

На правах рукописи



Борин Владислав Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКА
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ
ПОЛЯМИ В УСКОРИТЕЛЯХ МЕТОДАМИ
ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук Мешков Олег Игоревич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Корчуганов Владимир Николаевич доктор физико-математических наук, Национальный Исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований (ККСНИ), заместитель руководителя научного комплекса по перспективным ускорительным технологиям;

Сыресин Евгений Михайлович доктор физико-математических наук, профессор, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, главный инженер установки ускорительный комплекс NICA;

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «17» октября 2023 года в «16» часов «30» минут 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://inp.nsk.su/images/Borin_disser.pdf

Автореферат разослан «16» августа 2023 года.

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



Лотов Константин
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Динамика пучков заряженных частиц в ускорителях определяется конфигурацией магнитных и электрических полей, используемых для управления траекторией пучка. Такие магнитные и электрические поля создаются различными системами ускорителя, например, квадрупольными линзами, дипольными магнитами и ВЧ-резонаторами и др. Описание магнитной структуры ускорителя позволяет описать движение частиц в нем. При наличии неучтенных электрических и магнитных полей динамика и параметры пучка частиц будут отличаться от ожидаемых. К таким неучтенным полям относятся электромагнитные поля, создаваемые движущимися в ускорителе пучками частиц. Кроме того, на динамику движущихся пучков в ускорителе может влиять излучение, создаваемое этими пучками, например, потери энергии на синхротронное излучение приводят к раскачке продольных колебаний и влияют на затухание поперечных колебаний. Кроме того, частицы внутри пучка, могут рассеиваться друг на друге, что также приводит к влиянию на динамику пучка, например, на его время жизни и энергетический разброс.

Другой пример влияния электромагнитных полей на движение частиц в ускорителе – взаимодействие пучка частиц с полями внешней электромагнитной волны, распространяющейся вместе с пучком частиц. Такое взаимодействие лежит в основе принципа работы лазера на свободных электронах. В результате такого взаимодействия может происходить модуляция продольного распределения частиц в пучке, при соблюдении определенных условий взаимодействие пучка частиц с электромагнитной волной в ондуляторе приводит к когерентному излучению пучка.

Взаимодействие с наведенными пучком электромагнитными полями можно описать с помощью импеданса связи [1]. Импеданс связи является важным параметром ускорителя, так как от его значения зависит динамика пучка и устойчивость его движения, в частности от импеданса связи зависят геометрические размеры пучка. Импеданс можно считать параметром, характеризующим гладкость вакуумной камеры, так как основная часть наведенных в вакуумной камере полей образуется вблизи мест резкого изменения геометрии поверхности, например, в сиффонах. Взаимодействие с наведенными полями может приводить к различным неустойчивостям движения, примером такой неустойчивости является продольная микроволновая неустойчивость [1], которая возникает в результате взаимодействия пучка с наведенными им же в вакуумной камере

полями. В данной работе исследуется влияние эффектов продольной динамики на размеры и энергетический разброс пучка электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М. Удлинение пучка, вызванное влиянием эффектов, связанных с взаимодействием с наведенными полями, приводит к снижению светимости коллайдера при совместной работе с детектором КЕДР. Целью изучения влияния взаимодействия пучка с наведенными полями на продольную динамику пучка является измерение энергетического разброса коллайдера ВЭПП-4М по измерениям продольного размера пучка с учетом влияния указанного взаимодействия. Актуальность данного исследования продиктована необходимостью регулярного измерения энергетического разброса пучка ВЭПП-4М.

Процесс лазерной генерации Лазера на Свободных Электронах (ЛСЭ) непосредственно связан с взаимодействием пучка электронов с накопленным в оптическом резонаторе излучением других пучков электронов. Дополнительная информация, получаемая из измерений поперечного профиля пучка, облегчает настройку режимов работы третьей очереди ЛСЭ и дает возможность изучения динамики профиля пучка при генерации лазерного излучения. Таким образом, задача внедрения новых систем диагностики и их последующее применение для изучения динамики пучка на третьей очереди Новосибирского ЛСЭ является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Результаты проводимых ранее исследований продольного импеданса связи ВЭПП-4М не проверялись в широком диапазоне режимов работы коллайдера [2], также не проводилось изучение эффекта искажения потенциальной ямы. Кроме того, измерения проводились ранее с помощью диссектора, временное разрешение которого ниже, чем у используемой в данной работе стрик-камеры. Измерение энергетического разброса пучка ВЭПП-4М также проводилось ранее [3], однако в узком диапазоне энергий и без учета влияния эффекта многократного внутрисгусткового рассеяния. Ранее использованные методы измерения энергетического разброса требовали больших временных затрат на получение результата, применяемый же в данной работе метод измерения энергетического разброса путем измерения длины пучка существенно оперативнее.

На Новосибирском Лазере на Свободных Электронах (ЛСЭ) до недавнего времени оптическая диагностика параметров пучка отсутствовала. На первых двух очередях этой установки ее применение было невозможно из-за практически полного отсутствия в спектре синхротронного излучения (СИ) из поворотных магнитов оптической составляющей. Однако на третьей очереди ЛСЭ энергия пучка достаточна

для его наблюдения в видимом диапазоне длин волн, регистрации поперечного профиля пучка и измерения его параметров. Таким образом можно заключить, что в области диагностики параметров пучков и излучения оптическими методами тема исследования имеет слабую степень разработанности.

Кроме того, когерентное ондуляторное излучение электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе ЛСЭ, позволяющее увеличить пиковую мощность ЛСЭ [4] ранее не было зарегистрировано.

Цели и задачи

Целью диссертационного исследования являлось изучение влияния различных проявлений взаимодействия пучка электронов с наведенными полями в ускорителях методами оптической диагностики.

В первой главе изучается влияние коллективных эффектов на продольную динамику пучка на коллайдере ВЭПП-4М, а также их влияние на процедуру измерения энергетического разброса пучка. В первой главе решались следующие задачи:

1. Изучение токовых зависимостей продольного размера пучка ВЭПП-4М.
2. Определение параметров импедансов связи и составление модельных зависимостей продольного размера пучка от тока.
3. Сравнение двух методик измерения энергетического разброса пучка на ВЭПП-4М.
4. Измерение энергетического разброса пучка ВЭПП-4М во всем диапазоне энергий.
5. Изучение влияния внутрисгусткового рассеяния на энергетический разброс пучка ВЭПП-4М.

Во второй главе изучается взаимодействие пучка электронов с полями электромагнитного излучения в оптическом резонаторе, для этого потребовалось создание станций оптической диагностики для третьего лазера Новосибирского ЛСЭ необходимых для изучения параметров пучка и излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. Во второй главе решались следующие задачи:

1. Создание станций оптической диагностики для третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.
2. Изучение влияния процесса лазерной генерации на поперечный профиль пучка ЛСЭ.
3. Измерение параметров пучка электронов и излучения из оптического резонатора ЛСЭ.

4. Создание алгоритма определения энергетического разброса пучка третьего лазера Новосибирского ЛСЭ по измеренному спектру спонтанного ондуляторного излучения.
5. Экспериментальная регистрация когерентного ондуляторного излучения электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе ЛСЭ.

Научная новизна

- Энергетический разброс пучка ВЭПП-4М впервые измерен во всем диапазоне энергий (от 1 ГэВ до 4,75 ГэВ).
- Экспериментально продемонстрировано наличие влияния эффекта искажения потенциальной ямы на продольный размер пучка ВЭПП-4М.
- Разработана и протестирована оригинальная схема автокоррелятора для среднего ИК диапазона с временным разрешением 1 пс.
- Впервые экспериментально зарегистрировано когерентное ондуляторное излучение электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе лазера на свободных электронах.

Теоретическая и практическая значимость работы

Основная теоретическая и практическая значимость диссертационной работы для ВЭПП-4М состоит в том, что получены новые знания о влиянии эффектов искажения потенциальной ямы, продольной микроволновой неустойчивости и многократного внутрисгусткового рассеяния на параметры пучка ВЭПП-4М. Эти знания позволяют применять наиболее быстрый и простой способ измерения энергетического разброса, а именно определять его значения из измеренного продольного размера сгустка, что востребовано как для экспериментов по физике высоких энергий с детектором КЕДР, так и для различных экспериментов по физике пучков заряженных частиц, проводимых на ВЭПП-4М.

Для новосибирского ЛСЭ основная практическая и теоретическая значимость заключается в том, что возможности системы диагностики, разработанной для третьей очереди Новосибирского ЛСЭ, позволяют проводить измерения спектральных, пространственных и временных характеристик излучения. Установленная на Новосибирском ЛСЭ новая станция предоставляет широкие возможности по изучению характеристик как электронного пучка лазера, так и процесса генерации лазерного излучения, что дает возможности повышения эффективности работы третьей очереди Новосибирского ЛСЭ.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационного исследования являются экспериментальные методы, включая методы статистической обработки данных и численного моделирования, экспериментального исследования параметров электронных сгустков и параметров излучения, а также применение метода сравнения для подтверждения полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту

- Эффекты искажения потенциальной ямы и продольной микроволновой неустойчивости влияют на продольный размер пучка ВЭПП-4М.
- Энергетический разброс пучка ВЭПП-4М сильно зависит от параметров магнитной структуры, особенно при энергиях свыше 3,5 ГэВ.
- Оперативное измерение энергетического разброса пучка ВЭПП-4М возможно с помощью отработанной методики.
- Лазерная генерация на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ влияет на форму поперечного профиля пучка.
- Разработанный автокоррелятор для среднего ИК диапазона позволяет производить измерение длительности импульсов излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ с разрешением не хуже 1 пс.
- Разработанный алгоритм измерения энергетического разброса электронного пучка по спектру спонтанного ондуляторного излучения с учетом влияния эммитанса пучка и угловой расходимости излучения позволяет определить энергетический разброс пучка третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается повторяемостью полученных данных при различных режимах работы ВЭПП-4М и Новосибирского ЛСЭ, а также наличием согласия между полученными экспериментальными данными, результатами моделирования и расчетами, проводимыми на основе полученных данных.

Основные результаты исследований, лежащие в основе диссертации представлялись и обсуждались на научных семинарах ИЯФ СО РАН, а также на научных конференциях:

1) Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application 2022 (г. Новосибирск, Россия, 2022);

- 2) 10th International Particle Accelerator Conference (г. Мельбурн, Австралия, 2019);
- 3) 8th International Particle Accelerator Conference (г. Копенгаген, Дания, 2017);
- 4) 25th Russian Particle Accelerator Conference (г. Санкт-Петербург, Россия, 2016);
- 5) 26th Russian Particle Accelerator Conference (г. Протвино, Россия, 2018).

Результаты работы, составляющие материал диссертации легли в основу научно-квалификационной работы аспиранта [5], которая успешно защищена в 2022 году. Часть разделов глав 1 и 2 вошло в магистерскую диссертацию автора [6], защищённую в 2018 году.

Исследования поддержаны Российским научным фондом (соглашение №18-72-00123 2018 - 2020), а также персональным грантом Российского фонда фундаментальных исследований (договор №20-32-90138, 2020 - 2022).

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 4 [7, 8, 9, 10] в научных журналах из перечня ВАК и 5 в трудах конференций [11, 12, 13, 14, 15]. Все 9 публикаций проиндексированы в базе данных Scopus.

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим, содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проделанную работу.

В публикациях [12, 13] автором лично проведен цикл работ по изучению влияния эффектов искажения потенциальной ямы и продольной микроволновой неустойчивости на длительность пучка ВЭПП-4М от получения экспериментальных данных, заканчивая получением значений импедансов связи и расчета модельных зависимостей продольного размера пучка от тока. В работе [10] автором лично успешно разделил влияние двух указанных ранее эффектов в различных режимах ВЭПП-4М.

В работах [7, 14], автором лично произведено измерение энергетического разброса пучка ВЭПП-4М во всем диапазоне энергий ускорителя. Автором проведена проверка достоверности полученных результатов с использованием методов измерения энергетического разброса, ранее применявшихся на ВЭПП-4.

При определяющем вкладе автора были разработаны станции оптической диагностики третьего лазера Новосибирского ЛСЭ [11, 8, 15], исследование влияние лазерной генерации на поперечный профиль пучка

Новосибирского ЛСЭ приведенное в данных работах были выполнены лично автором.

В работе [9] автором лично предложена модификация алгоритма измерения энергетического разброса пучка по спектру спонтанного ондуляторного излучения, адаптированная под условия работы третьего лазера Новосибирского ЛСЭ

Все представленные экспериментальные данные в работах [8, 9, 11, 15] получены лично автором.

Объем и структура работы

Текст диссертации состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 105 страниц, включая 67 рисунков и 7 таблиц. Список использованной литературы содержит 41 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждена актуальность данной работы, описано состояние дел в данной области физики ускорителей, сформулированы цели и задачи исследования, описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, представлены положения выносимые на защиту, а также информация о степени достоверности и апробации работы.

Первая глава посвящена исследованию влияния эффектов искажения потенциальной ямы, продольной микроволновой неустойчивости и многократного внутрисгусткового рассеяния на продольную динамику пучка в коллайдере ВЭПП-4М. Приведены основные формулы для рассматриваемых эффектов. В первой главе также рассматриваются методы измерения энергетического разброса пучка по измерению продольного размера, а также по измерению глубины модуляции огибающей когерентных бетатронных колебаний. Отдельно рассматриваются особенности магнитной структуры ВЭПП-4М, влияющие на энергетический разброс пучка, а именно наличие градиентных вигглеров, используемых для управления перераспределением декрементов затухания.

Для определения влияния коллективных эффектов на продольный размер пучка ВЭПП-4М была проведена серия экспериментов по измерению продольного размера пучка в зависимости от его тока, в различных режимах ВЭПП-4М. Для измерений продольного распределения частиц в пучке была использована стрик-камера PS-01/S20 с пикосекундным временным разрешением, удлинение регистрируемого

сигнала, связанное с механизмом работы стрик-камеры, несущественно в масштабах наблюдаемых размеров сгустка.

Для определения продольного импеданса коллайдера ВЭПП-4М были измерены зависимости продольного размера пучка от тока. Примеры полученных зависимостей представлены на рисунках 1 и 2.

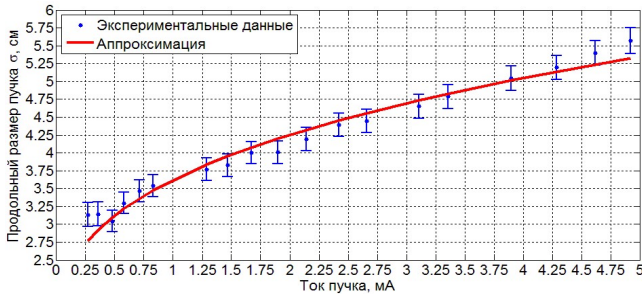


Рисунок 1 – Зависимость на энергии 1865 МэВ

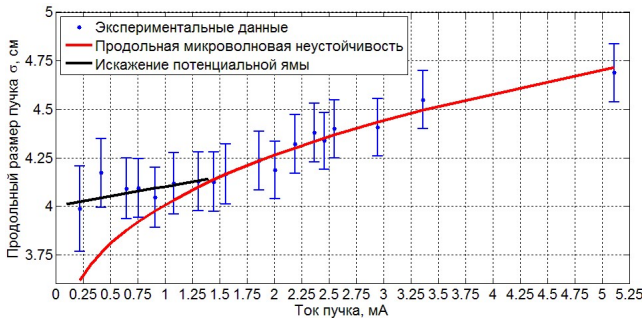


Рисунок 2 – Проверка корректности учета влияния эффекта искажения потенциальной ямы на энергии 3 ГэВ

Так же, на этих рисунках представлен результат аппроксимации полученных данных зависимостью вида $\sigma_s \propto I_b^{1/3}$, характерной для продольной микроволновой неустойчивости, которая развивается при больших токах. По измеренным на энергиях 3 ГэВ и выше зависимостям продольного размера пучка от тока видно, что при малых токах пучка зависимость длины от тока слабая и не аппроксимируется зависимостью $\sigma_s \propto I_b^{1/3}$, характерной для продольной микроволновой неустойчивости, а влияние эффекта многократного внутрисгусткового рассеяния на этой энергии слишком мало. Иначе говоря, можно сделать вывод, что изменение

размера в данном случае сопоставимо с точностью измерений. Из этого можно сделать оценку сверху для величины $Im[(Z_{\parallel}/n)_{eff}] \approx 2$ Ом.

Из графиков на рисунке 2 видно, что такая оценка влияния эффекта искажения потенциальной ямы согласуется с экспериментальными данными на энергии 3 и 3,5 ГэВ. С учетом оценки влияния эффекта искажения потенциальной ямы, по измеренным зависимостям было определено значение $|Z_{\parallel}/n|_{BB} = 7,9 \pm 1,4$. Ом.

Кроме того, был проведен эксперимент, целями которого являлись точное определение вклада эффекта искажения потенциальной ямы и проверка достоверности полученных значений импеданса. Для этого на энергии инжекции (1900 МэВ), была проведена серия измерений с различными значениями энергетического разброса пучка, что позволило управлять положением порогового тока продольной микроволновой неустойчивости. Используя полученное по предыдущим измерениям значение широкополосного импеданса, был оценен пороговый ток микроволновой неустойчивости в данном режиме, равный примерно 10 мА, а все измерения проводились при меньшем токе. Проведя аппроксимацию вклада эффекта искажения потенциальной ямы, полученное значение $Im[(Z_{\parallel}/n)_{eff}] = 2,1 \pm 0,4$ согласуется с ранее заявленной оценкой.

$$y = kl_b, \quad y = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}\right), \quad k = -\frac{\alpha \operatorname{Im}\left[\left(\frac{Z_{\parallel}}{n}\right)_{eff}\right]}{\sqrt{2\pi}EQ_{s0}^2} \left(\frac{R}{\sigma_{s0}}\right)^3. \quad (1)$$

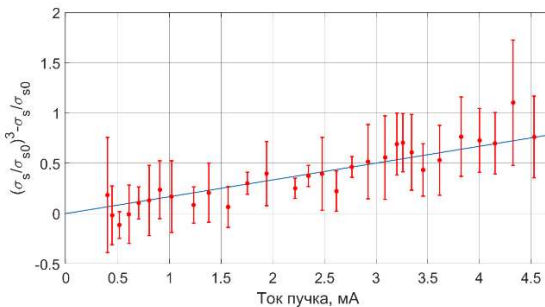


Рисунок 3 – Определение вклада эффекта искажения потенциальной ямы

Для проверки корректности учета влияния обоих эффектов было проведено измерение зависимости в специально подобранном режиме, чтобы ток порога продольной микроволновой неустойчивости был порядка 3 мА. На рисунке 4 представлены результаты этого измерения с нанесением расчетных зависимостей для каждого из эффектов. Красными точками обозначены измеренные значение продольного размера пучка, зеленой линией показана зависимость продольного размера пучка при учете только эффекта искажения потенциальной ямы, а синяя кривая соответствует длине пучка, определяемой продольной микроволновой неустойчивостью. Видно, что измерения хорошо сопоставляются с расчетными зависимостями, и при токе примерно 3 мА продольный размер пучка хорошо описывается уравнением продольной микроволновой неустойчивости. До порогового тока продольный размер описывается уравнением, соответствующим эффекту искажения потенциальной ямы.

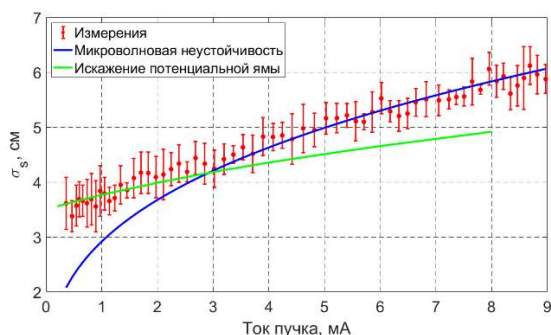


Рисунок 4 – Определение вклада эффекта искажения потенциальной ямы

Для сопоставления величины измеренного энергетического разброса, получаемого по измерениям длины пучка, с величиной, определяемой из параметров огибающей когерентных колебаний, была проведена серия измерений, в которой энергетический разброс варьировался посредством изменения тока в вигглере. Результаты сопоставления представлены на рисунке 5. Полученные данные демонстрируют хорошее совпадение результатов, полученных двумя методами.

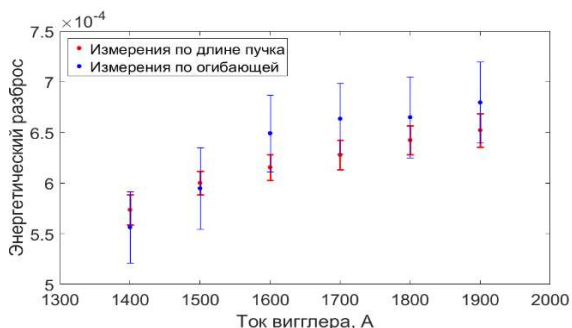


Рисунок 5 – Сравнение двух методов измерений энергетического разброса пучка, $E=1900$ МэВ, $I=0,3$ мА

На рисунке 6 показаны все измеренные значения энергетического разброса. Различным цветом обозначены значения, полученные в различных сериях экспериментов. На энергиях ниже 1,5 ГэВ исследовалось влияние эффекта многократного внутрисгусткового рассеяния на энергетический разброс пучка. Основной факт, указывающий на влияние этого эффекта - увеличение энергетического разброса при увеличении синхротронной частоты. Кроме того, видно заметное отклонение зависимости энергетического разброса от линейной, что является прямым указанием на влияние внутрипучкового рассеяния. На энергиях ускорителя выше 3,5 ГэВ замедляется рост энергетического разброса, и это связано с перераспределением декрементов затухания вследствие невозможности уставки большого тока в источнике питания градиентных вигглеров.

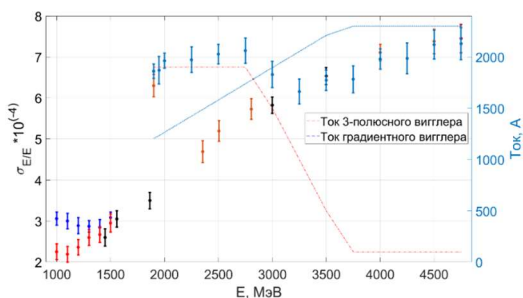


Рисунок 6 – Энергетический разброс, полученный по измерению продольного размера пучка

Во второй главе рассмотрено применение оптических методов диагностики для изучения влияния процесса лазерной генерации на

параметры пучка третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. Глава начинается с краткого описания установки Новосибирский ЛСЭ и процесса лазерной генерации в ЛСЭ. Представлено описание разработанных станций диагностик параметров пучка и излучения из оптического резонатора третьего лазера Новосибирского ЛСЭ, а также краткое теоретическое описание принципов проводимых измерений и особенностей работы и настройки данных диагностик с учетом особенностей третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.

В результате изучения поперечных профилей пучка после ондулятора было определено, что в результате процесса лазерной генерации происходит характерное искажение формы поперечного профиля пучка. На рисунке 7 показаны примеры изменения радиального профиля пучка при появлении лазерной генерации ЛСЭ. При различных режимах работы ЛСЭ наблюдается схожесть в зависимости профиля электронного пучка от наличия или отсутствия лазерной генерации. В присутствии генерации в центральной части радиального распределения наблюдается уменьшение плотности частиц, одновременно с этим на правом склоне профиля, соответствующем траекториям частиц с меньшей энергией, плотность распределения возрастает. При этом вертикальный профиль пучка не меняет своей формы или положения.

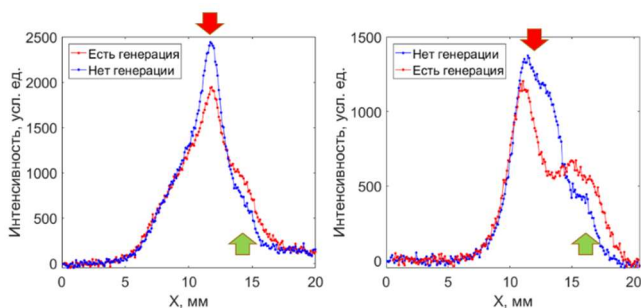


Рисунок 7 – Радиальные профили пучка, зарегистрированные при разных режимах настройки 3-го лазера. Синий – профиль пучка в отсутствии лазерной генерации, красный – профиль пучка при наличии лазерной генерации. Красными и зелеными стрелками показаны характерные области уменьшения и увеличения плотности распределения соответственно

Основным объяснением данного процесса является перераспределение частиц по энергиям в результате лазерной генерации,

наличие ненулевой дисперсионной функции (0,71 м) приводит к горизонтальному смещению частиц, пропорциональному отклонению импульса от равновесного значения $\Delta x = \eta \frac{\Delta P}{p}$. Это перераспределение по энергиям подтверждается результатами численного моделирования. Также в главе представлены результаты измерений параметров Твисса с помощью метода квадрупольного сканирования, пример полученных данных показан в таблице 1.

Таблица 1 – Измеренные параметры Твисса

Параметр	X	Y
ε , м*рад	$1,56 * 10^{-6}$	$5,17 * 10^{-7}$
β , м	2,83	23,94

Отдельное место в этой главе занимает описание диагностики излучения, выводимого из оптического резонатора ЛСЭ. Кратко представлено описание и устройство станции излучения, а также представлены расчетные данные по спектру спонтанного ондуляторного излучения, процедуре измерения спектра и калибровке монохроматора. Описан алгоритм определения энергетического разброса пучка третьего лазера Новосибирского ЛСЭ по измеренному спектру спонтанного ондуляторного излучения. Основным отличием предложенного алгоритма является необходимость учета влияния эммитанса пучка и углового распределения излучения. Представлены результаты моделирования применения данного алгоритма в условиях третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. По результатам моделирования можно сделать вывод, что в реальном эксперименте ожидаемая ошибка измерения энергетического разброса не будет превышать 15%.

В этой главе также представлена схема оригинального автокоррелятора для среднего ИК диапазона, предназначенного для измерения характеристик третьего лазера Новосибирского ЛСЭ (рисунок 8). Предложенная схема по устройству близка к схеме интерферометра Майкельсона, однако плечи интерферометра представляют собой плоские зеркала, расположенные в направлении распространения излучения и разнесенные в поперечной к излучению плоскости друг относительно друга для получения двух отдельных импульсов излучения. Изменение положения одного из зеркал, установленного на моторизированной подставке, позволяет контролировать длину пути одного из лучей и, соответственно, его временную задержку относительно другого. Смещение зеркала на длину a вносит задержку $\tau = \frac{2a}{c}$, где c – скорость света.

Для измерений на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ был выбран кристалл дифосфида цинка-германия ($ZnGeP_2$), который имеет квадратичную нелинейность и предназначен для работы в диапазоне длин волн излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ. Меняя задержку между импульсами путем сдвига зеркала производится регистрация автокорреляционной функции 1-го (без нелинейного кристалла) или 2-го (с кристаллом) порядка, по которым можно восстановить соответственно спектр или длительность импульса излучения. Предложенная схема автокоррелятора была протестирована на неодимовом лазере с длительностью импульса порядка 10 пикосекунд по основанию с длиной волны излучения 1064 нм. Помимо автокоррелятора, длительность импульса лазерного излучения измерялась с помощью стрик-камеры. Измеренная стрик-камерой длительность импульса неодимового лазера в серии из 40 измерений составляет $\sigma = 3,4 \pm 0,5$ пс, точность измерения в данном эксперименте определялась разрешающей способностью стрик-камеры. Измерения с нелинейным кристаллом позволили измерить автокорреляционную функцию второго порядка, представленную на рисунке 9.

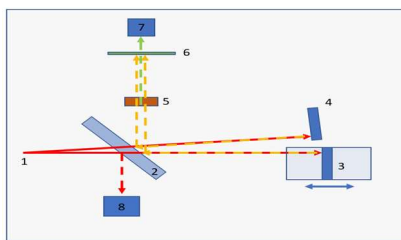


Рисунок 8 – Предложенная оптическая схема для измерения автокорреляционных функций. 1 – излучение от источника, 2 – полупрозрачное зеркало, 3 – зеркало на моторизированной подставке, 4 – неподвижное зеркало, 5 – нелинейный кристалл, 6 – полосовой фильтр, 7 – детектор излучения, 8 – место для установки дополнительной диагностики основной гармоники излучения

Измеренная длительность автокорреляционной функции второго порядка (2.21) составила $5,4 \pm 1,2$ пс, таким образом длительность импульса лазерного излучения, определенная по измеренной автокорреляционной функции с помощью соотношения (2.26), составляет $3,6 \pm 0,8$ пс, что в пределах погрешности измерений совпадает со значением, полученным с помощью стрик-камеры. Кроме того, для наглядности сопоставления полученных результатов на рисунке 10 показана автокорреляционная функция второго порядка для профиля

интенсивности пучка, измеренного стрик-камерой. Как видно, совпадение между расчетной и измеренной автокорреляционными функциями находится в пределах ошибки измерений. Таким образом, можно заключить, что предложенная схема автокоррелятора позволяет измерять длительность импульсов лазерного излучения с точностью не хуже, чем 1 пс.

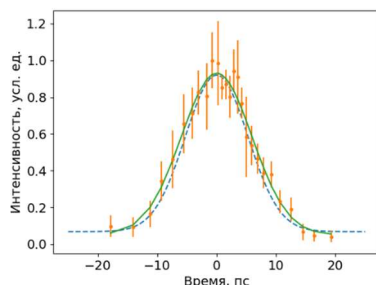


Рисунок 9 – Измеренная автокорреляционная функция второго порядка импульса неодимового лазера (оранжевые), ее аппроксимация (зеленый) и расчетная автокорреляционная функция импульса, зарегистрированного стрик-камерой (синий пунктир)

Одним из проведенных экспериментов был эксперимент по регистрации когерентного ондуляторного излучения электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе ЛСЭ. Для понимания контекста эксперимента рассмотрим особенности генерации лазерного излучения на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ, его схема представлена на рисунке 10.

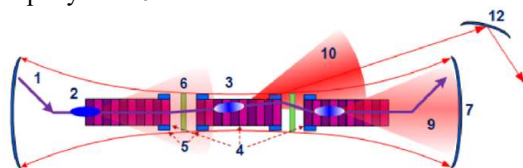


Рисунок 10 – Схема третьей очереди НовоЛСЭ. 1 – траектория пучка; 2,3 – пучок; 4 – ондуляторы; 5 - дипольные корректоры; 6 – квадрупольные линзы; 7,12 – зеркала; 9 – излучение, накопленное в резонаторе; 10 – излучение, выходящее из резонатора

Третья очередь НовоЛСЭ состоит из трех ондуляторов (4), помещенных в оптический резонатор (7). Интенсивность лазерной генерации зависит от продольной группировки пучка электронов. В первом

ондуляторе происходит модуляция продольной плотности пучка, а во втором - основная генерация излучения, так как во втором ондуляторе продольная группировка пучка достигает максимальных значений. С помощью дипольных корректоров (5) пучок можно направить во второй ондулятор под углом, вследствие чего вынужденное когерентное излучение, связанное с взаимодействием с электромагнитной волной, накопленной в оптическом резонаторе (однопролетное излучение) будет испускаться под углом к оси резонатора и с помощью зеркала (12) выводится наружу. Модуляция пучка обеспечивается запасенным излучением в резонаторе, которое также частично попадает на зеркало (12) вследствие угловой расходимости излучения. Важно заметить, что накопленное в резонаторе излучение заполняет не весь резонатор. В качестве детектора для эксперимента по регистрации когерентного ондуляторного излучения электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе ЛСЭ был использован охлаждаемый КРТ (Кадмий-Ртуть-Теллур) детектор с временным разрешением порядка 5 нс, что позволяет проводить регистрацию отдельных импульсов излучения ЛСЭ. Для регистрации сигнала ЛСЭ работает в режиме модуляции излучения, сигнал запуска системы модуляции излучения используется для синхронизации запуска детектора и регистрации момента остановки лазерной генерации. На рисунке 11 показан момент «отключения» лазерной генерации, на сигнале заметен характерный значительный спад интенсивности сигнала примерно на отметке 70 мкс, что связано с отсутствием однопролетного излучения под углом вследствие отсутствия когерентного взаимодействия с накопленным в оптическом резонаторе излучением, однако спонтанное ондуляторное излучение все еще присутствует, но имеет во много порядков меньшую интенсивность.

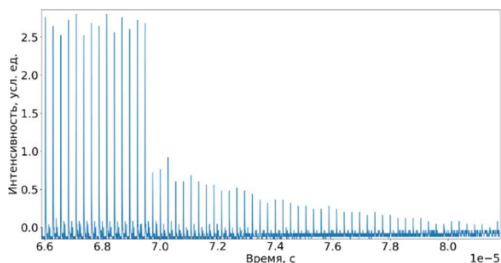


Рисунок 11 – Момент «отключения» лазерной генерации

Разность между средней амплитудой сигнала до этого момента и сигналом последующего импульса излучения относится к амплитуде

однопролетного излучения. После этого сигнал постепенно спадает за несколько десятков пролетов пучка через резонатор. Характерный интервал между импульсами излучения соответствует рабочей частоте лазера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы состоят в следующем:

1. Проведено исследование влияния эффектов искажения потенциальной ямы и продольной микроволновой неустойчивости на продольный размер пучка коллайдера ВЭПП-4М.
2. По зарегистрированным зависимостям продольного размера пучка от его тока определен продольный импеданс коллайдера ВЭПП-4М. По этим значениям создана модель для расчета зависимости продольного размера пучка ВЭПП-4М в различных режимах его работы.
3. Отработана методика измерения энергетического разброса пучка по измерению его длины с учетом влияния коллективных эффектов, проверена достоверность получаемых результатов путем сравнения полученных данных с методикой измерения по глубине модуляции огибающей когерентных бетатронных колебаний.
4. Измерен энергетический разброс пучка ВЭПП-4М во всем доступном диапазоне энергий и при различных настройках магнитной системы ускорителя.
5. Исследовано влияние эффекта многократного внутрисгусткового рассеяния на энергетический разброс пучка ВЭПП-4М в диапазоне энергий 1-1,5 ГэВ.
6. Установлено 3 станции для наблюдения за параметрами пучков и выводимого из оптического резонатора излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.
7. Получены данные о влиянии лазерной генерации на поперечный профиль пучка третьего лазера Новосибирского ЛСЭ.
8. Разработан алгоритм измерения энергетического разброса пучка по спектру спонтанного ондуляторного излучения из ондуляторов третьего лазера Новосибирского ЛСЭ, учитывающий влияние эммитанса пучка и угловой расходимости излучения.

9. Разработан и протестирован автокоррелятор для среднего ИК диапазона, позволяющий производить измерение длительности импульсов излучения третьего лазера Новосибирского ЛСЭ с разрешением не хуже 1 пс.
10. Экспериментально зарегистрировано когерентное ондуляторное излучение электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе ЛСЭ.

Перспектива дальнейшего изучения влияния коллективных эффектов и измерение энергетического на ВЭПП-4М связана с проведением экспериментов по физике высоких энергий, а также с планируемыми экспериментами по физике пучков заряженных частиц. Для их проведения могут потребоваться дальнейшие измерения энергетического разброса пучка и учет влияния коллективных эффектов на длину пучка для их учета в обработке экспериментальных данных.

Перспектива дальнейшего развития оптических методов диагностики на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ не вызывает сомнений. Установленные станции оптической диагностики существенно улучшили контроль за параметрами пучков и излучения. Предложенный алгоритм измерения энергетического разброса в ближайшее время будет применен на третьем лазере Новосибирского ЛСЭ, а работы по установке и юстировке предложенного автокоррелятора уже начаты. Данные, которые будет возможно получить с помощью этих диагностических методов, будут востребованы при настройке режимов лазера. Важность проведения экспериментов по изучению свойств когерентного излучения электронного пучка, сгруппированного в оптическом резонаторе, не вызывает сомнений и их проведение планируется в ближайшее время.

Список литературы

- [1] Chao A. Wu. Physics of Collective Beam Instabilities in high energy accelerators : монография / A. Chao. – New York: Wiley, 1993. – 371 p. – ISBN 0-471-55184-8. – Текст : непосредственный.
- [2] Смалюк, В. В. Подавление неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях: специальность 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника» : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Смалюк Виктор Васильевич ; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН. – Новосибирск, 2010. – 172 с. – Текст : непосредственный.
- [3] Beam energy spread measurement at the VEPP-4M Electron-Positron Collider / V. A. Kiselev, N. Yu. Muchnoi, O. I. Meshkov, V. V. Smaluk [et al.]. – Текст : электронный // Journal of instrumentation. – 2007. – Vol. 2. – P06001 – URL:

<https://doi.org/10.1088/1748-0221/2/06/P06001>. – Дата публикации: 08.06.2007.

[4] Electron Outcoupling System of Novosibirsk Free Electron Laser Facility - Beam Dynamics Calculation and the First Experiments / Y. V. Getmanov, O. A. Shevchenko, N. A. Vinokurov, A. S. Matveev. – Текст : электронный // 63th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs Proceedings (Berlin, Germany, 15-20 september 2019.). Berlin, 2019. – P. 98–102. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/erl2019/papers/wepnec16.pdf>. (Дата обращения: 25.05.2023).

[5] Борин В.М. Исследование взаимодействия пучка заряженных частиц с электромагнитными полями в ускорителях методами оптической диагностики: специальность 1.3.18 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника» : научно-квалификационная работа аспиранта / Борин Владислав Михайлович ; Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН. – Новосибирск, 2022. – 96 с. – Текст : непосредственный.

[6] Борин, В. М. Исследование энергетического разброса и профиля пучка в циклических ускорителях ИЯФ: специальность 03.04.02 «Физика» : диссертация на соискание степени магистра / Борин Владислав Михайлович ; Новосибирский Государственный университет. – Новосибирск, 2018. – 64 с. – Текст : непосредственный.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных:

[7] Measurements of VEPP-4M Collider Energy Spread in Full Energy Range / V. M. Borin, V. L. Dorokhov, O. I. Meshkov, Ma X. C. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2020. – Vol. 17, No 3. – P. 332-342. URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477120030036>. – Дата публикации: 22.06.2020.

[8] Development and application of electron beam optical diagnostics for the multi-turn ERL of the Novosibirsk FEL facility / Ya. Getmanov, V Borin, V. Dorokhov [et al.]. – Текст : электронный // Journal of instrumentation. – 2020. – Vol. 15. Nr. 6. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/06/T06004>. – Дата публикации: 05.06.2020.

[9] A new station for measurements of undulator and laser radiation parameters of the 3rd laser of the Novosibirsk free electron laser / V. M. Borin, N. A. Vinokurov, V. V. Gerasimov [et al.]. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2022. – Vol. 19, nr 4. – P. 376-383. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477122040094>. – Дата публикации: 26.07.2022.

[10] Borin, V. Study of the Influence of Longitudinal Impedance on the Duration of an Electron Bunch in a VEPP-4M Collider / V. Borin, V. Dorokhov, O.

Meshkov. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Vol. 20, nr 2. – P. 164–171. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477123020115>. – Дата публикации: 20.04.2023.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в сборниках тезисов докладов научных конференций:

[11] An Experimental Study of Beam Dynamics in the ERL-Based Novosibirsk Free Electron Laser / V. M. Borin, V. L. Dorokhov, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст : электронный // 8th International Particle Accelerator Conference proceedings (Copenhagen, Denmark, 14-19 May 2017). – Copenhagen, 2017. – P. 3781-3783. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2017/papers/thpab036.pdf>. (Дата обращения: 25.05.2023).

[12] The Logitudinal Broadband Impedance and Energy Spread Measurements at the VEPP-4M Electron-Positron Collider / V. M. Borin, V. L. Dorokhov, V. A. Kiselev [et al.]. – Текст : электронный // 8th International Particle Accelerator Conference proceedings (Copenhagen, Denmark, 14-19 May 2017). – Copenhagen, 2017. – P. 3117-3119. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2017/papers/wepik081.pdf>. (Дата обращения: 25.05.2023).

[13] The Logitudinal Broadband Impedance and Energy Spread Measurements at the VEPP-4M / V. M. Borin, V. L. Dorokhov, V. A. Kiselev [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXV Russian Particle Accelerator Conference (Saint Petersburg, 21–25 November 2016). – Saint Petersburg, 2017. – P. 650–650. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/papers/thpsc052.pdf>. (Дата обращения: 25.05.2023).

[14] Measurements of energy spread ad VEPP-4M / V. M. Borin, V. L. Dorokhov, V. A. Kiselev [et al.]. – Текст : электронный // Proceedings of the XXVI Russian Particle Accelerator Conference (Protvino, 1–5 November 2018). – Protvino, 2018. – P. 469–471. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2018/papers/thpsc29.pdf>. (Дата обращения: 25.05.2023).

[15] Measurements of Beam Parameters at the Last Track of the ERL-Based Novosibirsk Free Electron Laser / V. M. Borin, Ya. V. Getmanov, A. S. Matveev [et al.]. – Текст : электронный // 10th International Particle Accelerator Conference proceedings (Melbourne, Australia, 19-24 May 2019). – Melbourne, 2019. – P. 2632-2634. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/wepgw068.pdf>. – Дата публикации: 21.06.2019.

Борин Владислав Михайлович

**Исследование взаимодействия пучка
заряженных частиц с электромагнитными
полями в ускорителях методами оптической
диагностики**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 13.07.2023.
Подписано в печать 17.07.2023.
Формат 60x90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч. изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 8

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротопринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11