

На правах рукописи

**ТОМИН Сергей Иванович**

Дифракционно-ограниченный источник излучения  
рентгеновского диапазона на базе накопителя Сибирь-2

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2015

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт"

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

**КОРЧУГАНОВ** доктор физико-математических наук,  
Владимир Николаевич с.н.с., заместитель директора  
Курчатовского центра синхротронно-  
нейтронных исследований,  
Национальный исследовательский центр  
"Курчатовский институт", г. Москва

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

**МЕЗЕНЦЕВ** доктор физико-математических наук, с.н.с.,  
Николай Александрович заместитель директора по научной работе,  
Институт ядерной физики имени Г.И.Будкера,  
г. Новосибирск

**СМИРНОВ** доктор физико-математических наук, доцент,  
Александр Валентинович начальник сектора №1 Лаборатории физики  
высокой энергии, Объединенный институт  
ядерных исследований, г. Дубна

**ВЕДУЩАЯ** Институт ядерных исследований РАН,  
**ОРГАНИЗАЦИЯ:** г. Троицк

Защита диссертации состоится "3" июня 2015 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д **212.130.01** в НИЯУ МИФИ.

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе д. 31, тел. (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



И.С. Щедрин

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

В последние несколько десятилетий синхротронное излучение (СИ) стало важнейшим инструментом фундаментальных и прикладных исследований материи. Различные методы, основанные на синхротронном излучении, дают информацию о пространственной структуре материалов, о микроструктуре, о химическом составе и электронной структуре, о свойствах поверхностей, границ раздела сред тонких плёнок и многослойных материалов. Синхротронное излучение открыло возможность реализации ряда принципиально новых технологий: рентгеновской литографии для производства приборов с субмикронными структурами и LIGA–технологии для производства приборов микромеханики. СИ применяется в медицинской диагностике и создании новых лекарств.

История создания и улучшения параметров источников СИ уже насчитывает три поколения и в настоящий момент идет формирование облика источника СИ 4-го поколения.

Экспериментальные возможности источников синхротронного излучения тем выше, чем больше спектральный поток и спектральная яркость излучения в заданном спектральном диапазоне.

Спектральный поток источника

$$F(\lambda) = \frac{N_{photons}}{c \cdot (0.1\% \Delta\lambda/\lambda)} \quad (1)$$

- определяется как количество фотонов, испускаемых в единицу времени в полосе длин волн  $\Delta\lambda/\lambda$  около заданной длины волны. Общепринятой полосой для сравнения яркостей и потоков является  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$ .

В свою очередь, спектральная яркость зависит от поперечных

фазовых объемов (эммиттансов) источника излучения. Чем меньше эммиттансы источника, тем выше яркость СИ. Уменьшение эммиттансов электронного (позитронного) пучка имеет смысл до тех пор, пока они не сравниваются с поперечными фазовыми объемами излучения отдельного электрона на заданной длине волны, ограниченными явлением дифракции. Таким образом, возникает понятие дифракционно-ограниченного источника. Величина дифракционно-ограниченного эммиттанса (ДОЭ) и фотонного пучка зависит от длины волны излучения  $\varepsilon = \lambda/(4\pi)$ . При малых пространственных и угловых разбросах координат частиц в пучке на больших длинах волн преобладают естественные размеры излучения.

Таким образом, для заданной длины волны величина ДОЭ является фундаментальным ограничением на минимальные фазовые размеры электронного пучка и определяет значение достижимой максимальной яркости на накопителе.

Минимизация эммиттанса электронного пучка накопителя Сибирь-2 (переход на новую магнито-оптическую структуру с меньшим натуральным эммиттансом и уменьшение энергии электронного пучка) в сочетании с установкой на кольцо внутривакуумного ондулятора с малым периодом и малым межполюсным зазором приведет к увеличению яркости фотонных пучков из уже существующих каналов вывода СИ, спектральная яркость фотонного пучка из ондулятора будет приближаться к уровню яркости ведущих источников мира 3 поколения. В сочетании с достижением дифракционного ограничения в вертикальном направлении, заметная доля излучения из такого ондулятора в рентгеновском диапазоне будет обладать пространственной и временной когерентностью, достаточной для проведения, по крайней мере, методических работ в области рентгеновской голографии.

### **Цель работы.**

Целью диссертационной работы является исследование возможности создания интенсивного квазикогерентного источника излучения рентгеновского диапазона на базе накопителя Сибирь-2 при условии дифракционного ограничения на фазовый объем источника по одной поперечной координате.

Основными задачами диссертации являются:

- исследование возможности перехода на новую яркую магнито-оптическую структуру с горизонтальным эмиттансом  $17 \text{ нм} \cdot \text{рад}$  на энергии  $2.5 \text{ ГэВ}$ ;
- определение основных параметров ондулятора для получения квазикогерентного излучения в рентгеновском диапазоне спектра с энергией фотонов  $2\text{-}10 \text{ кэВ}$ ;
- исследование влияния вставных устройств на динамику и радиационные свойства электронного пучка в накопителе Сибирь-2;
- расчет параметров синхротронного излучения из ондулятора с учетом параметров электронного пучка и определение условия на достижение дифракционного ограничения по одной из поперечных координат;

### **Личный вклад автора**

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены и разработаны автором лично, либо при его непосредственном участии.

Автором была исследована и показана возможность установки ондулятора с периодом  $7 \text{ мм}$  на накопитель Сибирь-2, изучено влияние вставных устройств на динамику электронного пучка, рассмотрена

структура с эмиттансом 17 нм·рад как наиболее вероятная магнито-оптическая структура для получения дифракционного ограничения и показано, что возможно получение такого ограничения в вертикальной плоскости. Рассчитан ондулятор с периодом 7 мм и определены его основные параметры. Выполнено исследование влияния вставных устройств на область устойчивости пучка в накопителе Сибирь-2. Получены аналитические выражения, используемые для описания интегральных характеристик многополюсных вставных устройств при проведении многооборотного трекинга. Разработан метод компьютерного моделирования нелинейной динамики заряженных частиц в циклических ускорителях, на его основе реализована компьютерная программа и проведено численное моделирование движения частиц с учетом влияния вставных устройств в разных режимах работы накопителя.

#### **Научная новизна.**

1. Исследована и показана возможность перехода накопителя Сибирь-2 на новую яркую магнито-оптическую структуру с горизонтальным эмиттансом 17 нм·рад на энергии 2.5 ГэВ.
2. Получены аналитические выражения для описания интегральных характеристик многополюсного вставного устройства с использованием метода гамильтоновской механики, предназначенных для моделирования динамики электронного пучка при многооборотном трекинге.
3. Разработан метод компьютерного моделирования нелинейной динамики частиц в циклических ускорителях с вставными устройствами. Его особенность и отличие от известных программных продуктов заключаются в возможности

использования при расчетах как численного, так и аналитического представления многополюсных вставных устройств.

4. Показана возможность получения дифракционно - ограниченного источника излучения рентгеновского диапазона на накопителе Сибирь-2 поколения 2+.

### **Практическая ценность.**

Накопитель Сибирь-2 относится к источникам 2+ поколения. Переход на структуру 17 нм·рад приведет к уменьшению натурального эмиттанса электронного пучка более чем в 5 раз, что, в свою очередь, увеличит спектральную яркость фотонных пучков на выходе из существующих каналов вывода СИ. Создание и установка на кольцо накопителя Сибирь-2 многополюсного ондулятора с периодом 7 мм значительно расширит экспериментальные возможности комплекса СИ, а в сочетании с переходом на яркую магнитную оптику позволит получить дифракционное ограничение в вертикальной плоскости в рентгеновском диапазоне. Это позволит получать фотонные пучки, сравнимые по яркости с ведущими источниками синхротронного излучения третьего поколения, а пользователям синхротронного излучения на комплексе Курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ) — проводить эксперименты на качественно новом уровне.

Разработанные при выполнении работы программы и алгоритмы уже успешно используются на комплексе для проведения коррекции замкнутой орбиты накопителя Сибирь-2 [11].

Созданные соискателем программные модули для моделирования линейной оптики и нелинейной динамики в сочетании с программой расчета лазерного излучения Genesis в настоящий момент используются в

European XFEL GmbH (Гамбург, Германия) для моделирования генерации лазерного излучения на лазере на свободных электронах при различных параметрах электронного пучка и разной настройке магнитной оптики ондуляторных секций. Программа, созданная в соавторстве для расчета синхротронного излучения GENERA, используется в European XFEL GmbH для расчета спонтанного излучения из цепочек ондуляторов как фона, который всегда существует вне зависимости от генерации лазерного излучения [8], а также для моделирования экспериментов по диагностике ондуляторов с помощью спонтанного излучения.

С помощью программы для моделирования динамики пучка выполнено моделирование новой схемы многооборотной инжекции электронного пучка в накопитель Сибирь-2 и показано, что использование такой схемы не уменьшает эффективности инжекции, что подтверждается на практике после внедрения данной схемы [12].

Одна из глав диссертационной работы может являться основой для технического проекта создания ондулятора с периодом 7 мм.

### **Основные результаты, выносимые на защиту.**

1. Результаты исследования и обоснования возможности перехода на новую яркую магнито-оптическую структуру с горизонтальным эмиттансом 17 нм·рад на энергии 2.5 ГэВ.
2. Определение и обоснование параметров ондулятора, необходимых для получения дифракционно-ограниченного источника излучения в рентгеновском диапазоне в одной из поперечных координат.
3. Разработка компьютерной программы для моделирования нелинейной динамики частиц в циклических ускорителях с вставными устройствами. Ее особенность и отличие от известных



программных продуктов заключаются в возможности использования при расчетах как численного, так и аналитического представления многополюсных вставных устройств.

4. Аналитические выражения для описания интегральных характеристик многополюсного вставного устройства с использованием метода гамильтоновской механики, предназначенных для моделирования динамики электронного пучка при многооборотном трекинге.
5. Результаты исследования устойчивости поперечного движения в накопителе Сибирь-2 в новой структуре с горизонтальным эмиттансом 17 нм·рад с установленными вставными устройствами.
6. Результаты исследования возможности получения дифракционно - ограниченного источника излучения рентгеновского диапазона в вертикальном бетатронном фазовом пространстве на накопителе поколения 2+ Сибирь-2.

**Достоверность научных результатов.** Достоверность выводов в диссертации подтверждается: совпадением результатов, полученных при использовании методов численного моделирования движения релятивистских заряженных частиц, разработанных автором, с результатами, полученными при помощи аналитических методов; проверкой методов моделирования в экспериментах по коррекции искажений замкнутой орбиты электронов и по оптимизации многооборотной инжекции в накопителе Сибирь-2. Также достоверность научных результатов обусловлена применением современных и общепризнанных программ для расчета трехмерных магнитных полей ондулятора.

**Апробация работы.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных работах, из которых 4 работы – в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в библиографической базе данных Web of Science и в Scopus. Результаты представлялись автором в виде устных докладов на ведущих Российских конференциях по данной тематике и на различных международных конференциях, включая:

- **XX Russian Particle accelerator Conference** (Звенигород, Россия 2008):
  - o A. Anoshin, E. Fomin, V. Korchuganov and **S. Tomin**. Possibility to Reach the Diffraction Limited X-Ray Source in Kurchatov Center of Synchrotron Radiation. Proc. of RuPAC, 2008.
- **Научная сессия МИФИ** (Москва, 2008):
  - o В.Н. Корчуганов, **С.И. Томин**, Дифракционно-ограниченный источник рентгеновского излучения в Курчатовском Центре Синхротронного Излучения, Сборник трудов научной сессии МИФИ-2008. Том 5.
- **РСНЭ-НБИК 2009** (Москва, 2009):
  - o В. Н. Корчуганов, Н. Ю. Свечников, Н. В. Смоляков, **С. И. Томин**. Специализированные источники излучения на накопительном кольце Сибирь-2. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, (11):22–28, 2010.
- **XXI Russian Particle accelerator Conference** (Протвино, Россия 2010):
  - o V.N. Korchuganov, N.V. Smolyakov, N.Yu. Svechnikov and **S.I. Tomin**. Radiation Sources at Siberia-2 Storage Ring. Proc. of RuPAC, 2010.

- **11th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation** (Лион, Франция, 2012):
  - Nikolay Smolyakov, **Sergey Tomin**, and Gianluca Aldo Geloni. Electron motion in a 3-d undulator magnetic field. Journal of physics / Conference Series, 425(3):032023, 2013.
  - **S.Tomin**, N.Smolyakov, G.Geloni, J.Pflueger, and Y.Li. Analysis of magnetic properties of the European XFEL undulator prototype. Journal of physics / Conference Series, 425(3):032003, 2013.
- **4th International Particle Accelerator Conference** (Шанхай, Китай, 2013):
  - I. Agapov, G. Geloni, O. Chubar, M. Scheer, M.Titze, **S. Tomin**, and N. Smolyakov. Spontaneous Radiation Calculations for the European XFEL. Proc. of IPAC, 2013.
  - **S. Tomin** and V.Korchuganov. Insertion Devices Influence on the Beam Dynamics at Siberia-2 Storage Ring. Proc. of IPAC, 2013.
- **5th International Particle Accelerator Conference** (Дрезден, Германия, 2014):
  - **S. Tomin** and A. Valentinov “On-line Beam Control with Ocelot at Siberia-2”. Proc. of IPAC, 2014.
  - **S. Tomin** and V. Korchuganov “New Injection System of Siberia-2 Light Source”. Proc. of IPAC, 2014.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации 135 страниц, включая 62 рисунка и 14 таблицы.

## Содержание работы

**Во Введении** показана актуальность работы, сформулированы предмет, цели и задачи исследования.

**В первой главе** рассмотрены вопросы, связанные с минимизацией эмиттанса в источниках синхротронного излучения (СИ) и магнито-оптические структуры накопителя Сибирь-2. Описана действующая структура накопителя Сибирь-2, основные параметры и свойства этой структуры. С помощью программы Ocelot [4] и специально разработанного программного модуля для коррекции замкнутой орбиты [11] изучено влияние ошибок выставки магнитных элементов на размеры области устойчивого движения пучка в действующей оптике Сибири-2.

Далее подробно рассмотрена магнито-оптическая структура с эмиттансом  $17 \text{ нм}\cdot\text{рад}$  ( $2.5 \text{ ГэВ}$ ) как наиболее вероятная структура для модернизации накопителя Сибирь-2. Исследована возможность работы данной структуры на энергии  $1.3 \text{ ГэВ}$ . На энергии  $1.3 \text{ ГэВ}$  горизонтальный эмиттанс электронного пучка будет составлять  $4.6 \text{ нм}\cdot\text{рад}$ , а вертикальный около  $46 \text{ пм}\cdot\text{рад}$  при связи поперечный колебаний в  $1\%$ . А это означает, что вертикальный эмиттанс будет соответствовать эмиттансу фотонного пучка с длиной волны  $\lambda \approx 6 \text{ \AA}$ , согласно выражению  $\varepsilon_{\text{ph}} = \lambda/(4\pi)$ .

Проведено исследование области устойчивости (в бетатронном фазовом пространстве) и рассмотрены вопросы, связанные с коррекцией равновесной орбиты пучка для удержания размеров динамической апертуры на необходимом уровне. Показано, что размеры динамической апертуры «яркой» структуры (структуры с горизонтальным эмиттансом  $17 \text{ нм}\cdot\text{рад}$  на энергии  $2.5 \text{ ГэВ}$ ), с ошибками в выставке магнитных элементов, после коррекции замкнутой орбиты достаточны для работы накопителя без потери во времени жизни пучка (при глубоком вакууме на азимуте

ондулятора).

Для исследования нелинейного движения были разработаны программные модули, которые также были опробованы в работе по изучению динамики пучка в процессе инжекции. При этом численные расчеты показали хорошее согласие с экспериментом [12]. Полученные данные моделирования и аналитических расчетов используются в дальнейших главах данной работы.

**Во второй главе** подробно рассматривается ондулятор с периодом 7 мм для получения излучения электронов с энергией 1.3 ГэВ на длине волны 6 Å. С помощью трехмерного моделирования магнитных полей ондулятора, показано, что из рассматриваемых двух типов ондуляторов – ондулятор на постоянных магнитах и гибридный ондулятор, более высокое магнитное поле на орбите может обеспечить гибридный ондулятор. Далее, были получены оптимальные размеры металлических полюсов и магнитов при достижении максимальной амплитуды магнитного поля и при минимальном объеме магнитного поля между полюсами, что означает уменьшение механических усилий на сжатие (и, соответственно, удешевление механики). Для точного «зануления» первого и второго интеграла магнитного поля вдоль равновесной траектории электронов в ондуляторе была оптимизирована геометрическая форма концевых полюсов.

Используя подход, разработанный в работе [3], был проведен спектральный анализ магнитного поля ондулятора и определен параметр ондуляторности с учетом вклада третьей гармоники магнитного поля (вклад более высоких гармоник пренебрежимо мал). Основные параметры ондулятора приведены в Таблице 1. Энергетический спектр излучения ондулятора при изменении величины межполюсного зазора как параметра в

интервале 2-10 мм в приближении монохроматического нитевидного пучка (без учета эмиттансов) электронов с энергией 1.3 ГэВ и током 100 мА приведен на Рис.1.

Таблица 1. Основные параметры ондулятора.

Параметр	Значение
Период, $\lambda$	7 мм
Число периодов, N	270
Межполюсной зазор, g	3 мм
Амплитуда магнитного поля (первой и третьей гармоники)	$A_1 = 0.657$ Т $A_3 = -0.019$ Т
Параметр ондуляторности, K	0.43
Фундаментальная гармоника, $\epsilon_{ph}/\lambda_{ph}$	2100 эВ / 5.9 Å
Поток фотонов	$\sim 1.7 \cdot 10^{17}$ ph/s/mrad <sup>2</sup> (0.1% BW)

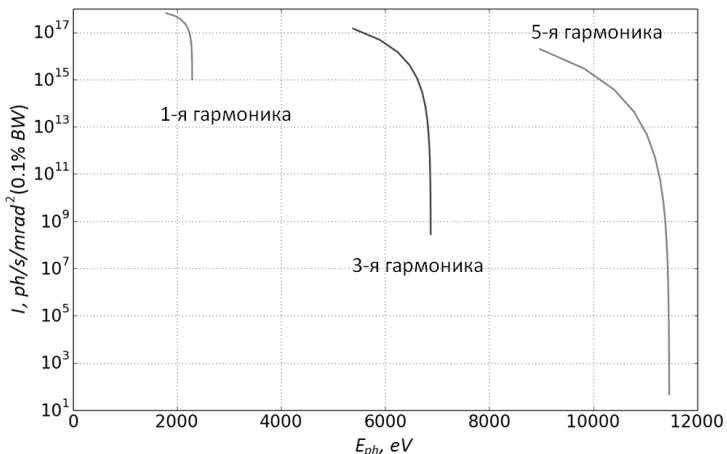


Рис. 1. Спектр излучения из ондулятора при изменении зазора ондулятора ( $g = 2 - 10$  мм). Энергия электронов 1.3 ГэВ, ток 100 мА.

Отметим, что спектры от первых трех нечетных гармоник не перекрывается с изменением зазора. Однако, при необходимости, перекрытие «пустых» спектральных диапазонов можно обеспечить изменением энергии электронов пучка.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния вставных устройств на электронный пучок (радиационные эффекты и динамика) в накопителе Сибирь-2. Получено аналитическое выражение для расчета вклада вставных устройств в пятый радиационный интеграл (при этом малым вкладом неперiodической входной и выходной части вставного устройства пренебрегали). Показано, что в структуре «17 нм·рад» накопителя Сибирь-2 из-за ненулевой дисперсии в прямолинейных промежутках сильнополевые вигглеры существенно увеличивают эмиттанс, и при необходимости получения минимально возможных эмиттансов они не должны включаться

Наиболее значимым результатом третьей главы является разработка аналитического метода для учета влияния интегральных характеристик многополюсных вставных устройств на динамику электронного пучка. Данный метод разработан с использованием гамильтоновского формализма и является симплектическим, что особенно важно для проведения многооборотного трекинга. Для проверки достоверности результатов трекинга и оценки влияния вставных устройств на динамическую апертуру был также разработан компьютерный модуль, где траектория электрона внутри вставного устройства рассчитывается с помощью метода Рунге-Кутты 4 порядка. На Рис.2 приведены две динамические апертуры, полученные с помощью этих двух методов для структуры 17 нм·рад с установленным ондулятором с периодом 7 мм. Сдвиг рабочей точки ондулятором компенсировался двумя семействами квадрупольных линз.

Отметим, что для компенсации линейного хроматизма использовались, по-прежнему, старые два семейства секступольных линз.

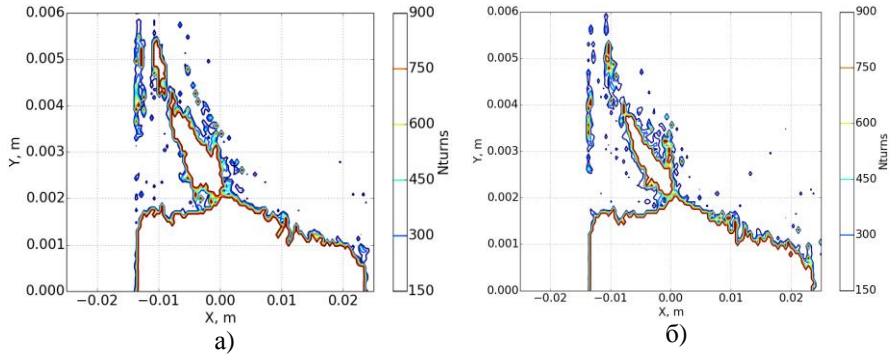


Рис.2. Динамическая апертура для структуры с эмиттансом  $17 \text{ nm} \cdot \text{рад}$  с установленным ондулятором  $\lambda_u = 7 \text{ мм}$ : а) аналитический метод; б) метод Рунге-Кутты.  $E = 1300 \text{ МэВ}$ ,  $N = 1000$  оборотов.

Как видно из Рисунка 2, оба метода дают практически одинаковые результаты. Стоит отметить, что расчет динамической апертуры с помощью аналитического метода осуществляется на два порядка быстрее расчета с использованием метода Рунге-Кутты. Другим важным выводом данного раздела является то, что ондулятор с периодом  $\lambda_u = 7 \text{ мм}$ , в отличие от рассматриваемых в данной работе вигглеров, радикально сокращает динамическую апертуру в вертикальном направлении до  $1.5 \text{ мм}$  (относительно медианной плоскости) для режима « $17 \text{ нм} \cdot \text{рад}$ ». То есть динамическая апертура примерно соответствует геометрической апертуре вакуумного ондулятора, которая ограничивается минимальным межполюсным зазором ондулятора ( $g = 3 \text{ мм}$ ). Такие апертурные ограничения являются характерными для рассматриваемых в настоящее время оптических структур источников СИ 4-ого поколения. В тоже время, из-за малого вертикального размера электронного пучка ( $\sigma_y = 16.6 \text{ мкм}$ ),



динамическая апертура не будет ограничивать время жизни. Таким образом, показана возможность работы яркой структуры на энергии 1.3 ГэВ с установленным ондулятором.

**В четвертой главе** кратко описаны методы расчета спонтанного излучения из ондуляторов в программе Geneva, разработанной совместно с Н. В. Смоляковым в коллаборации с European XFEL (Гамбург, Германия), и выбранные алгоритмы учета эмиттанса и энергетического разброса электронного пучка. Приводятся результаты численного расчета спонтанного излучения из ондуляторов с учетом и без учета параметров электронного пучка.

Расчеты показали, что эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка существенно влияет на пространственное распределение излучения фундаментальной гармоники, приводя к уширению распределения излучения по углам в горизонтальном направлении. При этом, в вертикальном направлении такого эффекта нет, что свидетельствует о том, что в вертикальной плоскости фазовые размеры источника излучения сравнимы или меньше дифракционных размеров фотонного пучка. То есть, в вертикальном направлении достигнут дифракционный предел, Рис.3.

Интенсивность излучения ондулятора на фундаментальной гармонике с учетом параметров электронного пучка составляет  $1.7 \cdot 10^{17}$  фотонов/сек/мрад<sup>2</sup>/(0.1%BW) (Рис.3) и по данному параметру накопитель Сибирь-2 может приблизиться к ведущим источникам СИ третьего поколения.

Достижение дифракционного предела в вертикальной плоскости позволит в значительной степени расширить экспериментальные возможности комплекса. Это позволит получать области излучения с

пространственной когерентностью с размерами порядка 280 мкм (в вертикальной плоскости, при удалении образца от ондулятора на 50 м), что может служить основой для проведения, по крайней мере, методических работ в области рентгеновской голографии

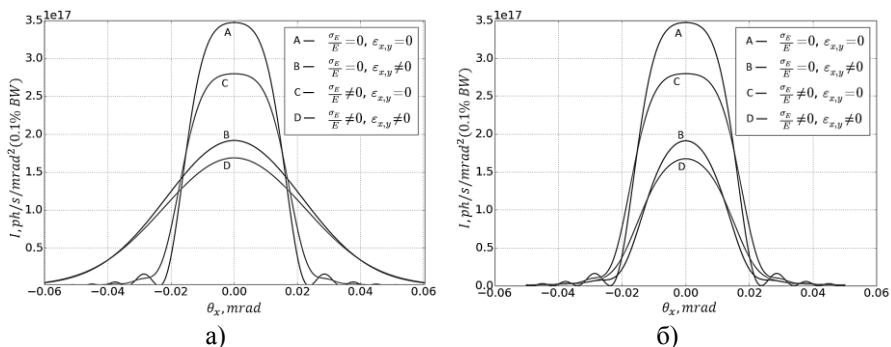


Рис.3. Влияние электронного пучка на параметры пространственного распределения фундаментальной гармоники излучения  $\varepsilon_{ph} = 2100$  эВ,  $E=1.3$  ГэВ: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости.

**В Заключение** сформулированы основные результаты работы.

**В Приложениях** в качестве справочного материала приведен вывод Гамильтониана движущейся релятивистской заряженной частицы в электромагнитных полях в криволинейной системе координат, дана краткая справка о симплектической форме гамильтоновских уравнений движения. Также приведены выражения для учета увеличения эмиттанса и энергетического разброса из-за Тушек-эффекта с помощью высокоэнергетических приближений Бане и приведен вывод дифференциальных уравнений движения в фиксированной системе координат.

### **Основные выводы и результаты работы.**

1. На базе накопителя Сибирь-2 показана возможность перехода на новую яркую магнито-оптическую структуру с горизонтальным эмиттансом 17 нм·рад на энергии 2.5 ГэВ, что позволит повысить спектральную яркость фотонных пучков из существующих каналов вывода СИ и откроет возможность для получения дифракционно-ограниченного ондуляторного излучения в рентгеновском диапазоне.
2. Определены основные параметры ондулятора с помощью трехмерного моделирования магнитных полей для получения квазикогерентного излучения в рентгеновском диапазоне спектра с энергией фотонов 2-10 кэВ. Для удовлетворения условия на получение рентгеновского излучения (6 ангстрем) на энергии электронного пучка 1.3 ГэВ, ондулятор должен иметь большую амплитуду магнитного поля (порядка 0.7 Т) при малом периоде (7 мм). Поэтому основной задачей являлась, максимизация амплитуды магнитного поля (первой гармоники), в том числе для получения приемлемого межполюсного зазора.
3. Выполнено исследование влияния вставных устройств на область устойчивости пучка в накопителе Сибирь-2. Разработана новая компьютерная программа для моделирования нелинейной динамики и проведено численное моделирование движения частиц с учетом влияния вставных устройств для разных режимов работы накопителя; получены аналитические выражения, используемые для описания интегральных характеристик многополюсного вставного устройства при проведении многооборотного трекинга; получено аналитическое выражение для расчета вклада вставных

устройств в пятый радиационный интеграл (при этом вкладом непериодической входной и выходной части вставного устройства пренебрегали).

4. Создана компьютерная программа GENERA для расчета синхротронного излучения релятивистских электронов в магнитных полях сложной конфигурации (в соавторстве). Особенностью программы является расчет излучения из цепочек ондуляторов разделенных секциями с различными магнитными элементами такими как: phase-shifter, корректора, квадрупольные линзы и прямолинейные промежутки.
5. Показана возможность получения дифракционно - ограниченного источника на накопителе поколения 2+ «Сибирь-2».

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации.**

*Публикации в рецензируемых журналах, включённых в перечень российских рецензируемых научных журналов ВАК РФ:*

- 1 Korchuganov, V.N. Special-purpose radiation sources based on the siberia-2 storage ring / V.N. Korchuganov, N.Yu. Svechnikov, N.V. Smolyakov, **S.I. Tomin** // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2010, Vol. 4, No. 6, P. 891–897. (**Web of Science** и **Scopus**)
- 2 Smolyakov, N. Electron motion in a 3-d undulator magnetic field / N. Smolyakov, **S. Tomin**, G. Geloni // Journal of physics / Conference Series, 2013, 425(3):032023, doi:10.1088/1742-6596/425/3/032023. (**Scopus**)
- 3 Tomin, S. Analysis of magnetic properties of the European XFEL undulator prototype / **S. Tomin**, N. Smolyakov, G. Geloni, J. Pflueger, Y. Li // Journal of physics / Conference Series, 2013, 425(3):032003, doi:10.1088/1742-6596/425/3/032023. (**Scopus**)

- 4 Agapov, I. OCELOT: A software framework for synchrotron light source and FEL studies / I. Agapov, G. Geloni, **S. Tomin**, I. Zagorodnov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, Vol. 768, P. 151-156. (**Web of Science** и **Scopus**)

*Труды конференций:*

5. Томин, С.И. Дифракционно-ограниченный источник рентгеновского излучения в Курчатовском Центре Синхротронного Излучения / В.Н. Корчуганов, **С.И. Томин** // Сборник трудов научной сессии МИФИ-2008. Том 5, С. 31-32.
6. Tomin, S. Possibility to Reach the Diffraction Limited X-Ray Source in Kurchatov Center of Synchrotron Radiation / A. Anoshin, E. Fomin, V. Korchuganov, **S. Tomin**// Proc. of RuPAC, 2008, P.145-147. (**Scopus**)
7. Tomin, S.I. Radiation Sources at Siberia-2 Storage Ring / V.N. Korchuganov, N.V. Smolyakov, N.Yu. Svechnikov, **S.I. Tomin** // Proc. of RuPAC, 2010, P. 141- 143. (**Scopus**)
8. Agapov, I. Spontaneous Radiation Calculations for the European XFEL / I. Agapov, G. Geloni, O. Chubar, M. Scheer, M. Titze, **S.Tomin**, N. Smolyakov // Proc. of IPAC, 2013, P. 1176 – 1178. (**Scopus**)
9. Smolyakov, N. Electron trajectories in a three-dimensional undulator magnetic field / N. Smolyakov, **S. Tomin**, G. Geloni // Proc. of IPAC, 2013, P. 2223 – 2225. (**Scopus**)
10. Tomin, S. Insertion Devices Influence on the Beam Dynamics at Siberia-2 Storage Ring / **S. Tomin**, V. Korchuganov // Proc. of IPAC, 2013, P. 193 – 195. (**Scopus**)
11. Tomin, S. On-line Beam Control with Ocelot at Siberia-2 / **S. Tomin**, A. Valentinov // Proc. of IPAC, 2014, P. 289 – 291.
12. Tomin, S. New Injection System of Siberia-2 Light Source / **S. Tomin**, V. Korchuganov // Proc. of IPAC, 2014, P. 1965 – 1967.