

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук  
Костромина Сергея Александровича  
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 работы**

Диссертационная работа А.В. Богомягкова посвящена обширному теоретическому исследованию динамики заряженной частицы в электромагнитном поле кольцевого ускорителя или накопителя частиц, а также созданию источников синхротронного излучения и электрон-позитронных коллайдеров с уникальными параметрами.

В настоящее время разрабатываются и строятся накопители заряженных частиц с ранее недостижимыми параметрами, источники синхротронного излучения 4-го поколения со сверхмалыми эмиттансами (близким к дифракционному пределу),  $e^+e^-$  коллайдеры со сверхвысокой светимостью ( $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) или сверхвысокой энергией пучков 45÷175 ГэВ: строительство источника СИ ЦКП «СКИФ» в Кольцово, Новосибирская обл., проект «Супер  $s$ - $t$  фабрика» в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), коллайдер FCC-ee в ЦЕРН (Швейцария), тяжело-ионный коллайдер «NICA» в ОИЯИ (Дубна, Московская обл.).

В таких установках начинают проявляться ограничения, вызванные эффектами одночастичной динамики, которые ранее либо не были известны, либо считались пренебрежимо малыми.

Глубокое рассмотрение одночастичной динамики, определение, изучение и оценка влияния данных эффектов на ключевые параметры создаваемых уникальных ускорителей и коллайдеров заряженных частиц определяют важность и актуальность диссертационной работы.

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

Разработка новых современных кольцевых источников СИ,  $e^+e^-$  и адронных коллайдеров сталкивается с проблемами нелинейной динамики, которые уменьшают динамическую и энергетическую апертуры, ограничивая тем самым наиболее важные

параметры, определяющие схемы подготовки пучков, рабочие характеристики установок, а также эффективность физических экспериментов и исследований.

Например, малая динамическая поперечная апертура усложняет инжекцию, а малая энергетическая - продольная апертура ограничивает время жизни пучков, что приводит к уменьшению яркости в источниках СИ и уменьшению светимости в коллайдерах.

Автор диссертации на основе гамильтонового формализма провёл обширный энциклопедический обзор известных источников нелинейного возмущения: секступольного, октупольного, краевых полей квадруполь, расширив их ранее нерассматриваемыми вопросами.

Выполнил аналитические расчёты динамической апертуры без использования общепринятого приближения изолированного резонанса, обнаружил новые эффекты секступольного и октупольного возмущений, предложил способы уменьшения их влияния на динамическую апертуру. Изучил влияние синхротронного излучения на нелинейную динамику частиц. Все аналитические расчёты были подтверждены численным моделированием движения частиц в различных магнитооптических структурах.

Проведённое теоретическое исследование, численные расчёты и последующий анализ полученных результатов позволил автору предложить магнитооптическую структуру источника СИ 4-го поколения ЦКП «СКИФ», коллайдера «Супер с-т фабрика (Новосибирск, Саров), сформировать новый набор параметров для FCC-ee и рассчитать ошибки определения энергии в системе центра масс в экспериментах на ВЭПП-4М и FCC-ee.

Предложенная оптимизация и уменьшение нелинейного влияния краевых полей квадрупольных линз финального фокуса применимы не только для  $e^+e^-$  коллайдеров (Супер с-т фабрика, FCC-ee), но и для тяжелоионных – Коллайдер NICA.

**Практическая значимость** диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы уже использованы при создании источника СИ 4-го поколения ЦКП «СКИФ», и используются при проектировании новых циклических накопителей заряженных частиц не только электронных, но и тяжелоионных.

### **Научная новизна диссертационной работы**

Научная новизна полученных автором результатов определяется: созданием магнитооптических структур источника СИ 4-го поколения ЦКП «СКИФ» с относительно компактным периметром  $P = 476$  м и экстремально малым горизонтальным эмиттансом  $\epsilon_x = 72$  пм,  $e^+e^-$ -коллайдера «Супер с-т фабрика» со сверхвысокой светимостью  $\mathcal{L} = 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; предложенным набором параметров для коллайдера FCC-ee, объяснением ограничения динамической апертуры синхротронным излучением в финальных квадрупольных линзах коллайдера FCC-ee и анализом неопределённости определения энергии в системе центра масс на коллайдерах ВЭПП-4М и FCC-ee.

Проведённые и представленные в работе автором расчёты по нелинейной динамике для секступольного и октупольного возмущений уникальны: впервые проведён расчёт динамической апертуры для секступольного возмущения без использования приближения изолированного резонанса.

Впервые сделано исследование по ранее не обсуждавшемуся ограничению динамики пучка синхротронным излучением в финальных квадрупольных линзах  $e^+e^-$  коллайдера на энергию.

Список новых предложений и разработок содержит 12 пунктов и находится на страницах 12-14 диссертации.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, полученных результатов**

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, сопоставлением и хорошим совпадением результатов теоретического анализа и численного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей. Обсуждение полученных данных на специализированных международных конференциях, публикации в ведущих научных журналах не вызывают сомнения в **обоснованности** и достоверности **научных положений и выводов**. Результаты диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях и представлены в 12 научных статьях в международных высокорейтинговых журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России).

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация является законченным научным трудом и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений на 37 стр. Общий объем диссертации составляет 267 стр. Библиография включает 187 наименований на 23 стр. Работа включает 95 рисунков и 31 таблицу.

Во введении обоснованы актуальность и определена цель работы. Сформулированы цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, указан личный вклад автора.

Первая глава посвящена обзору источников нелинейных возмущений, ограничивающих эффективность источников синхротронного излучения (СИ) и  $e^+e^-$  коллайдеров.

Во второй главе описано исследование магнитной оптики, послужившее основой для создания магнитооптической структуры кольцевого источника СИ 4-го поколения ЦКП СКИФ, находящегося в стадии строительства.

Третья глава посвящена исследованию ограничений динамики пучка и способам их преодоления в  $e^+e^-$  коллайдере «Супер с-т фабрика». Впервые в предложенной магнитной структуре получены параметры и время жизни пучка более 300 секунд со светимостью  $10^{35} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ .

В четвертой главе приведено исследование нового эффекта, ограничивающего параметры  $e^+e^-$  коллайдера на сверхвысокую энергию. Новым является влияние синхротронного излучения в поле встречного пучка и в полях финальных квадрупольных линз на динамику пучка.

Пятая глава посвящена оценкам неопределённости определения энергии в системе центра масс в экспериментах на встречных пучках в  $e^+e^-$  коллайдерах FCC-ee и ВЭПП-4М.

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

В шести приложениях приведены выводы известных и использованных автором формул, представляющие самостоятельную ценность в справочных целях для других расчётов нелинейной динамики частиц.

### **Замечания и недостатки**

1. Делая обзор различных источников нелинейных возмущений, автору стоило бы дать строгое, «авторское» определение динамической апертуры и определить, как оно может изменяться в зависимости от целей того или иного исследования, а также сделать прямо в тексте минимальный «обзор»: как определяется и по результатам каких расчетов обсуждается это понятие в других исследованиях.
2. На страницах 9, 10, 11 в размерности светимости написано  $\text{см}^{-2}\text{см}^{-1}$ , а должно быть  $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .
3. Страница 17 начинается с висячей строки «ка».
4. В формуле для жесткости частицы на странице 29 числитель и знаменатель перепутаны местами.
5. В подписи к рисунку 1.1 разорвана формула.
6. В тексте присутствуют некоторые незначительные оформительские недочеты «косметического» характера.

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.

### **Заключение**

Диссертация А.В. Богомягкова «Одночастичные эффекты, ограничивающие параметры современных источников синхротронного излучения и электрон-позитронных коллайдеров» является законченным трудом по физике и технике ускорителей и коллайдеров заряженных частиц, а по сути подробным, глубоким исследованием теории нелинейной динамики частицы в электромагнитном поле таких установок.

Главным результатом работы помимо внушительного количества выводов и новых результатов теоретического характера и обширного объема справочно-энциклопедических данных является предложение и обоснование магнитно-оптических структур и ключевых параметров СИ ЦКП «СКИФ» и  $e^+e^-$  коллайдера «Супер с-т фабрика». Работа

представляет несомненный интерес для других исследователей и разработчиков кольцевых ускорителей и коллайдеров частиц.

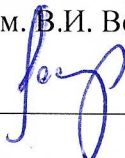
Диссертационная работа А.В. Богомягкова полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор Богомягов Антон Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

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

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника,  
Помощник директора по реализации крупных инфраструктурных проектов  
Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

22 апреля 2024 г. \_\_\_\_\_



Костромин Сергей Александрович

Международная межправительственная организация  
Объединённый институт ядерных исследований  
адрес: 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6  
тел.: +7 (496) 216-21-90  
эл. почта: kostromin@jinr.ru

Подпись С.А. Костромина заверяю  
Учёный секретарь ЛФВЭ ОИЯИ



/ А.П. Чеплаков /

