал диссертации интересен и убедителен с точки зрения положительной аттестации автора. Он полностью владеет предметом — методикой и техникой анализа поперечной нелинейной динамики частиц для актуального класса накопителей заряженных частиц, служащих источником СИ либо встречных столкновений пучков.

Текст диссертации логично структурирован, тщательно оформлен и изложен лаконичным научным языком. В немалой степени качеству оформления текста способствовало использование автором редакционно-издательской системы LATEX.

## **Заключение**

Диссертационная работа А.В. Богомякова полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к

диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор **Богомягков Антон Викторович** заслуживает присвоения ему учёной степени **доктора физико-математических наук** по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Иванов Сергей Владиславович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Богомягкова Антона Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Иванов Сергей Владиславович

доктор физико-математических наук

специальность 01.04.20./ Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника,

учёное звание: старший научный сотрудник,

академическое звание: академик РАН,

адрес: 142281, Московская обл., г. Протвино, площадь Науки, д. 1

тел: +7 (4967) 71-33-66

эл. почта: sergey.ivanov@ihep.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», директор

ИВАНОВ Сергей Владиславович

(подпись)



(дата)

10.04.2024

Подпись С.В. Иванова заверяю:

Учёный секретарь ФГБУ «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», к. ф.-м. н.

Н.Н. Прокопенко

(подпись)



(дата)

11.04.2024

