

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Баранов Григорий Николаевич

**Многополюсный гибридный вивглер для  
генерации жёсткого интенсивного  
синхротронного излучения на накопителе  
ВЭПП-4М**

1.3.18. – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук  
Левичев Евгений Борисович

Новосибирск – 2021

# Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	4
<b>Глава 1. Ускорительный комплекс ВЭПП-4</b> . . . . .	11
1.1. Магнитная система ВЭПП-4М . . . . .	13
1.2. Система диагностики ВЭПП-4М . . . . .	18
<b>Глава 2. Конструкция и расчёты гибридного вигглера</b> . . . . .	21
2.1. Конструкция гибридного вигглера . . . . .	24
2.2. Расчёт магнитного поля вигглера . . . . .	29
2.2.1. Результаты магнитных расчётов . . . . .	33
<b>Глава 3. Магнитные измерения вигглера</b> . . . . .	42
3.1. Подбор параметров постоянных магнитов . . . . .	43
3.2. Конструктив и принцип работы измерительной системы . . . . .	44
3.2.1. Электроника . . . . .	45
3.2.2. Каретка с датчиками Холла . . . . .	45
3.2.3. Датчик ЯМР . . . . .	47
3.2.4. Система механического перемещения и позиционирования каретки . . . . .	47
3.2.5. Источник питания . . . . .	50
3.3. Процедура измерений . . . . .	50
3.4. Результаты измерений . . . . .	52
3.4.1. Оптимизация токов коррекции . . . . .	55
<b>Глава 4. Оценка влияния гибридного вигглера на пучок ВЭПП-4М</b> . . . . .	57
4.1. Расчётная модель поля гибридного вигглера . . . . .	58
4.2. Модель вигглера для расчётов линейной оптики . . . . .	64

4.2.1.	Возмущение оптических функций . . . . .	66
4.2.2.	Влияние гибридного вигглера на радиационные параметры ВЭПП-4М . . . . .	68
<b>Глава 5. Экспериментальное изучение влияния гибридного вигглера на пучок электронов в ВЭПП-4М . . . . .</b>		
		70
5.1.	Искажение замкнутой орбиты полем гибридного вигглера . . . . .	71
5.2.	Сдвиг частоты . . . . .	74
5.3.	Измерение зависимости частоты бетатронных колебаний от амплитуды . . . . .	78
5.4.	Влияние гибридного вигглера на разброс энергий в пучке . . . . .	86
5.5.	Влияние гибридного вигглера на эмиттанс пучка в ВЭПП-4М . . . . .	89
<b>Глава 6. Экспериментальные возможности гибридного вигглера . . . . .</b>		
		92
6.1.	Расчёт параметров излучения гибридного вигглера . . . . .	92
6.2.	Применение излучения гибридного вигглера для экспериментов на ВЭПП-4М . . . . .	97
6.2.1.	Повышение эффективности радиационных методов терапии рака . . . . .	98
6.2.2.	Рентгенофлуоресцентный элементный анализ . . . . .	99
6.2.3.	Взаимодействие плазмы со стенками термоядерного реактора . . . . .	102
<b>Заключение . . . . .</b>		106
<b>Список литературы . . . . .</b>		109
<b>Приложение А. Вывод формулы для вигглера . . . . .</b>		116
<b>Приложение Б. Радиационные интегралы . . . . .</b>		124

# Введение

## **Актуальность темы исследования.**

Синхротронное излучение (СИ) испускается ультрарелятивистскими заряженными частицами, поворачивающимися в поперечном к направлению движения магнитном поле. СИ обладает рядом свойств, таких как узкая направленность, высокие поток и яркость, поляризация, когерентность, возможность перестройки длины волны, возможность изменения размера источника и т.д., которые делают его мощным и востребованным исследовательским инструментом [1].

Синхротронное излучение на шкале электромагнитных волн занимает широкий спектральный диапазон, перекрывая инфракрасную, видимую, ультрафиолетовую и рентгеновскую области. За исключением спектрального интервала, занимаемого лазерами, его интенсивность в 10–100 тысяч раз больше, чем у традиционных источников света.

Источниками синхротронного излучения для исследовательских целей служат ускорители и накопители электронов (позитронов) с характерной энергией пучка  $\sim 0.92\text{--}6$  ГэВ [1]. Интенсивный пучок частиц, отклоняясь в магнитах, формирующих замкнутую орбиту, или отклоняясь в специальных периодических магнитных структурах (вигглерах, шифтерах, «змейках», ондуляторах) излучает в направлении вектора скорости, и это излучение используется экспериментаторами.

В настоящее время в мире имеется около пятидесяти ускорительных комплексов — источников СИ [1], причём в технологически развитых регионах мира (Япония, США, Европа, Китай) их несколько. Источники синхротронного излучения это наиболее распространённый класс ускорителей электронов релятивистских энергий.

Источники СИ принято делить на поколения в зависимости от величины эмиттанса электронного пучка. К первому поколению относятся установки

(синхротроны, коллайдеры), доставшиеся пользователям «в наследство» от физики высоких энергий, и обладающие большим эмиттансом. Второе поколение — специализированные накопители с магнитной структурой, настроенной на получение малого эмиттанса. Третье поколение — глубоко оптимизированные ускорители с малым эмиттансом, широко применяющие излучение специальных генераторов — вигглеров и ондуляторов. Источники СИ четвёртого, самого современного, поколения, предполагают использовать пучок электронов с ультрамалым эмиттансом порядка 100 пм и обладают высочайшей яркостью. В Новосибирске в настоящее время создаётся источник СИ четвёртого поколения СКИФ с энергией 3 ГэВ и натуральным горизонтальным эмиттансом 73 пм [2].

Несмотря на распространённость современных источников СИ третьего и четвёртого поколений, более «возрастные» установки все ещё востребованы. Так, например, работают источники СИ второго поколения ANKA [3] и DELTA [4] в Германии, источники СИ первого поколения DAΦNE [5] в Италии и BEPC II [6] в Китае и т.д. В России имеются источник СИ второго поколения КИСИ-Курчатов [7] (НИЦ «Курчатовский Институт», Москва) и источники СИ первого поколения ВЭПП-3 и ВЭПП-4М (ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск).

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-4 является многофункциональной установкой, где проводятся исследования на встречных электрон-позитронных пучках, работы с применением синхротронного излучения, эксперименты по ядерной физике с внутренней газовой мишенью и т.д. [8]. Несмотря на довольно обширный круг экспериментов в различных областях, эксперименты с СИ занимают значительную часть пучкового времени (до 20%). В ИЯФ СО РАН имеется также большой опыт по созданию специализированных излучателей, напомним, что первая многополосная сверхпроводящая змейка была сделана в ИЯФ СО РАН и применена на ВЭПП-3 [9].

Поскольку яркость ВЭПП-4М невелика, здесь возможны только неко-

торые узкоспециализированные эксперименты с синхротронным излучением. Однако для ряда методик этот старый источник СИ позволяет проводить исследования мирового класса ввиду таких свойств как высокая энергия электронного пучка (до 5–6 ГэВ), возможность изменения энергии в широком диапазоне (что невозможно в современных источниках), относительно низкая частота ускоряющей системы 180 МГц, позволяющая иметь в одном сгустке достаточно большой ток порядка 20 мА (что соответствует  $1.5 \cdot 10^{11}$  частиц), что важно для некоторых экспериментов с временным разрешением [10].

Чтобы расширить экспериментальные возможности источника СИ по сравнению с излучением из поворотных магнитов, используют уже упоминавшиеся периодические магнитные структуры — змейки или вигглеры (от англ. wiggle — извиваться, вилять) [11]. Вигглер ставится в прямолинейном промежутке и состоит из набора магнитов чередующейся полярности так, что пучок электронов движется по периодической траектории. При этом (а) поскольку поток квантов из разных полюсов суммируется, интенсивность излучения возрастает, и (б) используя сильные магниты можно увеличивать энергию испускаемых фотонов, продлевая, тем самым, спектр СИ в коротковолновую область, поскольку характеристическая длина волны СИ зависит от величины магнитного поля как:

$$\lambda_c[\text{Å}] = \frac{18.64}{BE^2} \quad (1)$$

где  $B$  — поворотное магнитное поле в [Тл], которое связано с энергией частицы и радиусом равновесной орбиты как  $3.34E/R$ ; энергия электрона  $E$  выражена в [ГэВ], а радиус — в [м].

Магнитное поле вигглера меняет параметры пучка в накопителе, увеличивая потерю энергии, внося дополнительную фокусировку, изменяя эмиттанс, энергетический разброс и т.д. Поэтому задача разработки такого генератора излучения касается не только получения требуемых для пользователей

параметров, но и исследования и минимизации влияния устройства на электронный пучок.

ВЭПП-4М создавался, как установка со встречными электрон-позитронными пучками для исследований по физике высоких энергий в диапазоне от  $J/\psi$ -мезона до  $Y$ -мезонов (энергия пучков от 1.5 ГэВ до 5–6 ГэВ), поэтому магнитная структура накопителя не оптимизирована для получения малого эмиттанса пучка и постановки специальных генераторов излучения. В качестве источника излучения на ВЭПП-4М до 2017 года использовался электромагнитный вигглер, размещение которого на кольце определялось наличием свободного пространства (при весьма плотной «упаковке» ускорительного оборудования), минимизацией возмущения характеристик пучка, возможностью вывода каналов транспортировки излучения за пределы тоннеля ускорителя и строительства достаточно просторного холла для размещения нескольких экспериментальных станций. Параметры этого «старого» вигглера приведены в таблице 1.

Для расширения экспериментальных возможностей, в основном для существенного увеличения потока СИ в области жёстких гамма-квантов  $\sim 50$ – $100$  кэВ, в 2014 г. было принято решение заменить старую змейку на новую с увеличенным числом полюсов и большей индукцией поля на орбите пучка. Учитывая, что устройство должно было вписаться в габариты 150 см по длине и  $50 \times 50$  см<sup>2</sup> в поперечном сечении, это оказалось достаточно сложной задачей. В результате проведённой работы был разработан, изготовлен и поставлен на ВЭПП-4М уникальный гибридный вигглер, использующий в своей конструкции как электро-, так и постоянные магниты. Использование этого вигглера позволило увеличить магнитное поле в зазоре, число полюсов и в результате увеличить поток СИ в районе энергии фотонов  $\sim 100$  кэВ приблизительно в 30–40 раз. Параметры нового вигглера приведены в таблице 1. Стоит отметить, что ранее предлагались ондуляторы, где использовались и постоянные магниты, и токовые катушки для ЛСЭ [12–14], в нашем случае

впервые гибридный вигглер для получения жёсткого спектра рентгеновского излучения ставится на накопитель.

Таблица 1. Параметры старого и нового вигглеров

	Старый вигглер	Новый вигглер
Максимальное поле	1.2 Тл	1.905 Тл
Период	40 см	30 см
Основные полюса	5	7
Всего полюсов	7	9
Зазор	40 мм	30 мм
Параметр ондуляторности К	44	54

### **Цели и задачи диссертационной работы:**

- расчёт, проектирование и производство гибридного вигглера;
- измерение и оптимизация магнитного поля вигглера для уменьшения влияния на пучок электронов;
- оценка и моделирование динамики пучка в присутствии вигглера;
- экспериментальное исследование влияния вигглера на оптику и динамику пучка в кольце ВЭПП-4М;
- оценка пользовательских параметров установки с новым вигглером.

### **Научная новизна.**

Впервые установлен на накопитель электронов гибридный вигглер, в котором магнитное поле в создаётся комбинацией токовых обмоток и постоянных магнитов. Постоянные магниты, перераспределяя поток индукции магнитного поля, создаваемым токовыми обмотками, уменьшают рассеянные поля и, тем самым, способствуют увеличению амплитуды поля на орбите пучка.



### **Теоретическая и практическая значимость.**

Проведён расчёт гибридного вигглера, экспериментально измерены его характеристики. Теоретически и экспериментально рассмотрены различные аспекты влияния гибридного вигглера на пучок в накопителе ВЭПП-4М, включая изучение нелинейной динамики частиц в сложном магнитном поле (зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды, фазовые траектории и т.п.). Полученный опыт может быть использован при создании гибридных вигглеров и других магнитных систем для различных источников СИ.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- Проведен двухмерный и трехмерный расчёты и оптимизация магнитного поля гибридной многополюсного вигглера. Проведено обоснование основных элементов конструкции устройства.
- Подготовлен стенд магнитных измерений. Измерены магнитные поля гибридного вигглера. Выполнена обработка результатов измерения магнитных полей. Подобраны токи источников коррекции вигглера, минимизирующие влияние устройства на пучок в ВЭПП-4М во всем диапазоне поля вигглера.
- Проведены теоретические оценки влияния гибридного вигглера на пучок электронов в накопителе ВЭПП-4М.
- Проведено экспериментальное исследование влияния гибридного вигглера на движение частиц в ВЭПП-4М.
- Проведен расчёт спектра синхротронного излучения, а так же мощности генерируемой вигглером. Преимущество нового устройства для генерации жесткого рентгеновского излучения продемонстрировано на примере нескольких экспериментов с синхротронным излучением.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Magnet technology 24 (MT-24), Южная Корея, Сеул, 2015 г.
- Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application, Россия, Новосибирск, 2016 г.
- Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application, Россия, Новосибирск, 2018 г.

**Публикации.** Работа выполнена в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН в 2016-2020 годах. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из них 5 статьи в рецензируемых журналах [10; 15–18], 2 статьи в сборниках трудов конференций [19; 20].

### **Личный вклад автора.**

Автор принимал активное участие на всех этапах расчёта и создания гибридного вивглера, ее постановки на ВЭПП-4М и проведения экспериментальных исследований. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в проделанную работу. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

## Глава 1

## Ускорительный комплекс ВЭПП-4

Ускорительный комплекс ВЭПП-4 (рисунок 1.1) позволяет проводить исследования по тематикам физики высоких энергий, ядерной физики, синхротронного излучения, физики и техники ускорителей и т.д. Комплекс включает в себя накопитель электронов и позитронов ВЭПП-3 на энергию 2 ГэВ, который также служит бустером для  $e^+e^-$  коллайдера ВЭПП-4М с максимальной энергией пучков до 6 ГэВ [21]. Основные параметры ВЭПП-4М приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Основные параметры ВЭПП-4М на энергии 1.9 ГэВ

Параметр	Значение
Периметер $\Pi$ , м	366.075
Энергия $E$ , ГэВ	1.9
Бетатронная частота $\nu_x / \nu_y$	8.54/7.58
Натуральный хроматизм $\xi_x / \xi_y$	-14.5/-20.3
Время затухания колебаний $\tau_y/\tau_x/\tau_s$ , мс	139/35/70
Горизонтальный эмиттанс $\varepsilon_x$ , нм·рад	24.6
Энергетический разброс $\frac{\sigma_E}{E}$	$3.22 \cdot 10^{-4}$
Продольный размер $\sigma_L$ , см	6
Потеря энергии за оборот $U_0$ , кэВ	36

Достоинством ВЭПП-4М является возможность изменения энергии сталкивающихся пучков в широком диапазоне от 1 ГэВ до 6 ГэВ [22], что, вместе с реализованной системой регистрации рассеянных электронов [23] и методиками прецизионного измерения энергии пучков (с помощью резонансной деполяризации [24] и обратного комптоновского рассеяния [25]) позволяет,

несмотря на скромную светимость, проводить уникальные эксперименты по измерению масс частиц, по исследованию сечения рождения адронов в большом энергетическом диапазоне, по двухфотонной физике и т.д.

Другим важным направлением научной программы ВЭПП-4 является генерация и использование синхротронного излучения (СИ) как на ВЭПП-3, так и на ВЭПП-4М (энергия пучка в экспериментах с СИ до 4.5 ГэВ). Здесь преимуществом ВЭПП-4М является гибкость заполнения орбиты инжектируемыми сгустками. По требованию экспериментаторов можно формировать последовательность из малого числа сгустков (в пределе — один сгусток) с достаточно высокой интенсивностью (около 20 мА/сгусток), что важно для динамических исследований с временным разрешением [16]. Кроме того, высокая энергия пучка позволяет эффективно использовать жёсткий край спектра синхротронного излучения, что является привлекательным для исследователей. Именно желание экспериментаторов увеличить интенсивность жёсткого рентгеновского излучения из ВЭПП-4М (с энергией квантов до 100 кэВ) и привело к разработке и изготовлению нового источника излучения — гибридного многополюсного магнитному вивглеру.

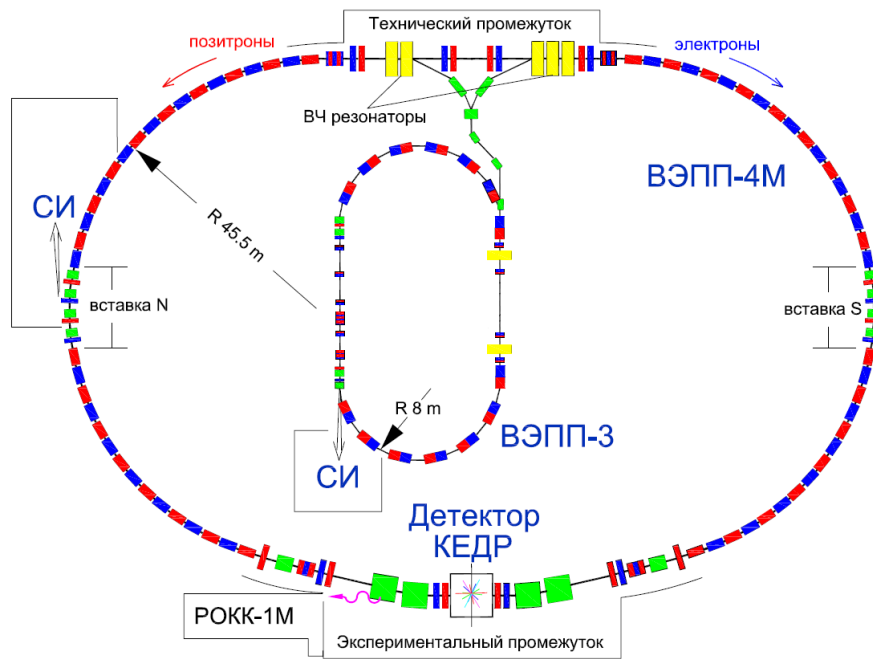


Рис. 1.1. Ускорительный комплекс ВЭПП-4М.

Оптические функции ВЭПП-4М приведены на рисунке 1.2; место встречи находится в центре графика.

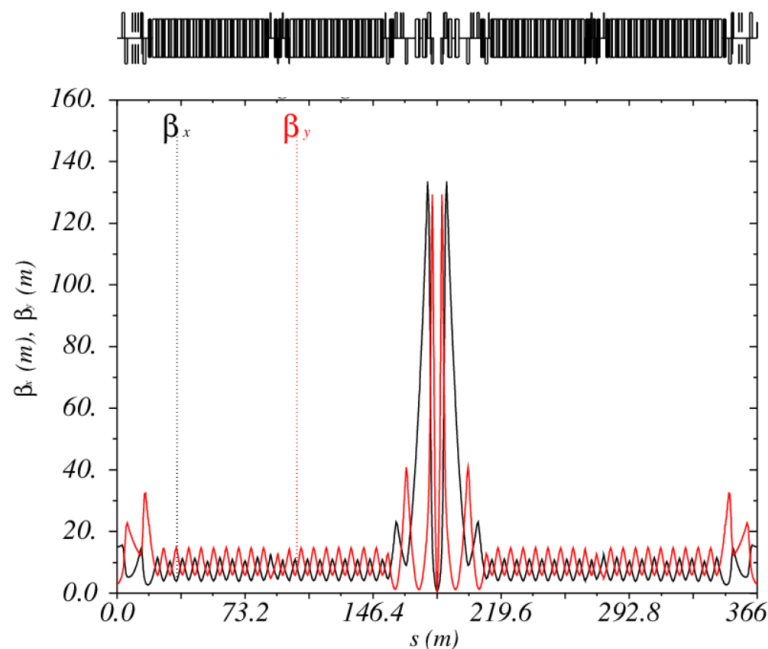


Рис. 1.2. Оптические функции ВЭПП-4М.

В этой главе мы приводим базовые сведения о ВЭПП-4М с более детальным описанием тех систем, которые использовались для экспериментального изучения влияния на пучок новой гибридной змейки (возмущения оптики, изменение энергетического разброса, нелинейных эффектов и т.д.).

## 1.1. Магнитная система ВЭПП-4М

ВЭПП-4М имеет форму рейстрека и состоит из двух зеркально симметричных полуколец, разделённых двумя длинными промежутками — экспериментальным (где расположен универсальный магнитный детектор КЕДР [26]) и техническим (где размещаются ускоряющие резонаторы и система инжекции). Маркировка магнитных элементов полуколец привязана к сторонам света; латинские буквы  $N$  и  $S$  используются для обозначения элементов в северном и южном полукольцах соответственно.

Каждое полукольцо состоит из семнадцати FODO-ячеек со вставками между 9 и 10 ячейкой как показано на рис 1.3.

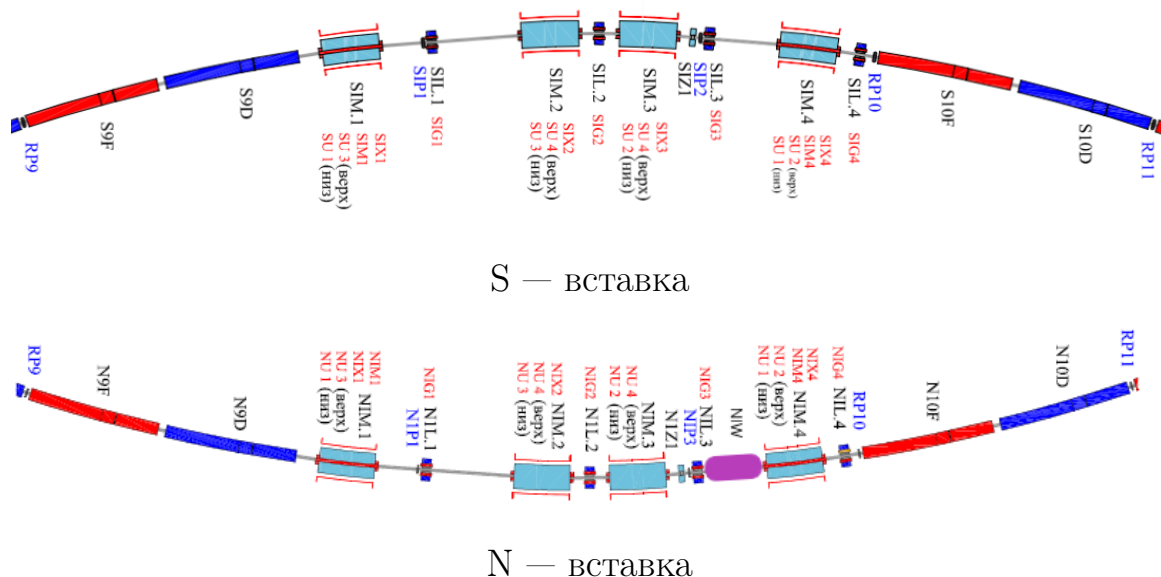


Рис. 1.3. Северная и южная вставка с 9 и 10 ячейками периодичности FODO. Новый вигглер в северной вставке N отмечен фиолетовым цветом.

Во вставках размещаются электростатические пластины, разводящие электронный и позитронный пучки при работе коллайдера в режиме 2x2 сгустка. Именно здесь, в северной вставке в промежутке длиной 1.2 м размещается вигглер — генератор синхротронного излучения. Рисунок 1.4 показывает тоннель ВЭПП-4М вблизи вигглера. Необычный способ размещения ускорителя — подвешенный под потолком — позволяет сэкономить на сечении тоннеля.



Рис. 1.4. Тоннель ВЭПП-4М вблизи вигглера.

Магниты FODO-ячеек, формирующих полукольца, представляют собой сложные магнитные блоки, совмещающие в одном ярме дипольную и квадрупольную (фокусирующую и дефокусирующую поочередно) компоненты поля, вертикальный и горизонтальный корректоры орбиты, коррекции градиента и связи бетатронных колебаний. Это делает магнитную структуру полукольца сложной, но очень компактной. Интересно, что такой же подход — многофункциональных магнитов с единым ярмом — выбрали создатели современного источника синхротронного излучения MAX IV [27]. На рисунке 1.3 красным отмечен фокусирующий блок  $F$ , синим — дефокусирующий блок  $D$ .

Экспериментальный промежуток ВЭПП-4М симметричен относительно центра детектора КЕДР (рисунк 1.5), оптимизирован под эксперименты на встречных пучках и содержит набор сильных квадрупольных линз, обеспечивающих требуемую фокусировку пучков в месте встречи. Для локальной коррекции большого хроматизма промежутка встречи здесь размещены секстипольные линзы. Здесь же имеются октупольные линзы (на азимутах с большими соответствующими бетатронными функциями), которые позволяют управлять зависимостью бетатронной частоты от амплитуды. Важными элементами ВЭПП-4М, размещёнными в экспериментального промежутка (слева и справа от точки встречи), являются два трёхполюсных вигглера EZMN и EZMS, управляющие энергетическим разбросом и поперечным размером пучка.

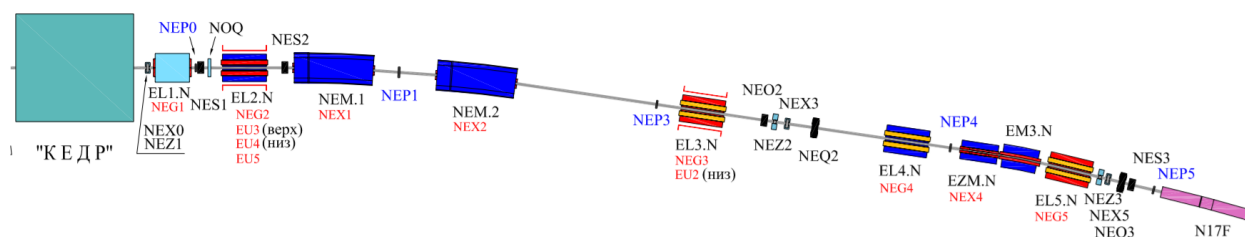


Рис. 1.5. Экспериментальный промежуток; слева — детектор КЕДР, его середина является точкой зеркальной симметрии.

Противоположный экспериментальному технический промежуток (ри-

сунок 1.6) предназначен для инъекции пучков и включает в себя набор квадрупольных линз, пластины электростатического разведения электронного и позитронного пучков, ускоряющие резонаторы, позитронный и электронный инфлекторы, элементы коррекции и диагностики пучков, а также пятиполюсные градиентные змейки STW и NTW (вигглеры Робинсона), служат для перераспределения декрементов затухания.

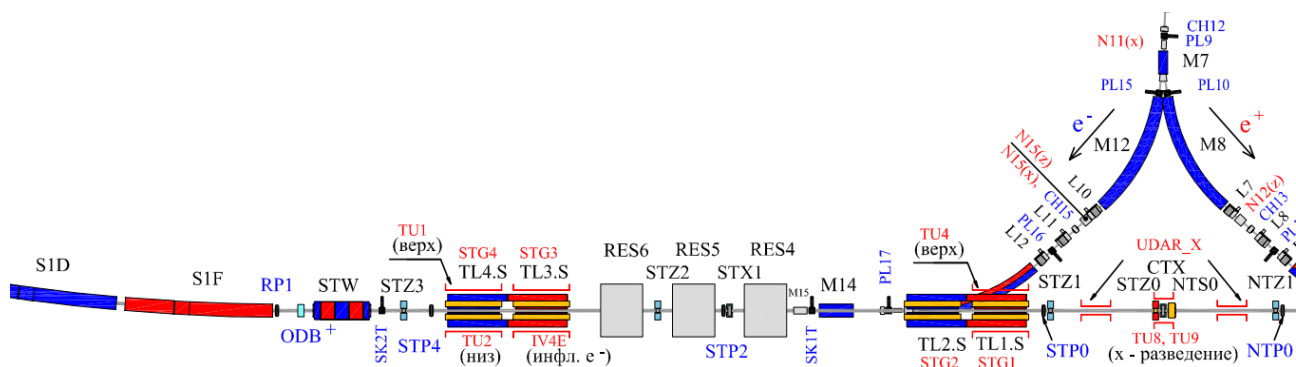


Рис. 1.6. Технический промежуток; элемент СТХ- точка зеркальной симметрии.

Инжекция в ВЭПП-4М происходит в вертикальной плоскости. Магниты M10, M11 выводят инжектированный пучок в медианную плоскость накопителя, а инфлектор IV4P (расположен симметрично IVE4 на рисунке 1.6) помещает его на равновесную орбиту (рисунок 1.7). Для того чтобы орбита впускаемого пучка совпадала с равновесной орбитой в ВЭПП-4М, магнитные корректоры компенсируют электростатическое разведение электронного и позитронного пучков.

Ускоряющие резонаторы кольца ВЭПП-4М расположены в техническом промежутке. Ускоряющая высокочастотная (ВЧ) система работает на 222 гармонике частоты обращения [28]. Параметры ускоряющей системы ВЭПП-4М приведены в таблице 1.2 .



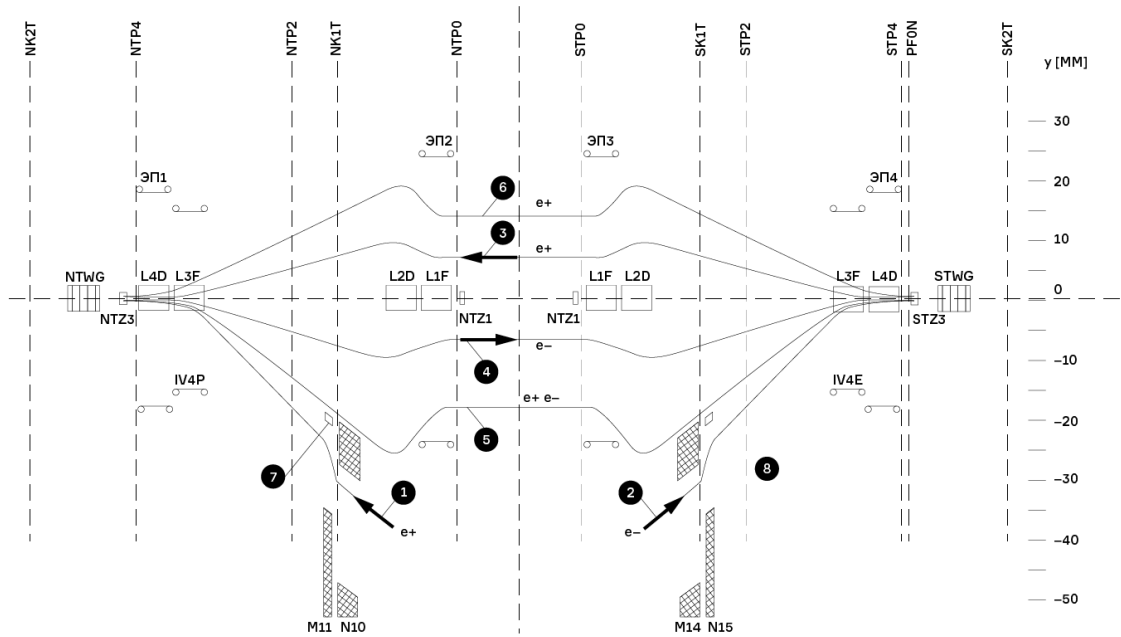


Рис. 1.7. Схема инъекции пучков в ВЭПП-4М: 1 — инъекция  $e^+$ ; 2 — инъекция  $e^-$ ; 3, 4 — траектории циркулирующих пучков при включённом электростатическом разведении; 5 — траектория пучка  $e^-$  при инъекции  $e^+$ ; 6 — траектория пучка  $e^+$  при инъекции  $e^-$ .

Таблица 1.2. Параметры ускоряющей ВЧ системы ВЭПП-4М

Частота ВЧ системы	181.1 МГц
Частота обращения пучка	818.924 кГц
Количество резонаторов	6
Шунтовое сопротивление резонатора	6.4 МОм
Макс. напряжение на одном резонаторе	1.0 МВ
Макс. мощность, рассеиваемая в одном резонаторе	78 кВт
Номинальная мощность ВЧ генератора	1000 кВт

## 1.2. Система диагностики ВЭПП-4М

При экспериментальном исследовании влияния гибридной змейки на параметры пучка в ВЭПП-4М активно использовались электростатические датчики положения центра тяжести пучка (пикап-электроды), чей внешний вид показан на рисунке 1.8. Каждый датчик имеет четыре дисковых электрода, смонтированных заподлицо с поверхностью вакуумной камеры для уменьшения импеданса. Во избежание наводок аналоговая электроника измерения (пикап-станция) расположена вблизи датчика; каждому электроду соответствует свой канал измерения, заканчивающийся схемой выборки-хранения, выходной сигнал которой пропорционален пиковому напряжению импульса, наведённого пучком.

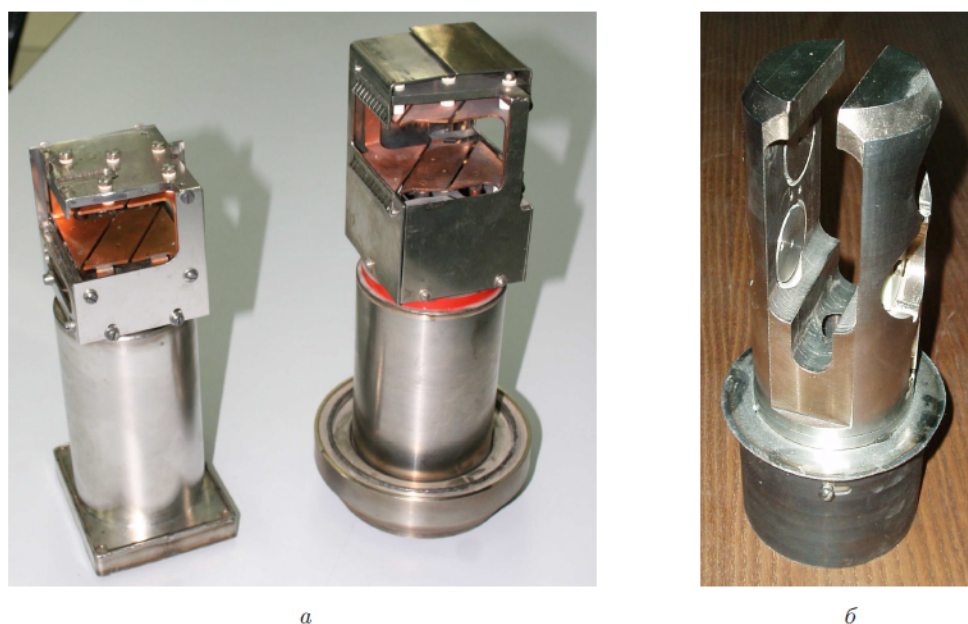


Рис. 1.8. Электростатические датчики положения пучка, установленные в полукольцах (а) и промежутках (б) накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

Система измерения положения пучка может работать либо в режиме накопления сигнала (использующей интегрирующий аналого-цифровой преобразователь), либо в режиме поворотных измерений [29]. В первом случае с высокой точностью (лучше  $10 \mu\text{м}$ ) измеряется замкнутая орбита пучка. Во втором случае можно исследовать эволюцию центроида пучка (как квази-

частицы) на протяжении времени, пока не произойдёт «раскогеренчивание» пучка из-за нелинейной зависимости частоты колебаний индивидуальных частиц от амплитуды. Именно этот режим использовался для измерения нелинейного влияния гибридного вигглера на динамику пучка. Разрешение пикап-станций в однооборотном режиме составляет  $\sim 30 \mu\text{м}$  при токе пучка около 1 мА.

Другая важная система измерения параметров пучка, которая применялась для экспериментального изучения влияния гибридного вигглера, использует видимую часть спектра синхротронного излучения одного из поворотных магнитов ВЭПП-4М. Схема этой оптической диагностики показана на рисунке 1.9. СИ, отражённое охлаждаемым металлическим зеркалом, через кварцевое окно выводится из вакуумной камеры, разветвляется полупрозрачными зеркалами на несколько каналов и регистрируется набором датчиков, расположенных на оптической скамье. Геометрические преобразования изображения пучка осуществляются с помощью объективов, регулировка интенсивности с помощью дистанционно управляемых светофильтров. Для калибровки оптических приборов в системе установлены источники света.

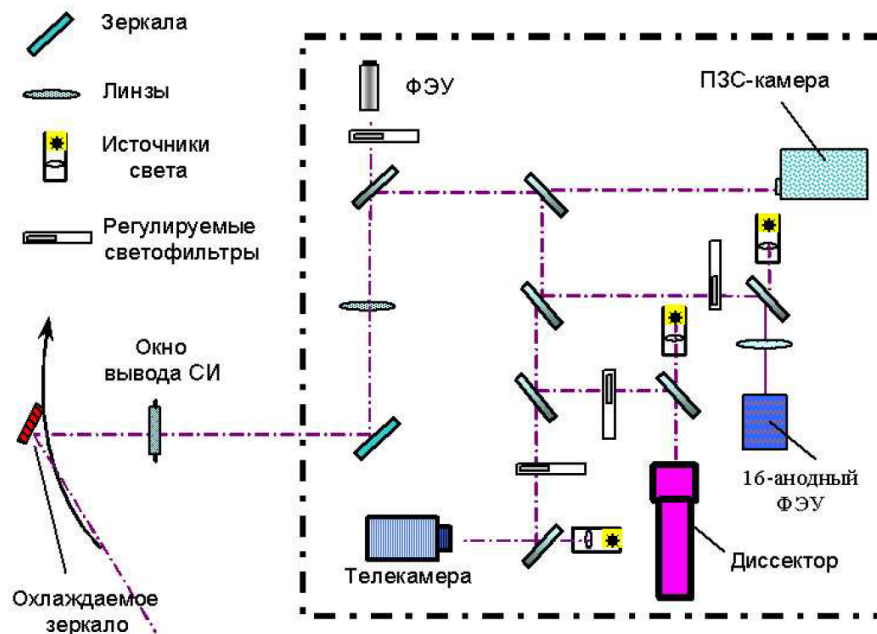


Рис. 1.9. Схема оптической диагностики ВЭПП-4М.

Визуальное наблюдение пучка осуществляется с помощью телекамеры. Для пооборотной регистрации пучков малой интенсивности используется ФЭУ, для измерения поперечных размеров пучка — ПЗС-камера, продольного размера — диссектор [30]. Измерение продольного размера пучка даёт нам информацию об энергетическом разбросе в пучке, поперечного — об эмиттансе.

## Глава 2

**Конструкция и расчёты гибридного вигглера**

Для генерации синхротронного излучения часто используют периодические магнитные системы со знакопеременным поперечным магнитным полем. В таких устройствах орбита пучка представляет собой периодическую кривую (как правило, близкую к синусоиде). Частицы, испытывая поперечное ускорение, излучают в узком конусе по направлению движения. Если максимальное отклонение частиц от оси устройства мало (порядка или меньше размера пучка), то устройство называется ондулятором (undulator). Если же амплитуда колебаний частиц достаточно велика, то такой периодический магнит называют вигглером (wiggler) или змейкой [31; 32], хотя с технической точки зрения принципиальной разницы между вигглером и ондулятором нет. Для описания характера движения частиц в таком устройстве вводится параметр ондуляторности  $K$ , который определяется формулой (2.1).

$$K = \frac{eB\lambda_w}{2\pi m_e c}, \quad (2.1)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $B$  — максимальное магнитное поле,  $\lambda_w$  — период устройства вдоль оси пучка,  $m_e$  — масса электрона,  $c$  — скорость света. Если параметр ондуляторности меньше единицы ( $K \leq 1$ ), излучение из различных полюсов магнита интерферирует, а его интенсивность  $I \sim N^2$ , где  $N$  — число периодов излучателя. При  $K \gg 1$  излучение из разных полюсов не интерферирует, и  $I \sim N$ .

Кроме увеличения потока, вигглер позволяет создать сильное магнитное поле, получить коротковолновое излучение и повысить интенсивность спектра в области жёсткого рентгена (по сравнению с «обычными» поворотными магнитами кольца), поскольку, напомним, критическая длина волны излу-

ния равна:

$$\lambda_c = \frac{4\pi mc}{3\gamma^2 e B_0}, \quad (2.2)$$

где  $\gamma$  — гамма-фактор,  $B$  — магнитное поле,  $m$  — масса частицы.

Спектральный поток фотонов испускаемый вигглером с числом периодов  $N$  равен:

$$\frac{d^2 F}{d\Omega^2} = 1.33 \cdot 10^{13} 2 N E[\text{ГэВ}] I[A] H\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right), \quad (2.3)$$

где  $I$  — ток пучка,  $N$  — количество полюсов и  $H$  — функция описывающая спектральные свойства излучения, которая задаётся формулой:

$$H\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 K_{2/3}^2\left(\frac{\omega}{2\omega_c}\right), \quad (2.4)$$

где  $K_{2/3}$  — модифицированная функция Бесселя.

Мощность излучения из вигглера описывается следующей формулой:

$$P[\text{кВт}] = 0.633 \cdot E^2[\text{ГэВ}] B^2[\text{Тл}] L_M I[A]. \quad (2.5)$$

Из приведённых выражений следует, что для увеличения жёсткости излучения необходимо поднимать магнитное поле, а для увеличения потока — использовать многополюсную конструкцию. Проблема заключается в том, что ВЭПП-4М не является специализированным источником СИ, и для постановки генератора излучения — многополюсного вигглера — выделено относительно небольшое пространство, как по длине, так и по поперечному сечению, что накладывает серьёзные ограничения и на концепцию, и на конструкцию нового устройства.

Следующие факторы определили подход к реализации нового магнитного вигглера:

1. Необходимость сохранить существующую систему каналов вывода СИ, поскольку их изменение повлекло бы за собой сложные и дорогостоящие

изменения в инфраструктуре здания (проходка сквозь стену биозащиты) и разработку новой системы коллиматоров — приёмников излучения.

2. Вигглер находится в северной вставке полукольца ВЭПП-4М, между магнитами NIM4 и NIM3. Плотная компоновка оборудования накопителя оставляет под установку многополюсного магнита ограниченное пространство с размерами примерно  $50 \times 50 \times 150$  см<sup>3</sup>.
3. Как уже упоминалось в первой главе, на ВЭПП-4М используется вертикальная схема инъекции, что накладывает ограничения на возможное уменьшение зазора. В новом устройстве вертикальный зазор равен 30 мм.
4. Поскольку вигглер вносит возмущение в оптику пучка, конструкция устройства должна минимизировать это возмущение, а магнитная система накопителя должна обеспечивать необходимую коррекцию влияния гибридного вигглера. Предполагается, что при проведении экспериментов со встречными пучками вигглер выключен и не влияет на пучок.

В настоящее время существует три основных технологических подхода для создания вигглеров и ондуляторов — на основе электромагнитов, на основе постоянных магнитов и с использованием сверхпроводников. Сверхпроводящие устройства [33] позволяют получать максимальные поля (при заданном межполюсном зазоре и периоде), однако сложны, дороги, требуют сложной криогенной системы. С учётом криостата сверхпроводящий вигглер не входит в отведенные на ВЭПП-4М габариты.

В нашем случае в условиях приведённых выше ограничений, наилучшие результаты — жёсткость и интенсивность СИ — удалось получить путём комбинирования электро- и постоянных магнитов в одной конструкции (идея П. Д. Воблого). При этом сильные постоянные магниты не создают поле

на орбите непосредственно, а перераспределяют поток магнитной индукции, создаваемый токовыми обмотками электромагнита таким образом, чтобы амплитуда поля в зазоре устройства увеличилась.

Из таблицы 1 видно, что удалось в тех же габаритах существенно улучшить характеристики нового устройства по сравнению со старым. При уменьшении периода, увеличилось число полюсов, а максимальное значение магнитного поля значительно возросло.

Несмотря на то, что критическая длина волны синхротронного излучения изменилась (согласно 2.2) не очень существенно, зависимость потока фотонов от длины волны в коротковолновой части спектра весьма сильная (экспоненциальная), так что в результате интенсивность излучения из нового вигглера в области  $E_\gamma = 20$  кэВ увеличилась в 2 раза [19; 20], а в области  $E_\gamma = 100$  кэВ — почти на два порядка (см. подробности в Главе 6). Новый вигглер значительно расширяет исследовательскую программу с использованием синхротронного излучения на комплексе ВЭПП-4 [19].

## 2.1. Конструкция гибридного вигглера

Общий вид многополюсного гибридного вигглера показан на рисунке 2.1. Вигглер состоит из двух идентичных половин, нижней и верхней, с одной боковой стороны соединённых немагнитными пластинами из нержавеющей стали. Вторая боковая сторона открыта, поскольку здесь осуществляется коммутация токовых обмоток по электропитанию и охлаждающей воде. Каждая из половин вигглера представляет собой плиту-магнитопровод с закреплёнными на ней полюсами, несущими катушки возбуждения магнитного поля.



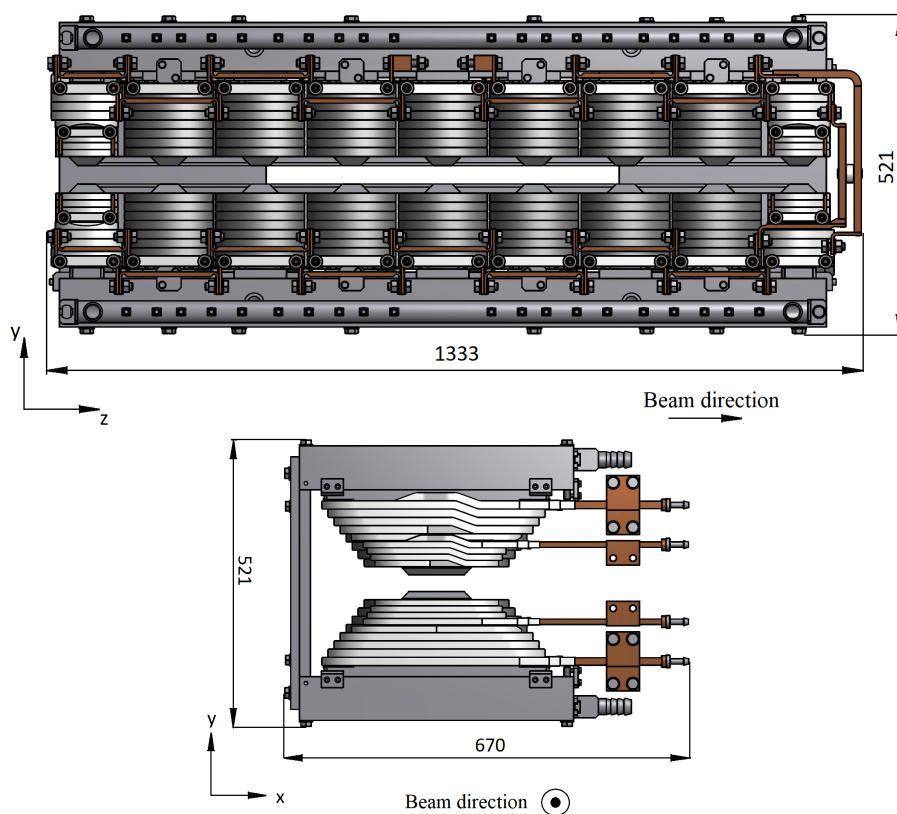


Рис. 2.1. Общий вид гибридного многополюсного вигглера для ВЭПП-4М. Вверху — вид сбоку, внизу — с торца.

На каждой плите-магнитопроводе имеется семь основных полюсов, создающих знакопеременное магнитное поле, и, по краям, два коротких полюса для зануления интеграла магнитного поля. Сердечник полюса изготавливается из цельного куска электротехнической стали с высокой точностью (около  $50 \mu\text{м}$  для поверхностей, формирующих магнитное поле). Форма сердечника — усечённая пирамида, расширяющаяся с боков для уменьшения насыщения железа. На боковых поверхностях сердечника сделаны ступени для удобства намотки и более точного размещения обмотки возбуждения. Кроме основной обмотки, крайний полюс несёт также корректирующую катушку для более точной регулировки интеграла поля и коррекции орбиты пучка. Сердечники крепятся к несущей плите-магнитопроводу болтами и фиксируются штифтами. Внешний вид и размеры центрального и бокового сердечников показаны на рисунок 2.2 и рисунок 2.3.

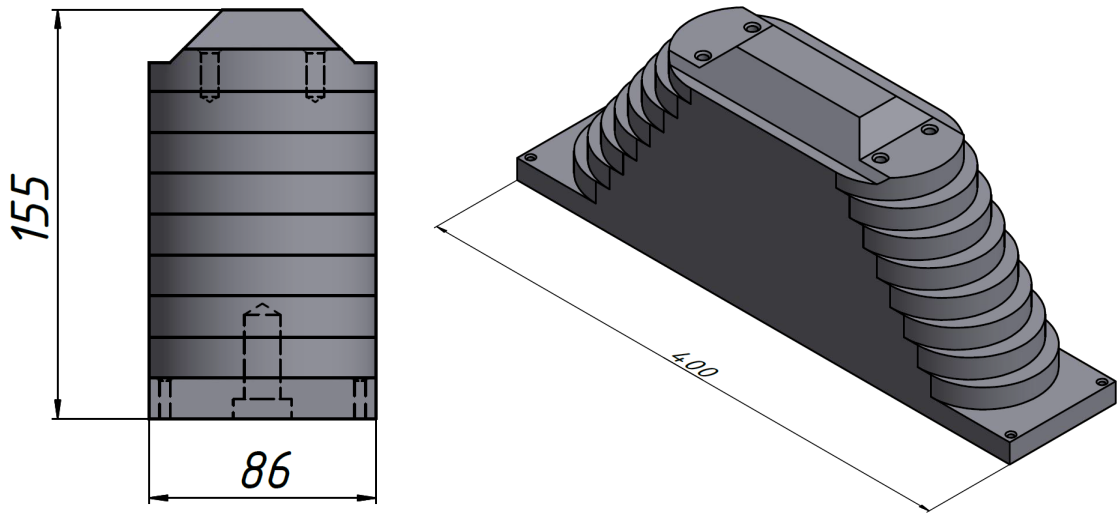


Рис. 2.2. Сердечник основного полюса.

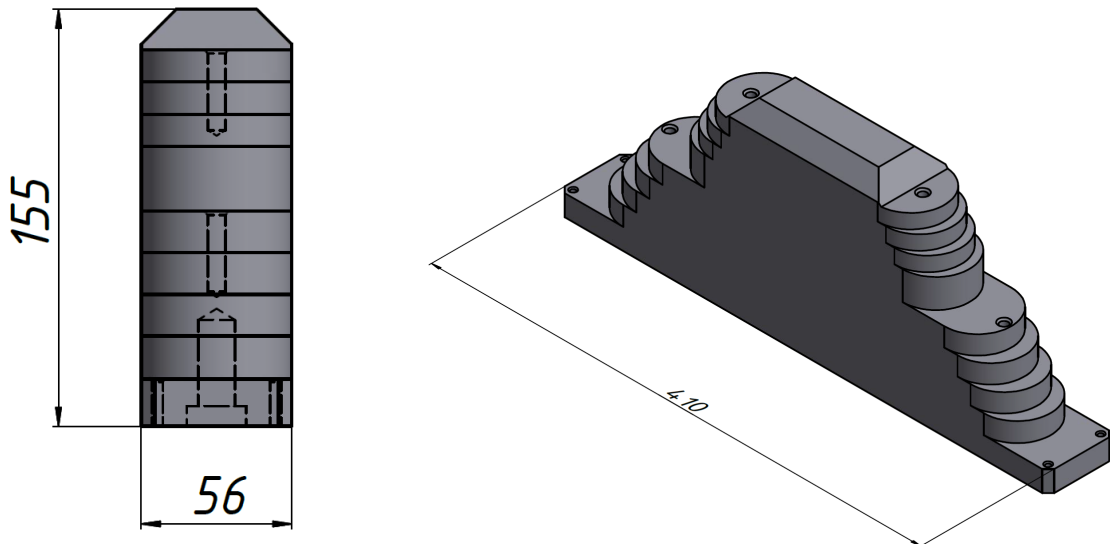


Рис. 2.3. Сердечник бокового полюса коррекции.

Катушка возбуждения, размещённая на основном полюсе, состоит из 16 витков уложенных в 2 слоя (рисунок 2.4 а). Медный проводник (электролитическая бескислородная медь, производства Luvata [34]) представляет собой прямоугольную шинку с поперечным сечением 13.5x13.5 мм и отверстием диаметром 7.5 мм для протока охлаждающей обмотку воды. Для большей компактности, проводник наматывался непосредственно на полюс без воздушного зазора. На крайнем полюсе, кроме основной катушки, аналогичной катушке основного полюса, но состоящей из 8 витков, предусмотрены катуш-

ки коррекции, состоящие из 8 витков медной шинки сечением 10x10 мм с отверстием диаметром 5 мм под охлаждающую жидкость (рисунок 2.4 б).

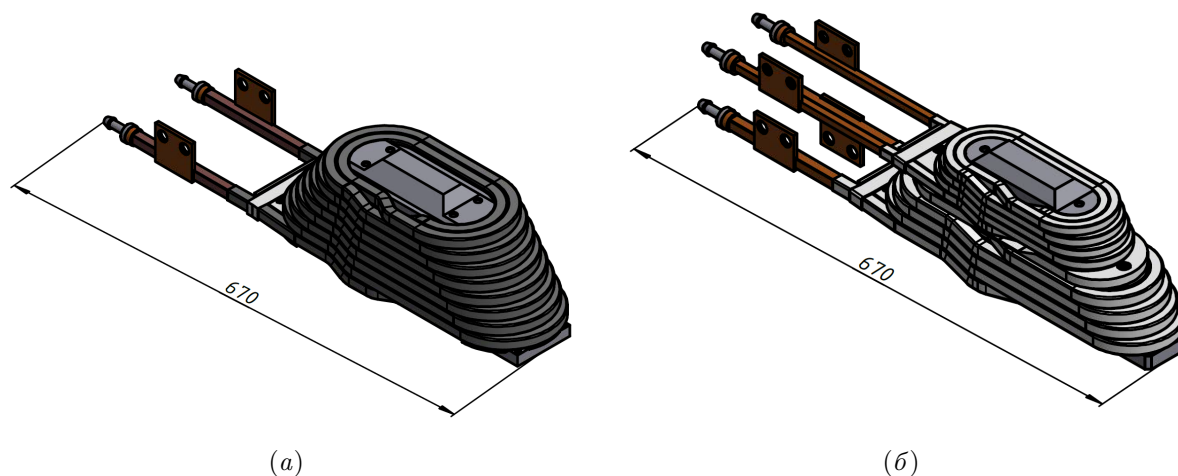


Рис. 2.4. Полюса с катушками. Центральный полюс (а). Боковой полюс с катушкой коррекции (б).

Намотанная из медной шинки катушка подвергается вакуумной пропитке эпоксидной смолой. Смола должна быть дегазирована в вакууме (ниже 1 мбар при температуре 65–70°C), пока смесь не освободится от пузырьков воздуха и примесей с низкой температурой кипения. Для дегазации пресс-форма с собранными катушками нагревается до 65–70°C и вакуумируется до давления менее 1 мбар в течение нескольких часов. Затем катушки полностью заливаются эпоксидной смолой. Во время процесса пропитки, температура смолы и формы должна поддерживаться постоянной. Изоляция изготовленных катушек проверяется погружением в воду в течение 6–12 часов.

Обмотки вигглера запитываются от стабилизированного источника питания с максимальным током 2 кА и напряжения 80 В. Т.к. в обмотках выделяется достаточно большая мощность, они охлаждаются деминерализованной водой. При перепаде давления в 3 атмосферы охлаждающая вода нагревается на 10°C.

Параметры обмотки приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Параметры обмотки

	Основная катушка	Катушка коррекции
Длина шины, м	12	5
Сечение шины, мм	13.5x13.5Ø7.5	10x10Ø5
Число витков	16	8
Ток, А	2000	1000
Ампер-витки	32000	8000
Сопротивление, мОм	2	1.2
Выделяющаяся мощность, кВт	8	4.5
Перепад давления, атм	3	3
Перепад температуры, °С	9.7	7.6
Расход воды, л/мин	1.8	5.4

Для увеличения амплитуды поля в гибридном вигглере используются мощные неодимовые магниты ( $NdFeB$ ), имеющие высокую коэрцитивную силу и остаточную намагниченность порядка 1.2 Тл [15]. Постоянные редкоземельные магниты (страна производитель — Китай) устанавливаются между полюсами вигглера, как показано на рисунке 2.5. Магнит представляет из себя трапециевидную плитку размером 100x30x10 мм.

Вектор намагниченности постоянных магнитов направлен вдоль пучка. Остаточное магнитное поле на оси пучка при нулевом токе в основных катушках возбуждение близко к нулю и в пиках менее 0.01 Тл.

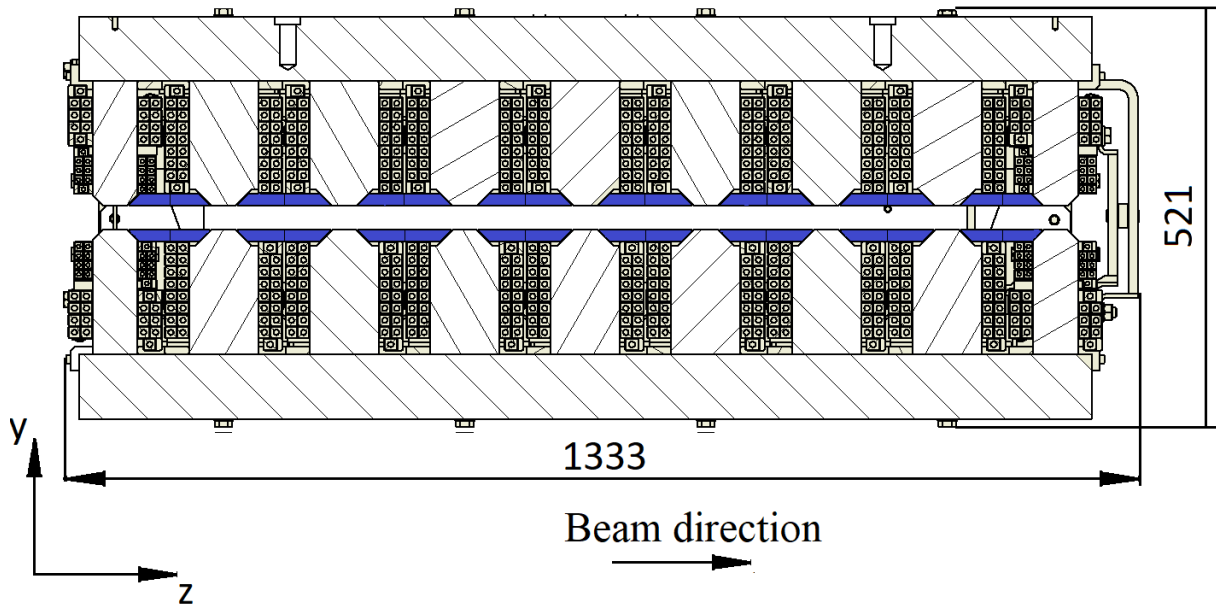


Рис. 2.5. Сечение вигглера с установленными между полюсами магнитами. Синим отмечены постоянные магниты.

## 2.2. Расчёт магнитного поля вигглера

Симметрия многополюсного гибридного вигглера подсказывает систему координат, в которой удобно вычислять параметры магнитного поля, создаваемого устройством. Это декартова прямоугольная система координат с началом в центре вигглера, как это показано на рисунке 2.6. Ось  $Z$  лежит в медианной плоскости вигглера и направлена вдоль неё, горизонтальная ось  $X$  лежит в медианной плоскости, перпендикулярна оси  $Z$  и направлена «наружу» кольца (по направлению радиуса кривизны орбиты пучка в накопителе), вертикальная ось  $Y$  перпендикулярна медианной плоскости и направлена вверх.

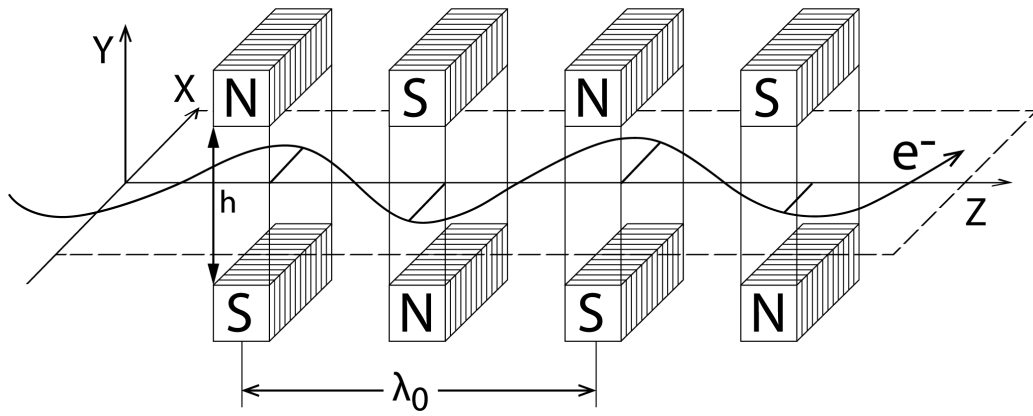


Рис. 2.6. Система координат для вычисления магнитного поля вигглера.

В системе координат, показанной на рисунке 2.6, и используемой в этой главе, удобно вычислять конфигурацию магнитного поля и находить орбиту пучка, которая, в идеальном случае отсутствия ошибок поля, планарна и лежит в медианной плоскости вигглера. Напомним, однако, что поперечное движение частицы в циклическом ускорителе — бетатронные колебания — описывается в криволинейной сопровождающей системе координат  $(x, y, s)$ ; при этом  $Y = y$ , а связь координат декартовых  $(X, Z)$  и криволинейных  $(x, s)$  объясняется ниже в Приложении А.

Для моделирования и оптимизации магнитного поля гибридного вигглера использовалась программа конечно-элементных расчётов различных научно-технических задач (в т.ч., магнитостатики) COMSOL [35]. Программный продукт работает с различными физическими моделями и представляет необходимый комплект инструментов для проектирования, включая задание геометрии объекта, вычисление требуемых значений, визуализацию процесса моделирования, построение графиков и т.п.

Исходя из симметрии задачи, для ускорения расчётов использовалась половина вигглера, как это показано на рисунок 2.7. Правильно подобранное разбиение модели на конечные элементы (более плотное в зазоре, где важно знать распределение поля с высокой точностью, и менее плотное на периферии модели) позволяет дополнительно ускорить расчёты [17].

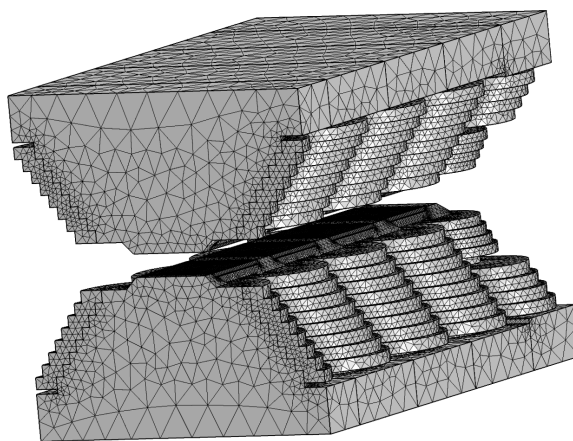


Рис. 2.7. Половина вигглера в реализации расчётной модели с сеткой.

Кроме расчёта и оптимизации продольного и поперечного распределения магнитного поля в зазоре многополюсного вигглера при различных токах возбуждения, задачей моделирования является уменьшение влияния поля вигглера на искажение орбиты пучка за пределами магнитного устройства. Для этого тщательно подбиралось значение тока корректирующих катушек, размещённых на крайних полюсах, в зависимости от тока основных обмоток.

Полюса вигглера были изготовлены из конструкционной стали 10. На выбор стали повлияли ее доступность, неплохие электротехнические (магнитные) характеристики, пластичность, простота обработки, дешевизна. Исследования возможности применения других сплавов (в т.ч., например, пермендюра [36]) показали, что увеличение амплитуды поля или улучшение его качества малы, а проблемы с изготовлением вигглера возрастают (для пермендюра — из-за сложности точной обработки полюса ввиду хрупкости материала). На рисунке 2.8 представлена измеренная зависимость относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от магнитного поля для стали 10, использовавшаяся при моделировании поля гибридного вигглера.

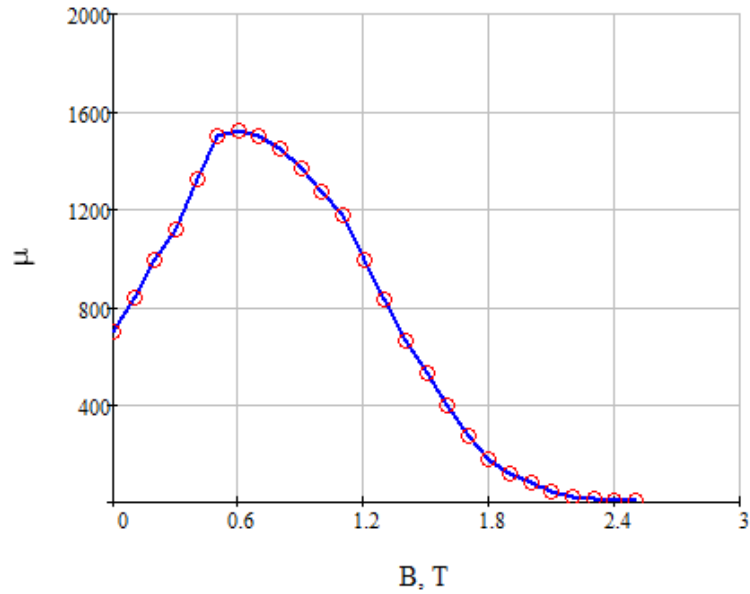


Рис. 2.8. Зависимость относительной магнитной проницаемости от магнитного поля для стали 10.

Геометрия сердечника полюса (в поперечном направлении — усечённая ступенчатая пирамида) тщательно подбиралась из соображений выравнивания плотности потока магнитной индукции внутри полюса. Полученное распределение показано на рисунке 2.9. В продольном направлении толщина сердечника 86 мм, что является компромиссом между числом полюсов вигглера и величиной амплитуды магнитного поля на его оси.

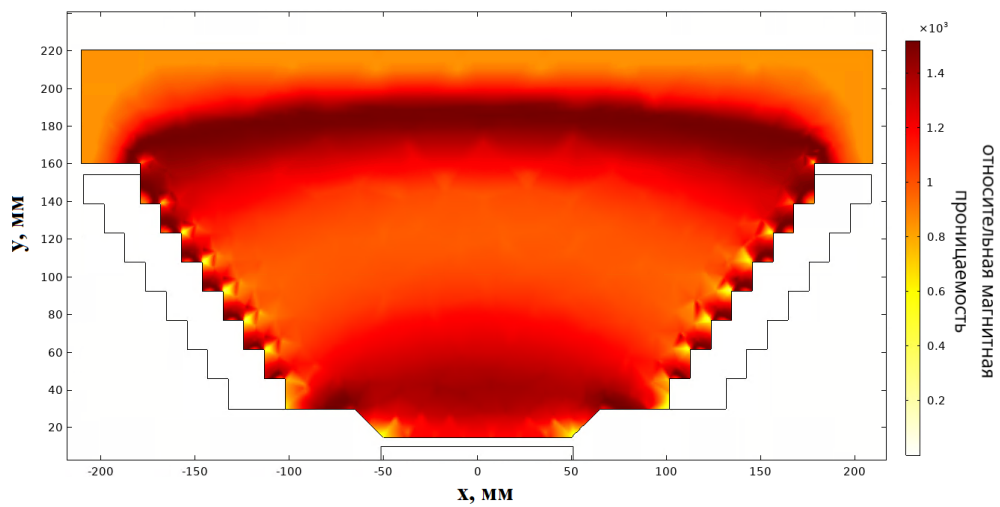


Рис. 2.9. Распределение относительной магнитной проницаемости в сечении сердечника. Ток в катушке 800 А.



### 2.2.1. Результаты магнитных расчётов

На рисунке 2.10 показан график изменения максимального поля в зазоре вигглера от тока возбуждения основных обмоток без и при использовании постоянных магнитов. Несмотря на то, что вклад последних в поле составляет около 10%, согласно формуле 2.5 мощность излучения увеличивается на 20%, а согласно формуле 2.3 поток фотонов с энергией 100 кэВ приблизительно в 3 раза, эта добавка оказывается существенной и оправданной. Другой важный факт, который следует из рисунка 2.10, заключается в том, что при нулевом токе вклад постоянных магнитов в поле на оси вигглера очень мал. Т.е., при выключенном вигглере, когда на ВЭПП-4М проводятся эксперименты по физике частиц, гибридный вигглер почти не оказывает влияния на орбиту пучков.

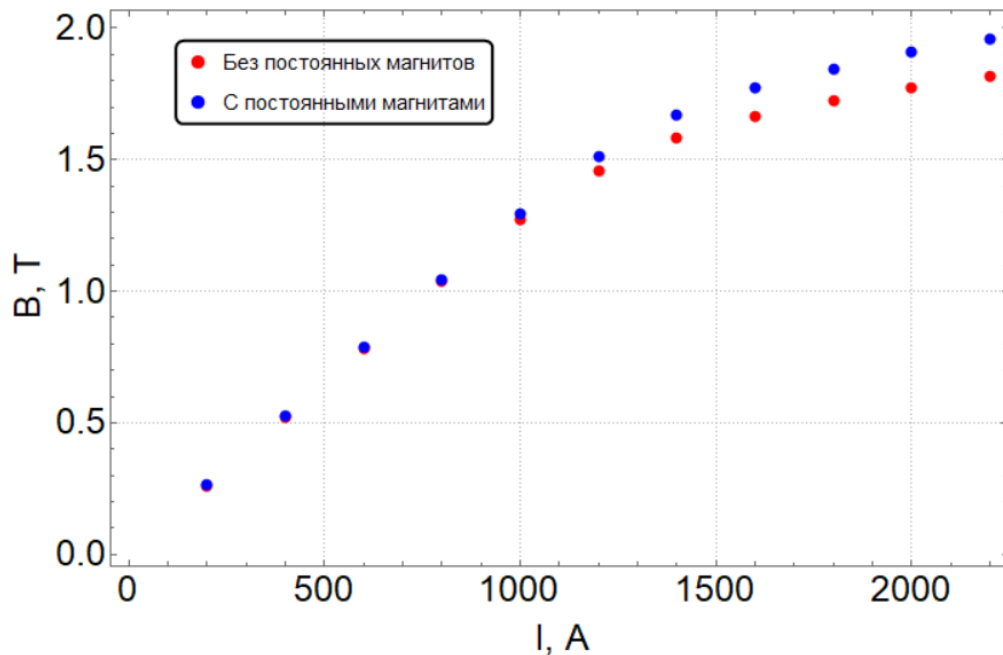


Рис. 2.10. Зависимость пикового поля в вигглере от тока.

Рисунок 2.11 цветом показывает плотность потока магнитного поля в продольном сечении центральных полюсов вигглера (в плоскости  $YZ$ ) без постоянных магнитов (слева) и с постоянными магнитами (справа). Видно, что использование постоянных магнитов «разгружает» ярмо полюса и позво-

ляет увеличить пиковое поле вигглера [15].

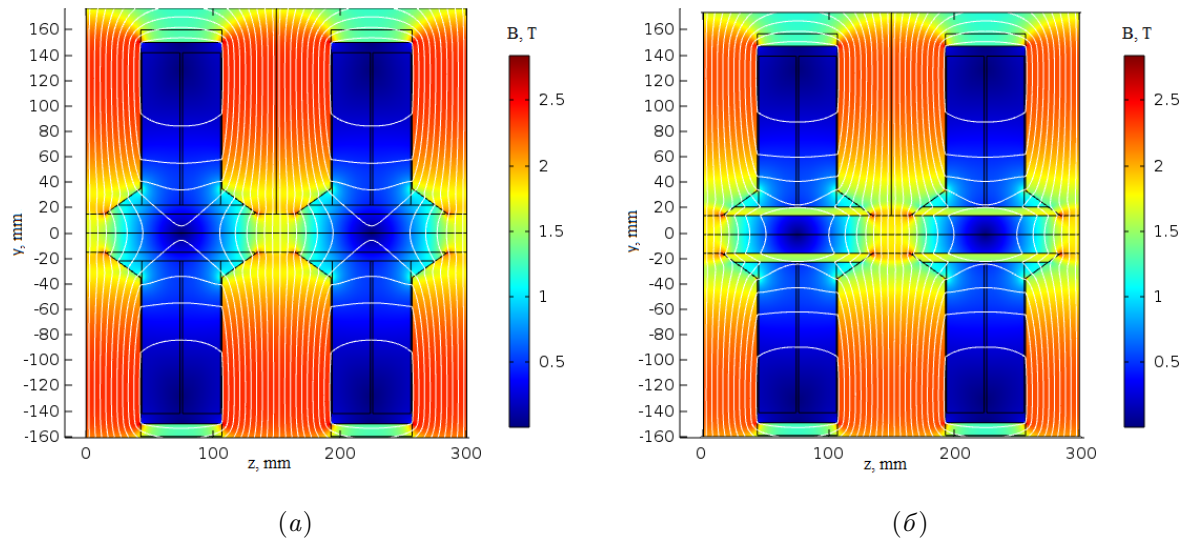


Рис. 2.11. Распределение магнитного потока одного периода, (а) без постоянных магнитов, (б) с постоянными магнитами.

На рисунке 2.12 показано расчётное продольное распределение вертикальной компоненты магнитного поля, создаваемой постоянными магнитами при выключенном токе питания вигглера.

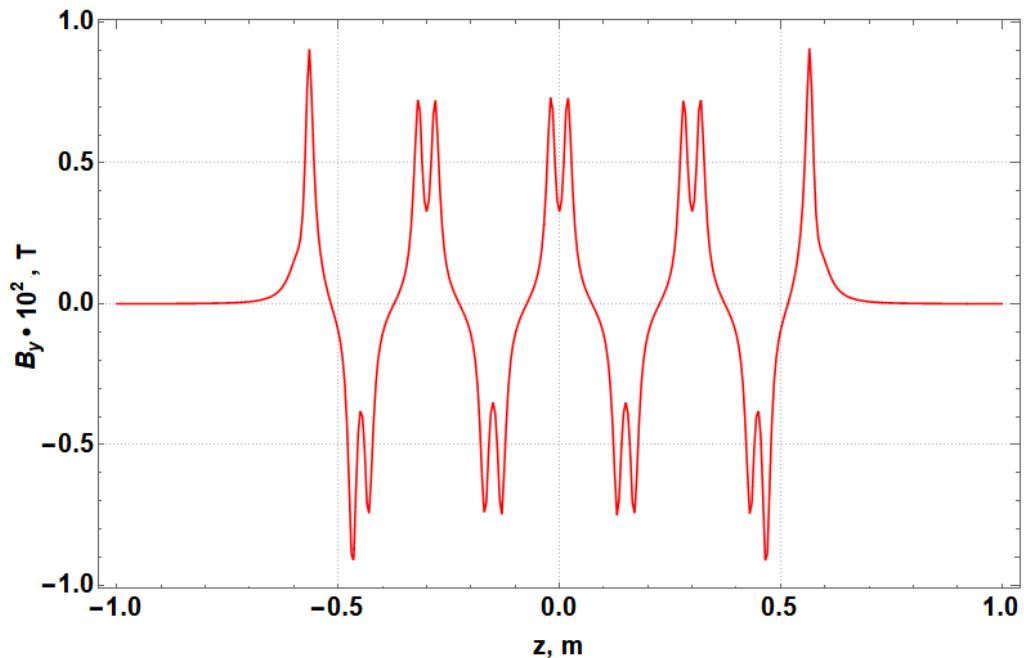


Рис. 2.12. Продольное распределение магнитного поля в зазоре вигглера при нулевом токе в катушках.

Интеграл остаточного поля создаваемого постоянными магнитами равен

$8 \cdot 10^{-5}$  Т·м, что на энергии пучка 1.9 ГэВ (энергия инжекции ВЭПП-4М) приводит к появлению угла  $\theta = 12 \mu rad$ . Такое отклонение легко компенсируется регулярной системой коррекции ВЭПП-4М.

На рисунке 2.13 приведено расчётное продольное распределение вертикального поля на оси вигглера с постоянными магнитами и без них. Ток в основной обмотке 2 кА; пиковое поле 1.905 Тл. Наличие постоянных магнитов позволяет получить дополнительно 1.55 кГц по сравнению с вигглером, в котором постоянные магниты не используются.

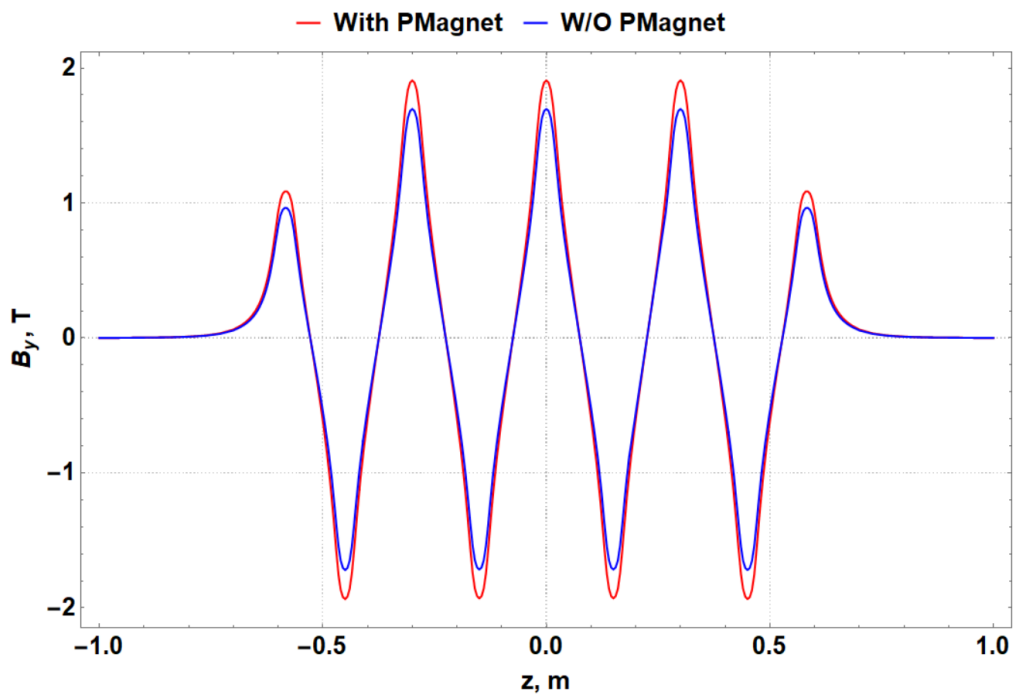


Рис. 2.13. Продольное распределение вертикальной компоненты магнитного поля в зазоре вигглера при токе в основных катушках 2 кА.

Как видно из рисунка 2.13, на краях, амплитуда магнитно поля вигглера приблизительно в половину меньше, чем амплитуда магнитного поля генерируемая основными полюсами, что напоминает схему компоновки  $(1/2 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ \dots \ -1 \ 1 \ 1/2)$ . Такой вариант компоновки магнитных полюсов позволяет добиться того, чтобы координата и угол заряженной частицы на входе в вигглер были равны координате и углу на выходе из вигглера [37]. К плюсам данной схемы можно отнести то, что она позволяет получить наи-

большее число полюсов с максимальным полем. Следует отметить, что в данной схеме компоновки магнитных полюсов есть минус, а именно при пролёте пучка через такое устройство, линия относительно которой совершаются колебания пучка, будет смещена относительно центральной оси вигглера, а величина этого смещения называется выносом орбиты.

В нашем случае, при максимальном токе в основных катушках 2 кА, отношение интеграла поля между основными полюсами и боковыми составляет 0.4. Данное обстоятельство обусловлено следующими факторами: во-первых, геометрия крайних полюсов отличается от основных полюсов (из-за экономии места, рисунок 2.4); во-вторых, крайние полюса, в отличие от центральных, имеют постоянные магниты только с одной стороны (рисунок 2.5).

Из вышесказанного следует, что если не предпринимать специальных усилий, то горизонтальная орбита пучка, пролетающего через гибридный вигглер, оказывается нескомпенсированной — на выходе из устройства пучок значительно отклоняется от оси как по углу, так и по координате (рисунки 2.14 и 2.15 для случая тока питания 2 кА).

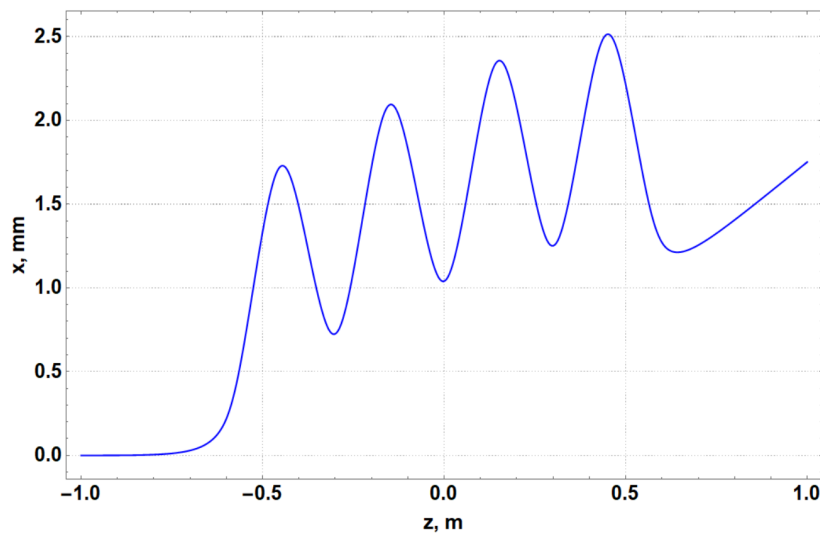


Рис. 2.14. Отклонение координаты пролетающей через нескомпенсированный вигглер. Ток в катушках 2 кА.

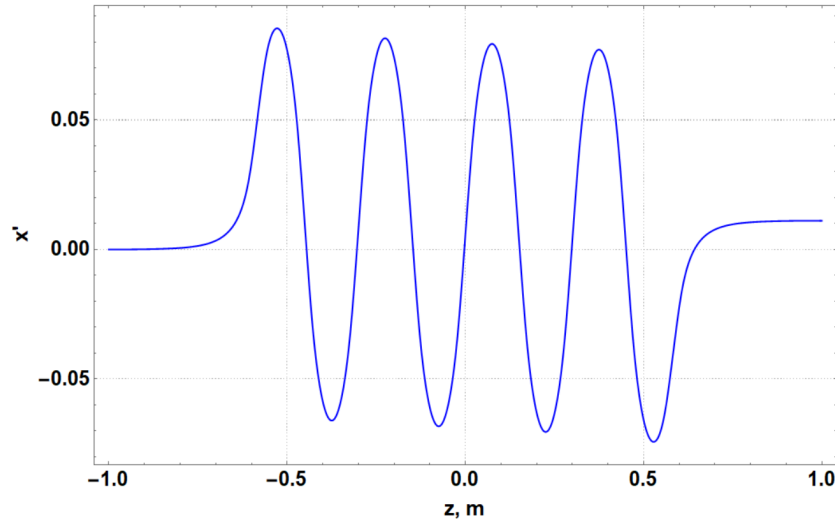


Рис. 2.15. Отклонение угла частицы пролетающей через некомпенсированный вигглер. Ток в катушках 2 кА.

Траектория пучка, показанная на рисунке 2.14, находилась при помощи численного решения дифференциальных уравнений движения, которые при условии, что в медианной плоскости поле имеет только вертикальную компоненту записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}\gamma m \ddot{x} &= -\dot{z} B_y(x, 0, z), \\ \gamma m \ddot{z} &= \dot{x} B_y(x, 0, z),\end{aligned}\tag{2.6}$$

где точка над переменной означает дифференцирование по времени.

Найдя траекторию движения частицы из уравнений 2.6, можно найти значение магнитного поля на этой траектории и проинтегрировать его. Первый и второй интегралы магнитного поля по этой траектории будет пропорционален углу и координате после пролёта поля вигглера.

$$\begin{aligned}I_1 &= \int B_y(s) ds \sim \dot{x}, \\ I_2 &= \int \int B_y(s) ds ds \sim x,\end{aligned}\tag{2.7}$$

где  $s$  — траектория частицы,  $B_y(s)$  — распределение вертикальной компоненты поля вдоль траектории частицы.

То есть для того, чтобы после пролёта вигглера поперечная координата

и угол частицы не менялись, необходимо скомпенсировать первый и второй интеграл магнитного поля. Для этого, на крайних полюсах, как уже отмечалось, имеется две корректирующие катушки.

В таблице 2.2 показаны рассчитанные по результатам моделирования первый и второй интегралы поля для вигглера с постоянными магнитами и без них. Для иллюстрации того, к чему может привести нескомпенсированность этих интегралов, на рисунке 2.14 показана отклонение координаты и угла для частицы пролетающей через вигглер при токе в 2 кА.

Таблица 2.2. Интегралы поля

Ток, кА	С постоянными магнитами		Без постоянным магнитов	
	$I_1$ , Т·м	$I_2$ , Т·м <sup>2</sup>	$I_1$ , Т·м	$I_2$ , Т·м <sup>2</sup>
0	$-7.95 \cdot 10^{-5}$	$-6.37 \cdot 10^{-5}$	0	0
0.25	$5.44 \cdot 10^{-4}$	$4.29 \cdot 10^{-4}$	$5.06 \cdot 10^{-4}$	$3.99 \cdot 10^{-4}$
0.5	$1.14 \cdot 10^{-3}$	$8.97 \cdot 10^{-4}$	$9.56 \cdot 10^{-4}$	$7.54 \cdot 10^{-4}$
0.7	$1.71 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$	$1.36 \cdot 10^{-3}$	$1.07 \cdot 10^{-3}$
1	$2.14 \cdot 10^{-3}$	$1.69 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
1.3	$1.14 \cdot 10^{-3}$	$8.83 \cdot 10^{-4}$	$-1.31 \cdot 10^{-3}$	$-1.07 \cdot 10^{-3}$
1.5	$-1.8 \cdot 10^{-3}$	$-1.47 \cdot 10^{-3}$	$-5.66 \cdot 10^{-3}$	$-4.56 \cdot 10^{-3}$
1.7	$-6.06 \cdot 10^{-3}$	$-4.88 \cdot 10^{-3}$	$-1.02 \cdot 10^{-2}$	$-8.22 \cdot 10^{-3}$
2	$-1.11 \cdot 10^{-2}$	$-1.11 \cdot 10^{-2}$	$-1.51 \cdot 10^{-2}$	$-1.21 \cdot 10^{-2}$
2.2	$-1.3 \cdot 10^{-2}$	$-1.04 \cdot 10^{-2}$	$-1.73 \cdot 10^{-2}$	$-1.38 \cdot 10^{-2}$

Анализируя таблицу 2.2 можно сделать несколько выводов. Во-первых, постоянные магниты на 25 % уменьшают значение интегралов при больших токах, что приводит к ослаблению тока в катушках коррекции. Во-вторых, интегралы меняют знак при токе основных катушек около 1.5 кА, следовательно, источники питания корректирующих катушек должны быть биполяр-

ными.

Расчётные токи в катушках коррекции для компенсации первого и второго интеграла поля вигглера с постоянными магнитами представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Токи в источниках питания коррекции для зануления 1 и 2 интеграла поля

Ток основного источника	Ток катушек коррекции
2 кА	250 А
1.7 кА	156 А
1.5 кА	90 А
1.3 кА	23 А
1 кА	-19 А
0.7 кА	-12 А
0.5 кА	-5 А
0.25 кА	-3 А

В рассматриваемом идеальном случае точной зеркальной симметрии продольного распределения поля относительно центра змейки токи во входной и выходной корректирующих катушках равны. Как будет видно из результатов магнитных измерений, в реальности это не так (Глава 3).

Трёхмерное моделирование магнитного поля в зазоре вигглера позволяет получить поперечное распределение поля. Зависимость вертикального поля от горизонтальной координаты в центральном сечении сердечника (там, где значение поля максимально) показана на рис. 2.16 для тока питания 2 кА.

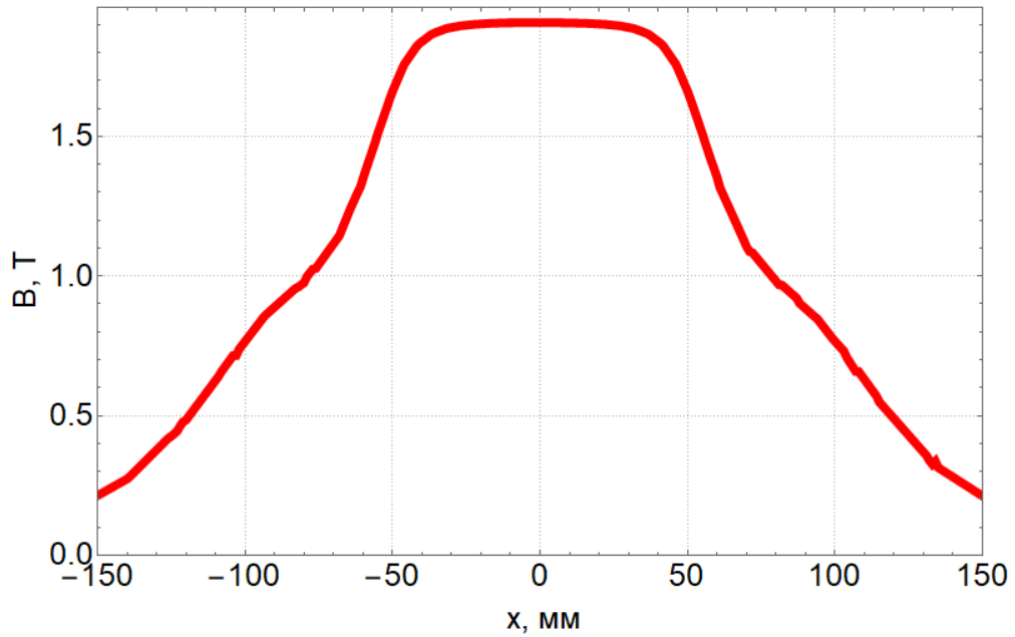


Рис. 2.16. Поперечное распределение вертикальной компоненты поля в центральном сечении полюса вигглера при токе питания 2 кА.

Из графика видно, что в области  $\pm 20$  мм от оси вигглера поле с хорошей точностью однородно, что позволяет использовать для простых оценок модель вигглера Хальбаха (Приложение А) в приближении бесконечно широких полюсов.

Поперечные градиент и секступольная компонента (вторая производная) магнитного поля, которые задаются формулами:

$$\begin{aligned} G_x(s) &= \frac{\partial B_y(s)}{\partial x}, \\ S_x(s) &= \frac{\partial^2 B_y(s)}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

На графике 2.17 показаны распределение фокусирующей и секступольной силы в вигглере при токе 2 кА в катушках возбуждения.



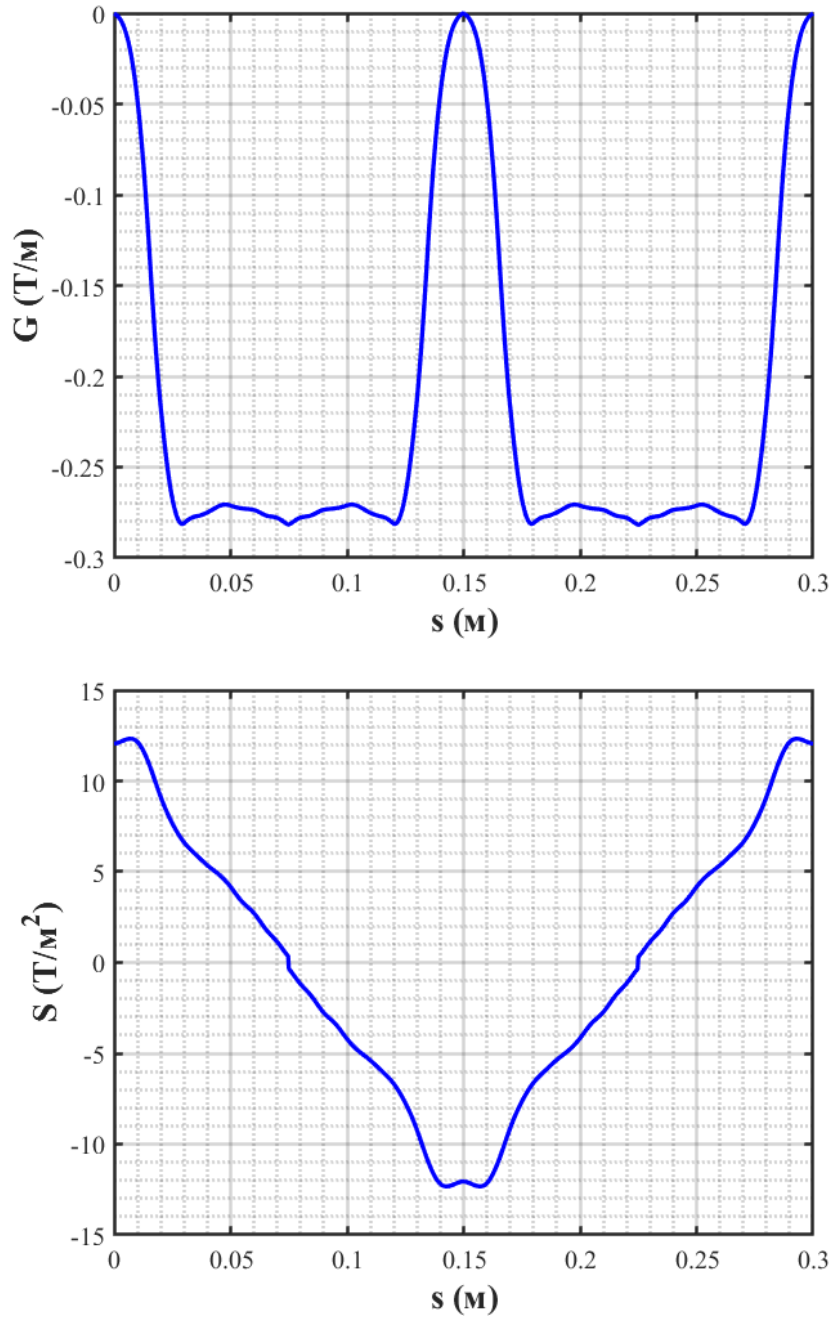


Рис. 2.17. Распределение мультипольных компонент поля в вигглере при 2 кА в катушках возбуждения.

Проделанные магнитные расчёты позволяют построить математическую модель поля гибридного вигглера (включая линейные и нелинейные компоненты), которая далее используется для исследования вигглера на пучок ВЭПП-4М.

## Глава 3

## Магнитные измерения вигглера

Изготовление нового гибридного вигглера в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН заняло около двух лет, и в начале 2017 года вигглер был поставлен на стенд магнитных измерений. Измерения и тщательное картирование магнитного поля устройства заняло несколько месяцев, и летом гибридный вигглер вместе с вакуумной камерой были смонтированы на кольце ВЭПП-4М. Левый рисунок 3.1 показывает установленную сначала вакуумную камеру, а правый — собранный магнит.



(a)

(б)

Рис. 3.1. (а) вакуумная камера вигглера, хорошо виден фланец подсоединения магнито-разрядного насоса, (б) смонтированный вигглер.

Осенью 2017 года были осуществлены геодезическая выставка вигглера и примыкающих к нему магнитных элементов накопителя, подключение источника питания, системы измерения температуры, блокировок по перегреву устройства и вакуумной камеры, подведена магистраль охлаждения катушек питания.

В данной главе описывается процедура и результаты магнитных измерений поля гибридного вигглера.

### 3.1. Подбор параметров постоянных магнитов

Одним из важных шагов в процедуре магнитных измерений является определение качества постоянных магнитов. Постоянный магнит состоит из двух склеенных друг с другом частей и показан на рисунке 3.2.



Рис. 3.2. Постоянный магнит.

Качество постоянных магнитов исследовалось с помощью теслометра фирмы F.W.BELL 5180 [38], который работает в диапазоне магнитного поля от 1 Гс до 3 кГс и имеет разрешение в несколько мГс. В процессе отбора магнитов измерялись амплитуды компонент магнитного поля, направление вектора намагниченности и т.д. Полученная информация использовалась при сборке вигглера и размещении постоянных магнитов друг относительно друга. Магнитные блоки, чьи характеристики сильно отличались от средних отбраковывались.

### 3.2. Конструктив и принцип работы измерительной системы

Для снятия карты магнитного поля гибридного вигглера использовалась измерительная система на основе линейки датчиков Холла. Схема измерительной системы показана на рисунке 3.3.

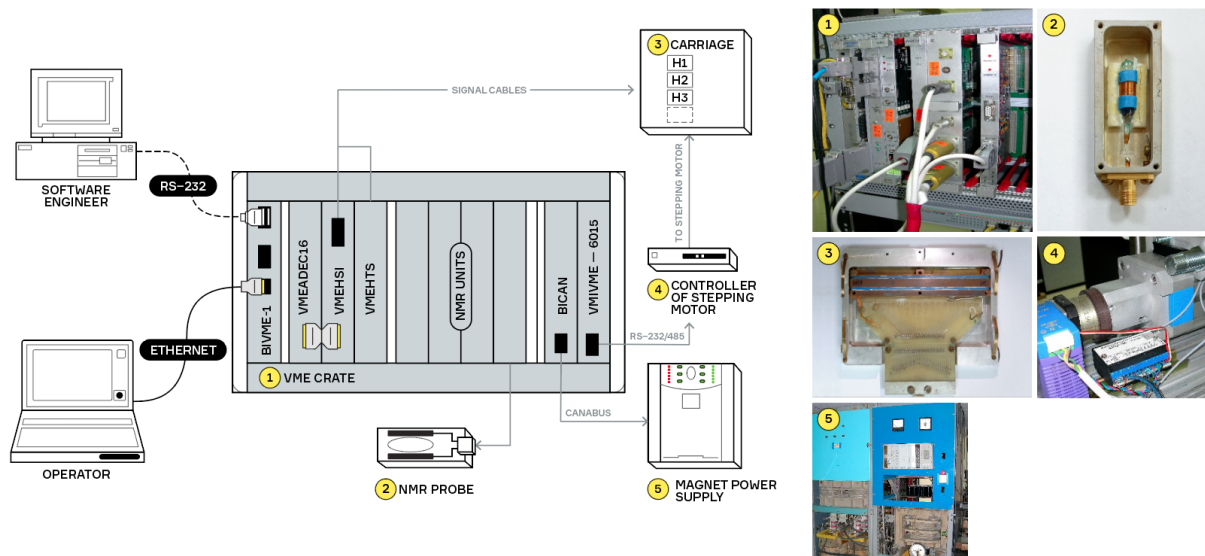


Рис. 3.3. Схема измерительной системы. 1 — VME крейт; 2 — датчик ЯМР; 3 — каретка с датчиками Холла; 4 — шаговый двигатель; 5 — источник питания.

Система измерений магнитного поля гибридного вигглера включает в себя:

- каретку с датчиками Холла и систему термостабилизации;
- систему механического перемещения и позиционирования каретки;
- источник питания катушек гибридного вигглера;
- электронную аппаратуру питания датчиков Холла, измерения и обработки сигналов;

- датчик ядерного магнитного резонанса (ЯМР), использующийся для калибровки датчиков Холла.

Конструктивно измерительная система магнитного поля гибридного вигглера является типичной для ИЯФ СО РАН и неоднократно использовалась ранее [39; 40].

### 3.2.1. Электроника

Для обеспечения прецизионного измерения характеристик магнитного поля использовался набор электроники разработанный в ИЯФ СО РАН. Вся электроника выполнена в стандарте VME. Для проведения магнитных измерений применялись контроллер BIVME-1; интерфейс VMERS-232; интерфейс VMESAN; аналоговый интерфейс датчиков Холла (VMEHSI); прецизионный АЦП (VMEADC16); стабилизатор температуры датчиков (VMENTS). Подробное описание этих приборов и принцип их работы можно найти в [39].

### 3.2.2. Каретка с датчиками Холла

Набор датчиков Холла размещается в апертуре магнита на специальной термостабилизированной медной пластине («каретка», рисунок 3.4) поперечно направлению движения пучка (например, для гибридного вигглера, по координате  $X$  на рисунке 2.6). Число датчиков Холла и расстояние между ними зависит от апертуры, в которой необходимо снять карту поля.

Каретка оснащена нагревательным элементом и датчиком температуры, с помощью которых производится термостабилизация датчиков Холла, и которые, как уже писалось ранее, размещаются на медном носителе, как это показано на рисунке 3.4. Носитель прижимается к корпусу каретки через стеклотекстолитовую прокладку для нормированного оттока тепла. Регулирующая электроника поддерживает температуру носителя в диапазоне

$3 \pm 1^\circ\text{C}$  с нестабильностью  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ . Максимальная мощность регулятора — 4 Вт.

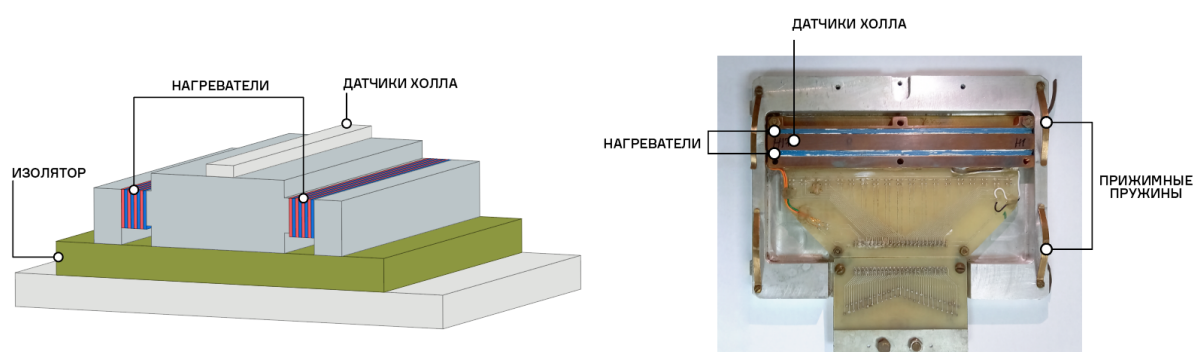


Рис. 3.4. Каретка с датчиками холла.

Датчики Холла размещены на расстоянии  $10 \pm 0.04$  мм друг от друга. Расстояние между датчиками определялось с помощью оптического измерительного микроскопа. Основные параметры датчиков Холла представлены в таблице 3.1. Датчики имеют абсолютную точность измерения поля не хуже  $\pm 0.5$  Гс. Изображение одиночного датчика Холла под микроскопом показано на рисунке 3.5.



Рис. 3.5. Датчик Холла под микроскопом с увеличением в 50 раз.

Таблица 3.1. Основные характеристики датчиков Холла

Размеры преобразователя, мм	$3 \times 2 \times 0.6$
Размеры чувствительной зоны, мм	$0.1 \times 0.05$
Входное сопротивление, Ом	9.8
Выходное сопротивление, Ом	14.2
Остаточное напряжение, мкВ	45
Магнитная чувствительность при $B = 0.1$ Тл, мкВ/мТл	119.6
Ток питания, мА	100
Интервал рабочих температур, °К	$1.5 \div 373$

### 3.2.3. Датчик ЯМР

Перед измерениями все датчики калибровались с помощью датчика ядерного магнитного резонанса (ЯМР), с относительной точностью измерения поля  $10^{-6}$  [41]. Каретка с датчиками Холла и датчик ЯМР вносились в специальный калибровочный магнит с высокооднородным полем. В результате удалось измерить соответствие между напряжением на датчиках Холла и магнитным полем в диапазоне до 2.1 Тл.

### 3.2.4. Система механического перемещения и позиционирования каретки

Внутренняя часть направляющей, выполненной из алюминиевого сплава, имеет три базовых поверхности, первые две лежат в одной плоскости и обеспечивают параллельность каретки медианной плоскости, третья определяет поперечное положение каретки при движении последней вдоль магнита (рисунок 3.6). В продольном направлении направляющая фиксируется с помощью двух упоров, расположенных по краям направляющей между торцов магнита; один из упоров съёмный.



Рис. 3.6. Алюминиевая направляющая.

Немагнитная направляющая (рисунок 3.7) с набором датчиков Холла, размещённых на каретке, выставляется и закрепляется внутри измеряемого магнита с точностью около  $100 \mu\text{м}$ . Во время измерений каретка перемещается в неподвижной направляющей посредством штока, одним концом прикреп-



лѐнного к каретке, а другим — к редуктору шагового двигателя. На каждом шаге, задаваемом от компьютера, датчики Холла измеряют амплитуду поля; знание координаты датчика позволяет получить зависимость поля от координаты, а также рассчитать градиент поля и более высокие производные.

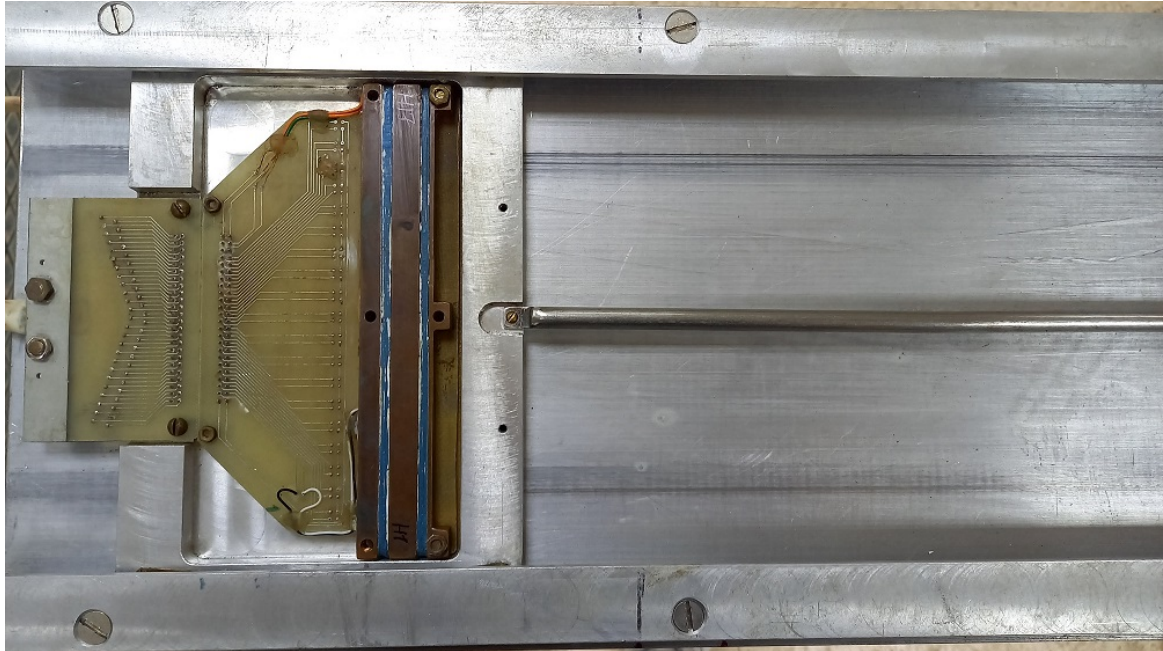


Рис. 3.7. Алюминиевая направляющая с кареткой внутри.

Система перемещения состоит из шагового двигателя с характеристиками, приведѐнными в таблице 3.2, системы управления двигателя, точного винта, штока и т.д.

Таблица 3.2. Основные характеристики системы позиционирования FESTO

Макс. рабочий ход, мм	2000
Макс. рабочая нагрузка, кг	150
Макс. усилие подачи $F_x$ , Н	1600
Макс. приводной момент, Н·м	8.5
Макс. момент привода без нагрузки, Н·м	1.4
Макс. скорость, м/с	1.2
Точность повторения, мм	$\pm 0.02$
Погрешность перемещения, мкм/м	20

### 3.2.5. Источник питания

При измерениях гибридный вигглер запитывался источником питания с напряжением  $U = 80$  В,  $I = 2$  кА постоянного тока. Стабильность источника питания  $5 \cdot 10^{-5}$ , что даёт ошибку измерения  $\left(\frac{\sigma_B}{B}\right)$  поля на уровне  $5 \cdot 10^{-5}$ . Корректирующие катушки питаются от двух источников с напряжением  $U = 15$  В,  $I = 1$  кА каждая.

### 3.3. Процедура измерений

На рисунке 3.8 показана гибридный вигглер (с торца) на стенде магнитных испытаний, подготовленный к началу измерения магнитного поля. Хорошо видны направляющая, вставленная, в межполюсной зазор и каретка с датчиками, отведённая от торца вигглера на достаточное расстояние, чтобы захватить область нарастания поля (спада). Полная процедура измерений включает в себя:

- калибровку датчиков Холла с помощью датчика ЯМР в поле калибровочного магнита с высокой однородностью поля;
- прогрев датчиков Холла током питания внутри измеряемого магнита в течение 1–2 часов для получения стационарного теплового режима;
- измерение «нулей» поля при выключенном токе питания магнита;
- задание нужного уровня тока питания магнита;
- измерение карты поля;
- обработка массива данных.

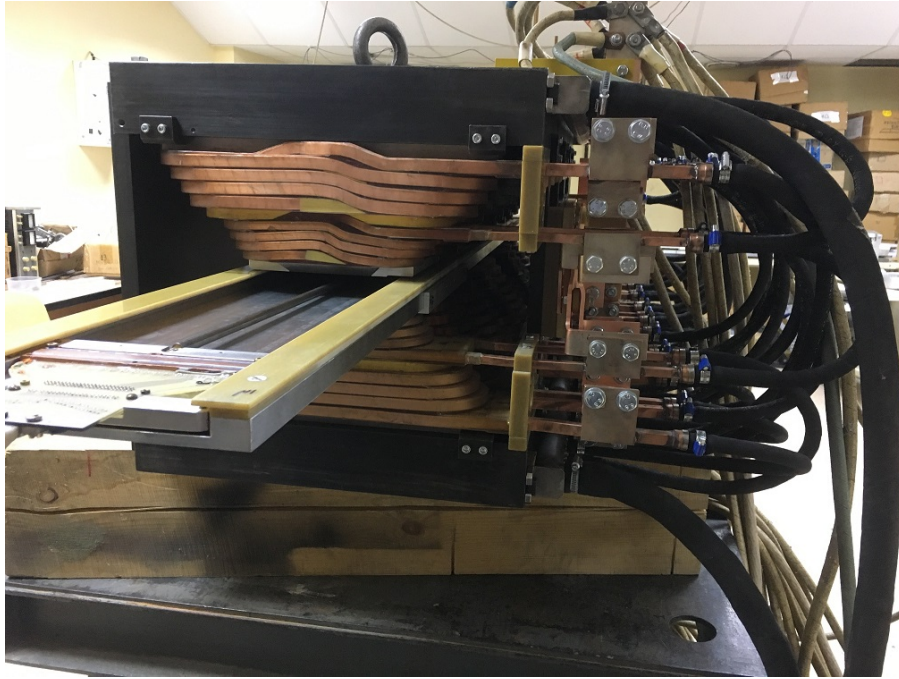


Рис. 3.8. Вигглер в процессе магнитных измерений.

Продольное распределение поля вигглера позволяет вычислить его интегральное значение вдоль орбиты пучка. Зная относительную среднеквадратичную точность определения продольной координаты положения каретки с датчиками и погрешность измерения поля датчиком Холла, относительную точность определения интеграла магнитного поля можно найти по следующей формуле:

$$\frac{\sigma_I}{I} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\left(\frac{N \cdot \sigma_l}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2}, \quad (3.1)$$

где  $N$  — количество шагов перемещения каретки,  $\sigma_l/L$  — относительная точность определения продольной координаты,  $\sigma_B/B$  — относительная точность измерения магнитного поля.

Используя формулу 3.1 можно оценить погрешность измерения интеграла поля. При двухстах шагах перемещения каретки с датчиками, даёт  $\frac{\sigma_I}{I} \approx 10^{-4}$ .

### 3.4. Результаты измерений

Основные задачи измерения магнитного поля гибридного вигглера при разных токах питания:

1. Определение продольного распределения магнитного поля.
2. Подбор токов коррекции боковых полюсов, для компенсации влияния поля вигглера на замкнутую орбиту пучка за пределами вигглера.
3. Определение поперечного распределения поля вигглера и нелинейных компонент поля для более точного моделирования движения частиц.

Каретка с датчиками Холла перемещалась в медианной плоскости ( $Y = 0$ ) вдоль вигглера с шагом 1 см, при этом на каждом шаге 17 датчиков Холла измеряли величину магнитного поля в зависимости от координаты датчика  $X$ . Продольное распределение вертикального поля на разных токах вигглера для центрального датчика, расположенного на оси устройства, показано на рисунке 3.9. Размер области сканирования брался заведомо больше, чем магнитная длина гибридного вигглера (на 50 см с каждой стороны), чтобы учесть спадающий (нарастающий) край поля магнита.

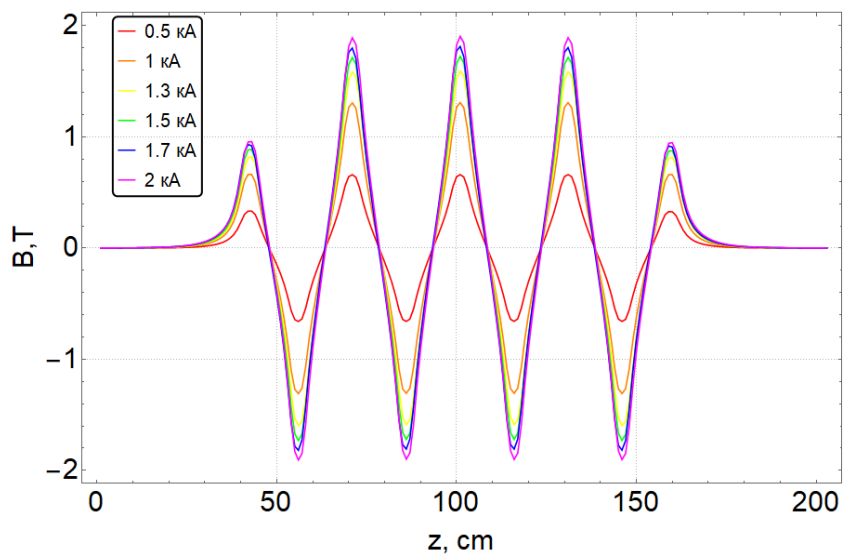


Рис. 3.9. Продольное распределение вертикальной компоненты магнитного поля вигглера при разных токах.

Другим важным аспектом измерения магнитного поля вигглера является определение поперечного распределения вертикальной составляющей поля в медианной плоскости. Измеренный профиль вертикальной составляющей поля вигглера в медианной плоскости при максимальном токе в катушках показан на рисунке 3.10. Без постоянных магнитов максимальное магнитное поле составляет 1.75 Тл. Постоянные магниты увеличивают поле на 0.155 Тл (что хорошо совпадает с результатами моделирования поля Главы 2) до 1.905 Тл [15].

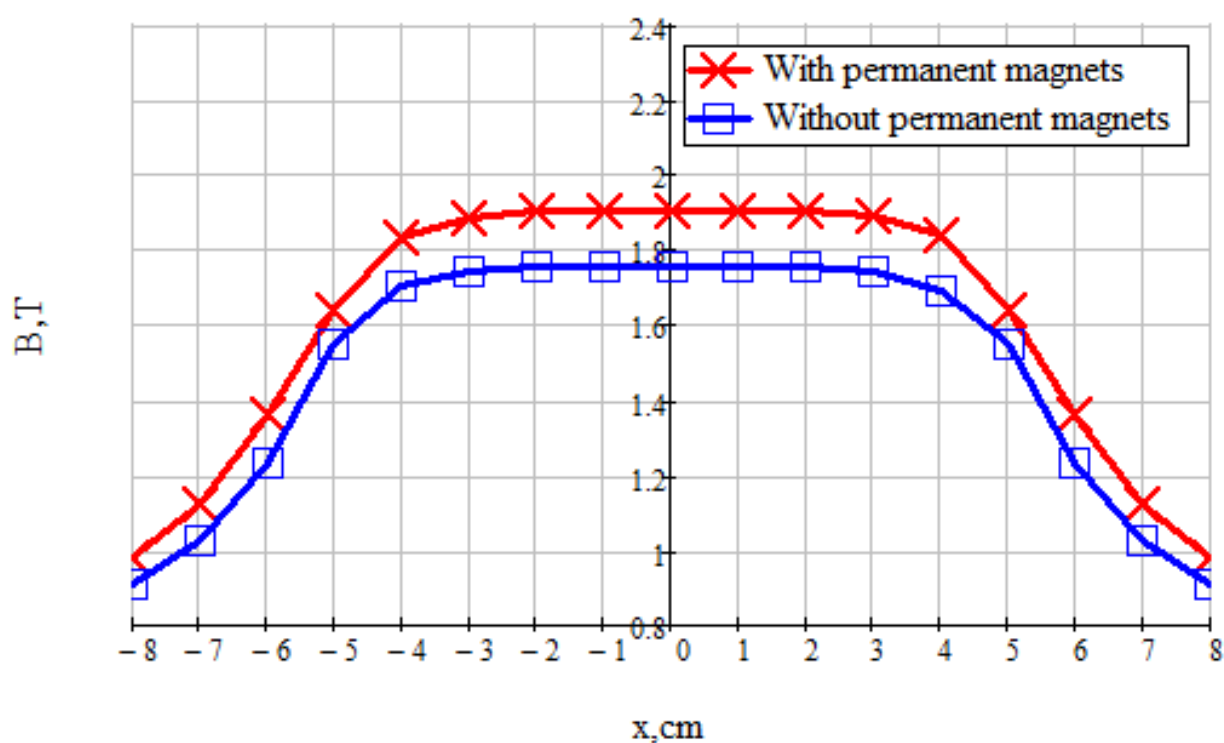


Рис. 3.10. Поперечное распределение вертикальной компоненты поля в центральном сечении полюса вигглера со снятыми (синяя кривая) и поставленными (красная кривая) постоянными магнитами.

Из рисунок 3.10 видно, что поле в горизонтальной области  $\pm 3$  см достаточно однородно. Измеренное продольное распределение мультипольных компонент представлено на рисунке 3.11.

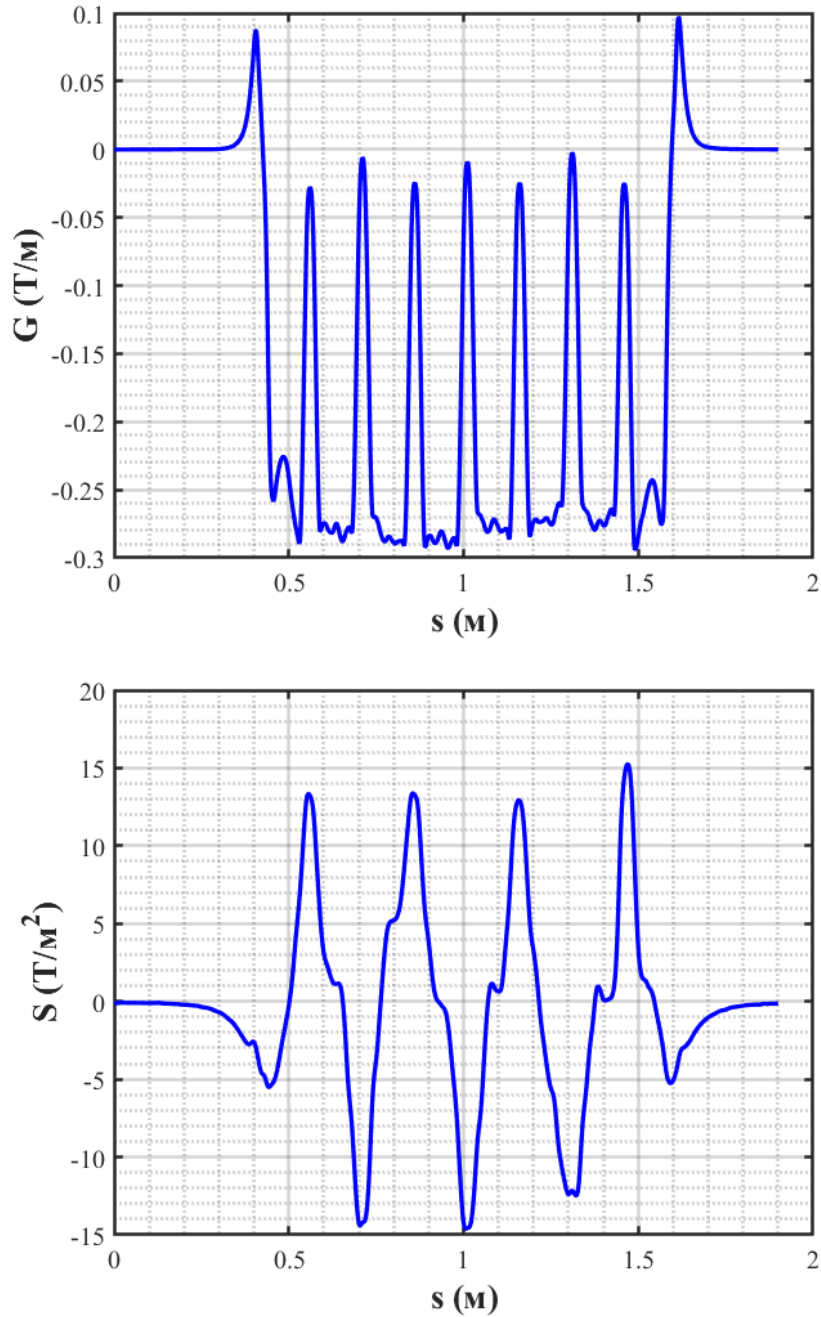


Рис. 3.11. Измеренное распределение мультипольных компонент поля в вигглере при 2 кА в катушках возбуждения.

Результаты измерений достаточно хорошо совпадают с моделированием распределения поля гибридного вигглера (рисунок 2.17). Вместе с тем, отличие поля от расчётного показывает уровень погрешностей использованных материалов (магнитов), их позиционирования, сборки, неоднородность насыщения ярма и т.п. Отметим, что в отличие от ондулятора высокая точность периодичности магнитного поля для вигглера не требуется.

### 3.4.1. Оптимизация токов коррекции

Наличие постоянных магнитов и нелинейное насыщение ярма вигглера приводит к тому, что при изменении тока питания вигглера продольное распределение поля меняется, и орбита пучка может искажаться, что является нежелательным при подъёме поля, поскольку может приводить к гибели пучка. Для компенсации этого эффекта, как уже говорилось ранее, на крайних полюсах заложены две корректирующие катушки. Согласно 2.6, для того, чтобы поле вигглера минимально влияло на орбиту в ускорителе, необходимо занулить соответствующие интегралы поля, которые измерялись в зависимости от тока питания вигглера. Результаты измерений и оптимизации токов корректирующих обмоток приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Токи коррекции, необходимые для зануления 1 и 2 интеграла поля

Ток основного источника	Ток коррекции(вход)	Ток коррекции(выход)
2 кА	350 А	373 А
1.7 кА	179 А	206 А
1.5 кА	87 А	110 А
1.3 кА	27 А	34 А
1 кА	-20 А	-16 А
0.5 кА	-10 А	-4 А

Справедливость подбора корректирующих токов реальной измеренной конфигурации поля гибридного вигглера была проверена прямым моделированием орбиты пучка в вигглере. При этом численно решались уравнения движения в декартовой (привязанной к оси симметрии вигглера) системе ко-

ординат:

$$\begin{aligned}\gamma m \ddot{X} &= eB_y \dot{Z}, \\ \gamma m \ddot{Z} &= -eB_y \dot{X},\end{aligned}\tag{3.2}$$

где точка над координатой — это производная по времени.

Магнитное поле было взято из результатов измерений датчиками Холла, значение полей между измеренными точками получалось с помощью аппроксимации кубическими сплайнами по соседним узловым точкам. Результат решения 3.2 для максимального тока питания основных катушек вигглера показан на рисунке 3.12.

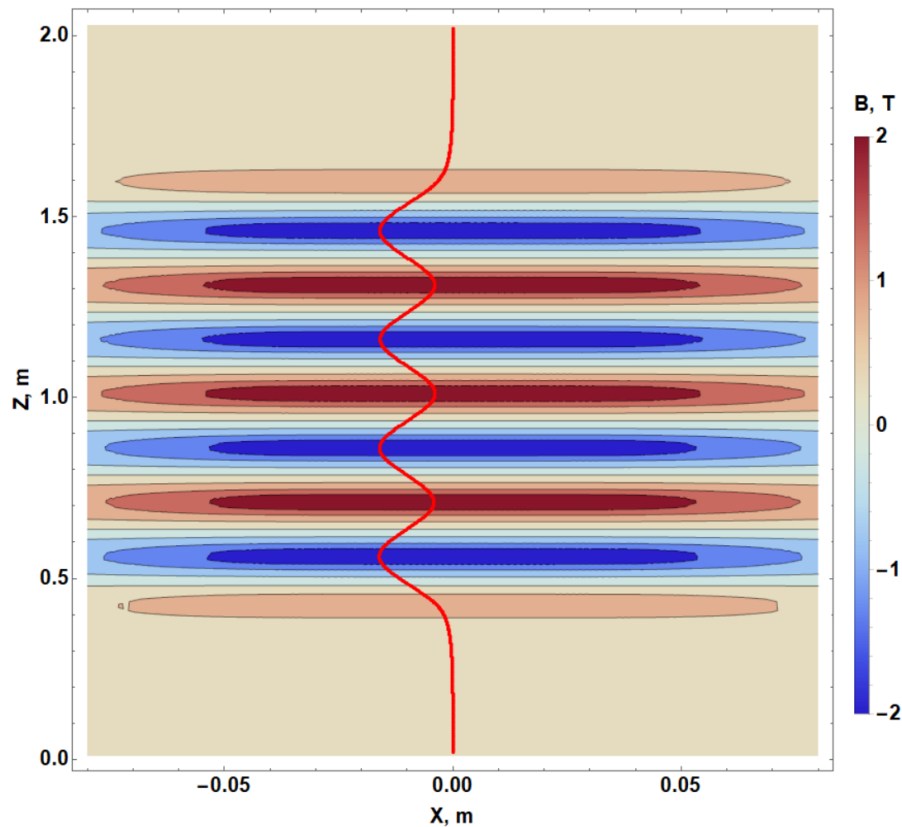


Рис. 3.12. Поле в вигглере и траектория пучка (красная линия). Координата "X" для траектории умножена на 10.

Максимальный вынос орбиты пучка (отклонение относительно оси вигглера) на максимальной токе составляет 1.5 мм при энергии пучка 1.9 ГэВ. Эту величину важно знать для проектирования вакуумной камеры в вигглере.



## Глава 4

# Оценка влияния гибридного вигглера на пучок ВЭПП-4М

Помимо искажения замкнутой орбиты пучка, обсуждавшегося выше, влияние вигглера на движение частицы в накопителе можно разделить на следующие основные направления:

1. Изменение фокусирующих свойств магнитной структуры (сдвиг бетатронной частоты, периодическое возмущение («биения») бетатронных функций вдоль кольца накопителя, изменение хроматизма и т.п.), вызванное линейной компонентой магнитного поля.
2. Изменение динамических параметров пучка (зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды, ограничение динамической апертуры и т.д.) нелинейными составляющими поля вигглера.
3. Изменение радиационных параметров (эмиттанса, энергетического разброса, времени затухания бетатронных и синхротронных колебаний и т.д.) из-за дополнительной потери энергии частиц на синхротронное излучение в магнитном поле вигглера [18].

Следует отметить, что первые два эффекта имеют место даже если поле вигглера в поперечном направлении  $X$  однородно (т.е., полюса бесконечно широкие по горизонтали). Это происходит из-за продольной вариации поля в области краевых полей дипольных магнитов противоположного знака, которые частица пересекает под углом. В этом случае вигглер влияет на пучок только по вертикали и не влияет по горизонтали. Возникают своеобразная одномерная (вертикальная) фокусировка пучка и одномерная кубическая нелинейность — псевдооктуполь (в первом порядке малости).

В данной главе оценивается величина влияния гибридного вигглера на пучок в ВЭПП-4М аналитически, а затем с помощью численного моделирования.

#### 4.1. Расчётная модель поля гибридного вигглера

Для аналитических оценок воспользуемся известными формулами, описывающими распределение магнитного поля периодического вигглера (или ондулятора) с планарной симметрией и продольной зависимостью поля близкой к закону косинуса [37]:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{k_x}{k_y} B_0 sh(k_x x) sh(k_y y) cos(k_w s), \\ B_y &= B_0 ch(k_x x) ch(k_y y) cos(k_w s), \\ B_z &= -\frac{k_z}{k_y} B_0 ch(k_x x) sh(k_y y) sin(k_w s), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $B_0$  — амплитуда вертикального поля,  $(x, y, s)$  — координаты сопутствующей системы координат,  $k_w^2 = k_x^2 + k_y^2$ . Иногда такое описание поля вигглера называют моделью Хальбаха [42].

Вывод выражений, описывающих поле вигглера дан в Приложении А. Там же получены формулы, используемые в данной главе (для сдвига точки бетатронных частот, зависимости частоты бетатронных колебаний от амплитуды и т.д.). Для простоты оценки будем считать, что в горизонтальном направлении плоскопараллельные полюса гибридного вигглера бесконечны и поле однородно. Отметим, что ввиду высокой однородности поля вигглера по горизонтали в области движения пучка (о чем говорилось выше), такое приближение представляется оправданным.

Для аналитических оценок используем параметры, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Параметры вигглера для синусной модели

Кол-во периодов $N_w$	4
Средняя бета-функция в вигглере $\bar{\beta}_y$ , м	8
Средняя бета-функция в вигглере $\bar{\beta}_x$ , м	9
Средняя дисперсия в вигглере $\bar{\eta}_x$ , м	1.2
Энергия пучка, ГэВ	1.9
$V_{max}$ , Тл	1.905

Универсальным параметром, показывающим влияние вигглера на фокусировку пучка, может считаться сдвиг точки бетатронных частот по сравнению с выключенным вигглером. Для выбранного приближения горизонтально однородного поля изменяется только вертикальная бетатронная частота согласно (см. Приложение А):

$$\Delta\nu_y = \frac{N_w}{4k_w} \left( \frac{\bar{\beta}_y}{\rho_w^2} \right), \quad (4.2)$$

где  $N_w$  — число периодов вигглера,  $\bar{\beta}_y$  — средняя на длине вигглера вертикальная бета-функция,  $k_w = 2\pi/\lambda_w$ ,  $\rho_w$  — радиус кривизны орбиты пучка, соответствующий амплитуде поля. На рисунке 4.1 показана величина сдвига вертикальной бетатронной частоты, вызванного гибридным вигглером, в зависимости от энергии пучка в ВЭПП-4М. При расчёте использовались значения из таблицы 4.1. Отметим, что зависимость квадратичная, и на энергии инжекции ВЭПП-4М (1.9 ГэВ) смещение вертикальной бетатронной частоты достигает  $\Delta\nu_y = 3.4 \cdot 10^{-3}$ , что является заметной для магнитной структуры величиной, которую необходимо корректировать регулярными квадрупольными линзами магнитной структуры ВЭПП-4М.

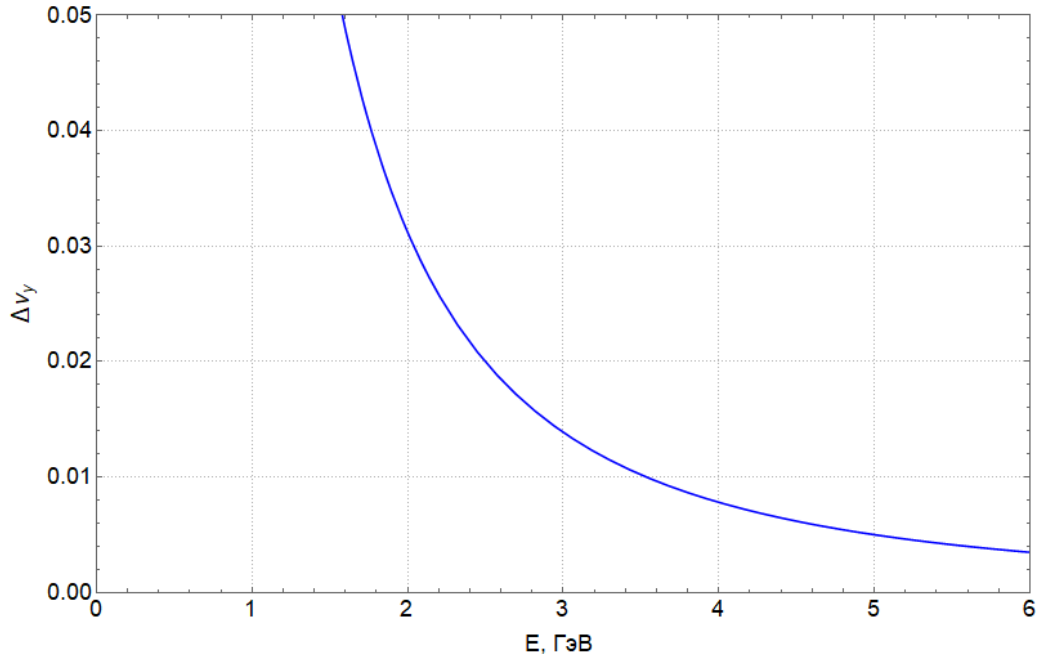


Рис. 4.1. Зависимость сдвига частоты вносимого вигглером от энергии.

Наличие нелинейных полей на орбите циклического ускорителя может приводить к появлению большого числа явлений, таких как зависимость бетатронных частот от амплитуды, ограничение области устойчивого движения, нелинейные резонансы и т.д. Критерия, позволяющего характеризовать «силу» таких явлений не существует. Простой (для вычисления, моделирования и измерения) оценкой величины нелинейного возмущения является зависимость частот бетатронных колебаний от амплитуды [43], которая в первом порядке теории возмущений описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\Delta\nu_x &= \alpha_{xx}J_x + \alpha_{xy}J_y, \\ \Delta\nu_y &= \alpha_{yy}J_y + \alpha_{xy}J_x,\end{aligned}\tag{4.3}$$

где  $J$  — переменная действия, зависящая от амплитуды бетатронных колебаний  $A$  как  $J = A^2/(2\beta)$ . При увеличении амплитуды колебаний частицы (например, вследствие взаимодействия с атомами остаточного газа в вакуумной камере накопителя) частота колебаний меняется и может достигать резонансных значений, а сама частица может стать неустойчивой. Ограничение устойчивой амплитуды движения приводит к появлению «динамической

апертуры» — устойчивой области фазового пространства, и чем меньше коэффициенты 4.3, тем больше может быть динамическая апертура.

Так же, как для линейного сдвига бетатронной частоты, рассмотренного выше, для однородного по горизонтали поля с амплитудой меняется только вертикальная бетатронная частота, и соответствующий коэффициент  $\alpha_{yy}$  вычисляется как:

$$\alpha_{yy} = N_w \frac{k_w}{4} \left( \frac{\bar{\beta}_y}{\rho_w} \right)^2. \quad (4.4)$$

При подстановке значений из таблицы 4.1 этот коэффициент равен  $\alpha_{yy} = 121 \text{ м}^{-1}$ . В таблице 4.2 представлены вклад в коэффициенты 4.3 от различных источников возмущений для ВЭПП-4М.

Таблица 4.2. Коэффициенты  $\alpha$  из 4.3

	$\alpha_{xx}, \text{ м}^{-1}$	$\alpha_{xy}, \text{ м}^{-1}$	$\alpha_{yy}, \text{ м}^{-1}$
Краевые поля	189	397	620
Секступольные линзы	34	-96	-552
Октупольные линзы	1170	-2940	1851

Для описания влияния гибридного вигглера на радиационные свойства пучка удобно воспользоваться формализмом структурных (или радиационных) интегралов, введённых в [44]. Эти интегралы зависят только от магнитной структуры ускорителя и не зависят от других параметров (например, энергии). С помощью радиационных интегралов можно рассчитать такие величины, как потеря частицей энергии на излучение, равновесный энергетический разброс, эмиттанс пучка и т.д. Общий вид интегралов, а также формулы для вычисления радиационных параметров пучка приведены в Приложении Б. Удобство интегрального представления заключается в том, что совместное действие магнитных систем кольца и вигглера можно описать двумя интегралами: отдельно по кольцу и, отдельно, по вигглеру [18].

Косинусная модель поля вигглера позволяет легко вычислить структурные интегралы по длине вигглера (приложение Б). Значения этих интегралов для гибридного вигглера и, для сравнения, интегралов для магнитной структуры ВЭПП-4М без вигглера приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Радиационные интегралы вносимые вигглером согласно синусной модели (энергия 1.9 ГэВ)

	Вигглер	ВЭПП-4М
$I_{2w}, \text{ м}^{-1}$	0.054	0.198
$I_{3w}, \text{ м}^{-2}$	0.014	0.0073
$I_{4w}, \text{ м}^{-1}$	$8 \cdot 10^{-6}$	-0.027
$I_{5w}, \text{ м}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0.001

На рисунках 4.2 – 4.4 приведены зависимости горизонтального эмиттанса, энергетического разброса и потери энергии частиц за оборот в ВЭПП-4М с учётом излучения из гибридного вигглера как функции поля вигглера.

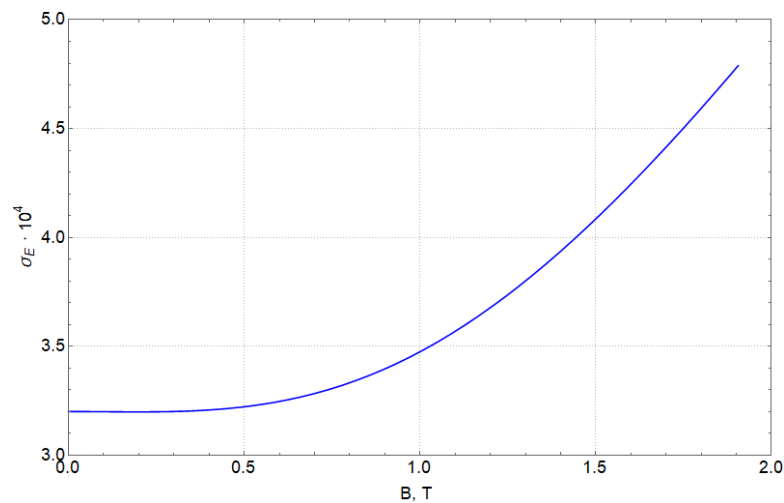


Рис. 4.2. Зависимость энергетического разброса от поля в вигглере (энергия 1.9 ГэВ).

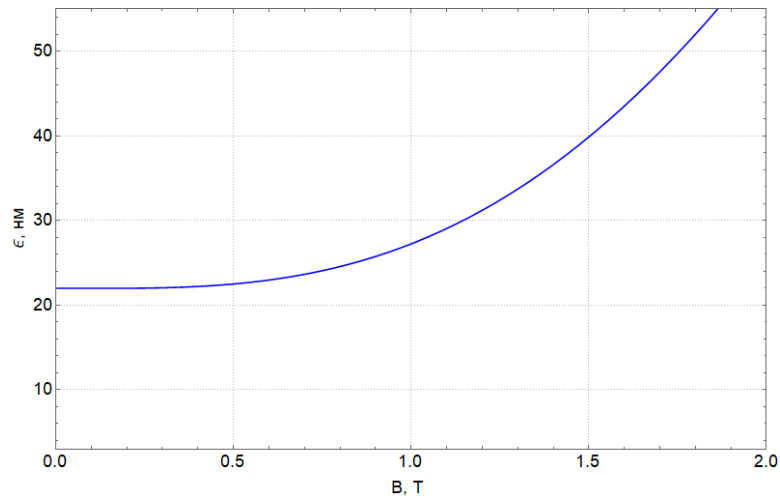


Рис. 4.3. Зависимость эмиттанса ВЭПП-4М от поля в вигглере (энергия 1.9 ГэВ).

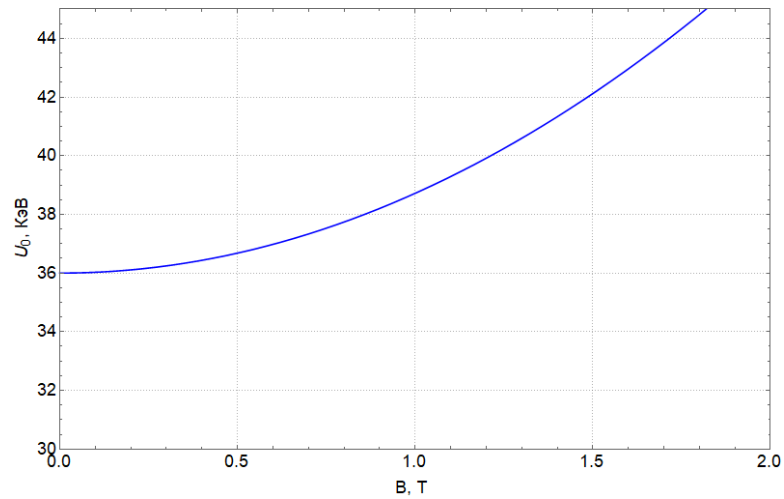


Рис. 4.4. Потери энергии за оборот в ВЭПП-4М от поля в вигглере (энергия 1.9 ГэВ).

В таблице 4.4 даны значения радиационных параметров ВЭПП-4М на энергии  $E = 1.9$  ГэВ с включенным на максимальное поле гибридным вигглером.

Таблица 4.4. Радиационные параметры структуры ВЭПП-4М с вигглером и без него (энергия 1.9 ГэВ)

	ВЭПП-4М	ВЭПП-4М + вигглер
$\sigma_E$	0.00032	0.00047
$\epsilon$ , нм · рад	24	55
$U_0$ , кэВ	36	45

## 4.2. Модель вигглера для расчётов линейной оптики

Для численного моделирования оптики и динамики пучка в ВЭПП-4М использовалась программа MAD-X [45], которая позволяет решать широкий спектр задач линейной и нелинейной оптики, синхротронного излучения, оптимизации магнитной структуры и т.д.

Для ускорения времени моделирования была разработана простая модель гибридного вигглера с кусочно-постоянными магнитами.

Поскольку MAD-X работает в кусочно-постоянном приближении, необходимо описать модель вигглера в этом варианте. Важно, чтобы измеренные интегралы поля были учтены при построении этой модели. Для учёта синусоподобного поведения поля в вигглере, можно представить половину периода вигглера как набор дипольных магнитов с плоскопараллельными краями. Краевая фокусировка будет создавать сдвиг вертикальной частоты [46], интегралы магнитного поля позволят учесть влияние на энергетический разброс, орбиту и радиационные интегралы ускорителя.

Таким образом, половина периода вигглера описывалось тремя кусочно-постоянными магнитами, как показано на рисунке 4.5.

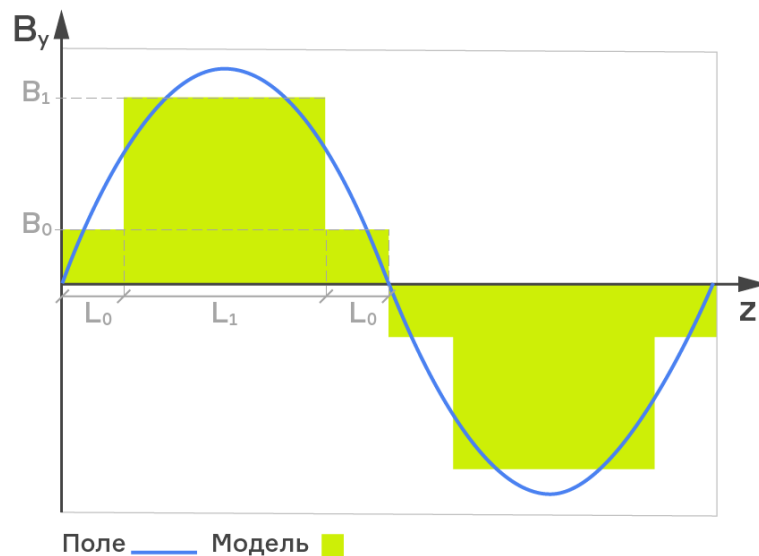


Рис. 4.5. Модель поля вигглера одного полупериода, состоящая из 3-х магнитов.

Центральный магнит длиной  $L_1$  и полем  $B_1$ , а также два боковых маг-



нита с полем  $B_0$  и длиной  $L_0$  каждый. Такая модель позволит добиться сохранения угла поворота, 2-го и 3-го радиационного интеграла, если значение длин и полей магнитов модели находить из следующих соотношений (4.5):

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{1}{B\rho} \int B_y(s) ds = \frac{2B_0 \cdot L_2 + B_1 \cdot L_1}{B\rho}, \\ I_2 &= \frac{1}{(B\rho)^2} \int B_y(s)^2 ds = \frac{2B_0^2 \cdot L_2 + B_1^2 \cdot L_1}{(B\rho)^2}, \\ I_3 &= \frac{1}{(B\rho)^3} \int B_y(s)^3 ds = \frac{2B_0^3 \cdot L_2 + B_1^3 \cdot L_1}{(B\rho)^3},\end{aligned}\quad (4.5)$$

где  $\theta$  — угол поворота полупериода вигглера,  $I_2$  и  $I_3$  — второй и третий радиационный интеграл (Приложение Б),  $B\rho$  — магнитная жёсткость.

с учётом того что  $L_0 = \frac{\lambda_w - L_1}{2}$ , получим:

$$B_0 = \frac{2I_1I_2 - I_3\lambda_w + K}{4I_1^2 - 2I_2\lambda_w}, \quad B_1 = \frac{2I_1I_2 - I_3\lambda_w - K}{4I_1^2 - 2I_2\lambda_w}, \quad (4.6)$$

$$L_1 = \frac{8I_3^3 - 6I_1I_2\lambda_w + \lambda_w(I_3\lambda_w + K)}{4K}, \quad (4.7)$$

где  $K = \sqrt{I_3^2\lambda_w^2 - 12(I_1^2I_2^2 + I_1I_2I_3\lambda_w) + 16I_1^3I_3 + 8I_2^3\lambda_w}$ ,  $\lambda_w$  — период вигглера.

Кусочно-постоянная модель, описанная выше позволяет использовать экспериментально полученные данные о продольном распределении поля в вигглере [15], и максимально точно учесть эффекты реального распределения поля.

В таблице 4.5 представлены параметры магнитов в кусочно-постоянной модели от различных токов в вигглере, которые получены из магнитных измерений.

Таблица 4.5. Параметры магнитов для модели вигглера

Ток, А	Максимальное поле, Т	$B_0$ , Т	$L_0$ , см	$B_1$ , Т	$L_1$ , см
2000	1.905	0.403	3.83	1.636	7.33
1700	1.81928	0.384	3.84469	1.559	7.31062
1500	1.72571	0.364	3.8475	1.481	7.305
1300	1.59471	0.336	0.0385576	1.368	7.28848
1000	1.31099	0.277	3.85	1.127	7.2957
500	0.662242	0.141	3.8448	0.571	7.3104

### 4.2.1. Возмущение оптических функций

Как уже говорилось, вигглер возмущает оптические функции ускорителя. На рисунке 4.6 показаны результаты моделирования оптических функций N-вставки с вигглером и без. Моделирование проводилось на энергии инжекции 1.9 ГэВ.

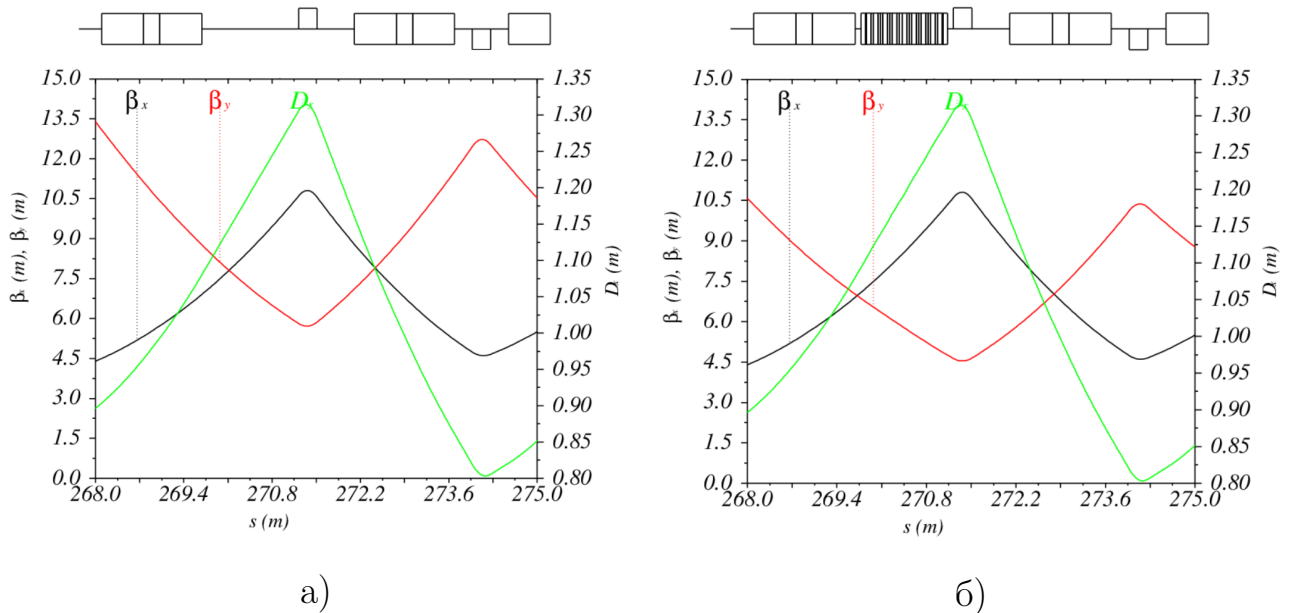


Рис. 4.6. Оптические функции между элементами NIL4 -NIL3 без вигглера (а). С установленным вигглером (б).

Из рисунка 4.6 хорошо видно, что вигглер заметно возмущает вертикаль-

ную бета-функцию, как это и должно быть согласно простым модельным соображениям. На рисунке 4.7 показано относительное изменение вертикальной бетатронной функции вдоль кольца; максимальное значение искажения бета-функции достигает 25 %. Очевидно, что искажение бета-функции приводит и к сдвигу вертикальной бетатронной частоты.

Модельная зависимость изменения вертикальной частоты бетатронных колебаний от амплитуды поля гибридного вивглера приведена на рисунке 4.8.

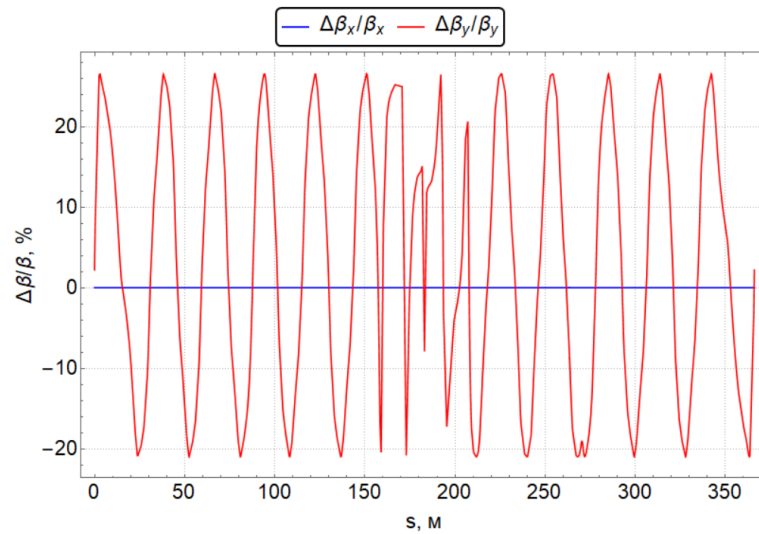


Рис. 4.7. Возмущение вертикальной бета-функции при включённом вивглере.

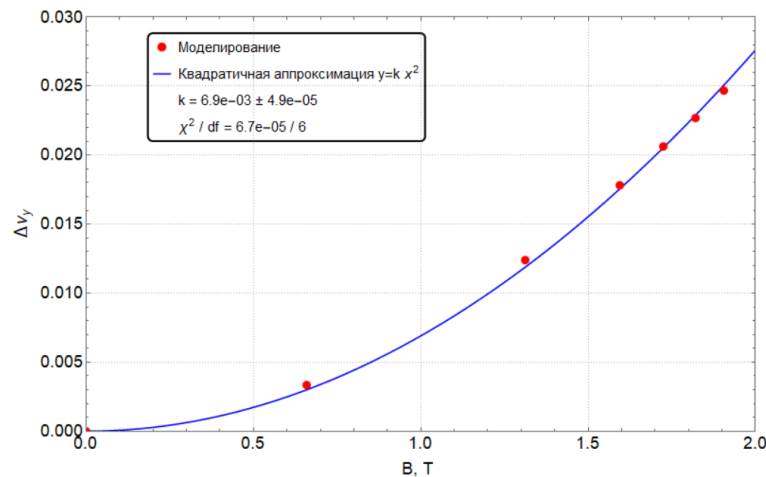


Рис. 4.8. Смоделированный сдвиг частоты от поля в вивглере по результатам магнитных измерений.

Возмущение  $\beta_y$  можно скомпенсировать квадрупольными линзами NIL1-NIL4, размещенными недалеко от гибридного вивглера (рисунок 1.3),

а изменение бетатронной частоты — элементами периодичности F7 и D7. Поскольку вигглер вносит возмущение только по вертикали, а корректирующие квадрупольные линзы влияют на обе поперечные координаты, коррекция оптики по вертикали приводит к появлению возмущения в горизонтальном направлении. Однако, найденная схема коррекции даёт вне вигглера очень небольшое возмущение  $\beta_x$ , как это следует из графика 4.9. Видно, что результирующее изменение бетатронных функций по всему кольцу не превышает 0.1%, кроме азимута вигглера, где отклонение бета-функций достигает 10%. Однако такое локальное возмущение не приводит к серьёзным последствиям для оптики пучка в ВЭПП-4М.

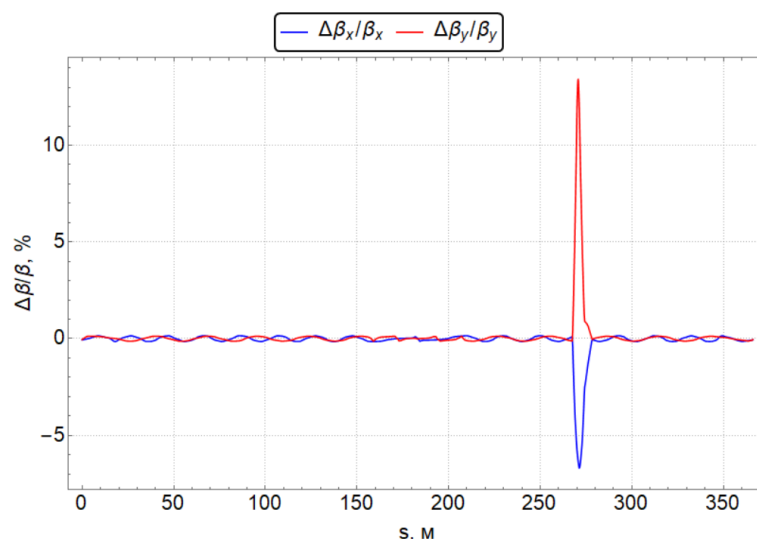


Рис. 4.9. Изменение бета-функций после коррекции возмущения от вигглера.

#### 4.2.2. Влияние гибридного вигглера на радиационные параметры ВЭПП-4М

Моделирование влияния гибридного вигглера на радиационные параметры ВЭПП-4М проводилось для кусочно-постоянного представления поля, разработанного выше. Расчёты проводились на энергии 1.9 ГэВ. Результаты приведены в таблице 4.6. Здесь же даны параметры ВЭПП-4М без вигглера, а также, оценки, сделанный из простой косинусной модели поля вигглера. Результаты оценки и моделирования достаточно хорошо совпадают.

Таблица 4.6. Параметры структуры с включённым вигглером. Энергия 1.9 ГэВ

	ВЭПП-4М	Синусная модель	Модель по Маг. Изм.
$\nu_x$	8.54	8.54	8.54
$\nu_y$	7.58	7.614	7.605
$I_1(\text{м})$	6.12	6.12	6.12
$I_2(\text{м}^{-1})$	0.198	0.252	0.236
$I_3(\text{м}^{-2})$	0.0073	0.0213	0.0165
$I_4(\text{м}^{-1})$	-0.027	-0.027	-0.027
$I_5(\text{м}^{-1})$	0.001	0.003	0.0026
$U_0(\text{КэВ})$	36.3	47	42
$\epsilon(\text{нм} \cdot \text{рад})$	24	54	51
$\frac{\sigma}{E} \cdot 10^4$	3.2	4.4	4.3

Поскольку вигглер ставится в прямолинейный промежуток, где нет возможности занулить собственную дисперсионную функцию кольца, поле вигглера существенно увеличивает эмиттанс пучка электронов.

## Экспериментальное изучение влияния гибридного вигглера на пучок электронов в ВЭПП-4М

Изучение влияния гибридного вигглера на пучок ВЭПП-4М проводилось на энергии 1.9 ГэВ при максимальном поле (или вплоть до максимального поля) в вигглере и включало в себя следующие исследования:

1. Измерение замкнутой обреты пучка в процессе подъёма поля вигглера при выключенных источниках питания коррекции. Ставилась задача выяснить справедливость проделанных выше оценок, а также уточнить, до какого тока питания основных катушек можно поднять поле в вигглере не используя коррекцию.
2. Изучение влияния вигглера на линейную оптику. Измерялись бетатронные частоты в зависимость от величины амплитуды магнитного поля гибридного вигглера. Измерения сравнивались с теоретическими оценками.
3. Изучение влияния вигглера на нелинейную динамику пучка. Измерялся сдвиг вертикальной бетатронной частоты в зависимости от амплитуды бетатронных колебаний. Полученные данные сравнивались с результатами моделирования.
4. Измерение радиационных параметров пучка (энергетический разброс, горизонтальный эмиттанс).

## 5.1. Искажение замкнутой орбиты полем гибридного вигглера

Измерение замкнутой орбиты пучка на ВЭПП-4М осуществляется с помощью 54 электростатических датчиков (пикап-электродов), распределенных по периметру кольца [47]. Описание датчиков положения пучка и их характеристики были даны в Главе 1.

Измерения проводились на энергии инжекции 1.9 МэВ при полном токе питания основных катушек гибридного вигглера. Чтобы увидеть как сильно вигглер искажает равновесную орбиту, измерения проводились с выключенными источниками питания катушек коррекции. Орбита при выключенном вигглере, заранее измеренная, бралась за референсную, и вычиталась из показаний электростатических датчиков при включённом вигглере. Таким образом, мы получали разностную орбиту, показывающую влияние гибридного вигглера.

Результаты измерений приведены на графиках ниже (рисунки 5.1 – 5.4). Для сравнения показана расчётная разностная орбита, полученная с помощью моделирующей программы MAD-X, для структуры ВЭПП-4М и модели поля вигглера, описанной в Главе 4.

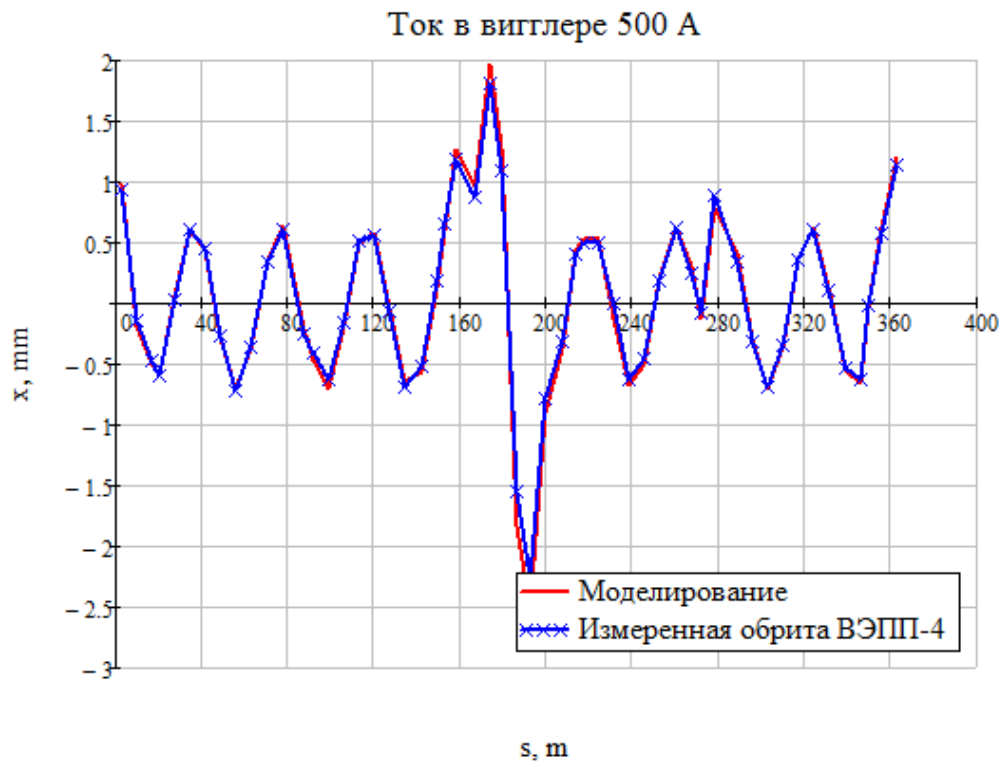


Рис. 5.1. Ток вигглера 500 А.

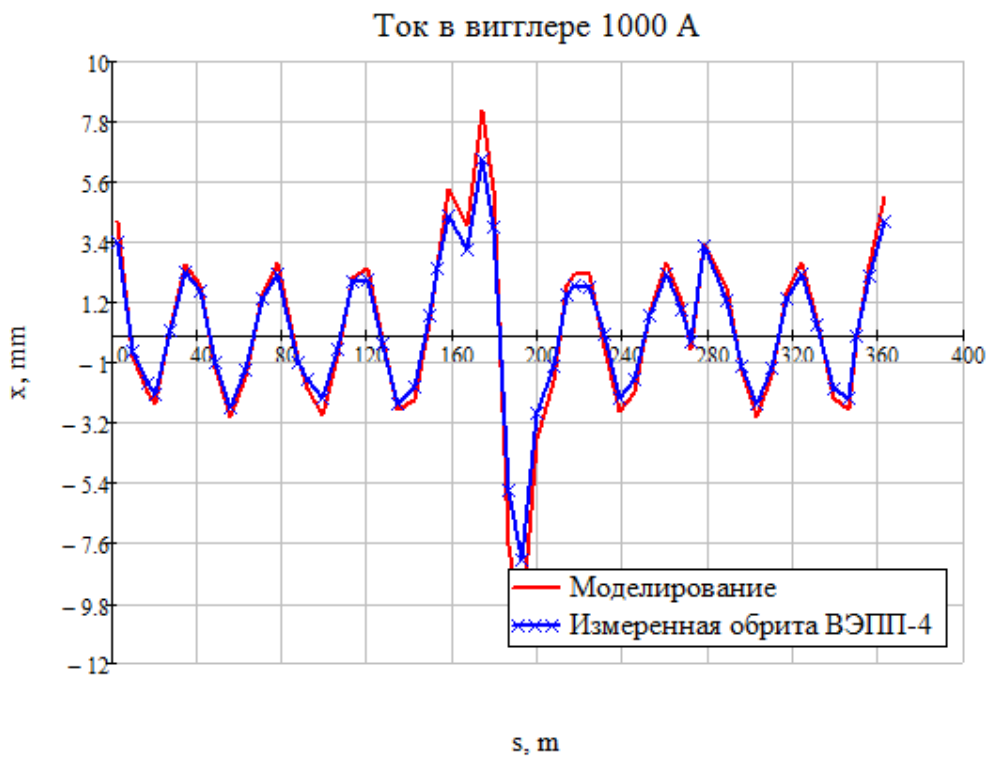


Рис. 5.2. Ток вигглера 1000 А.



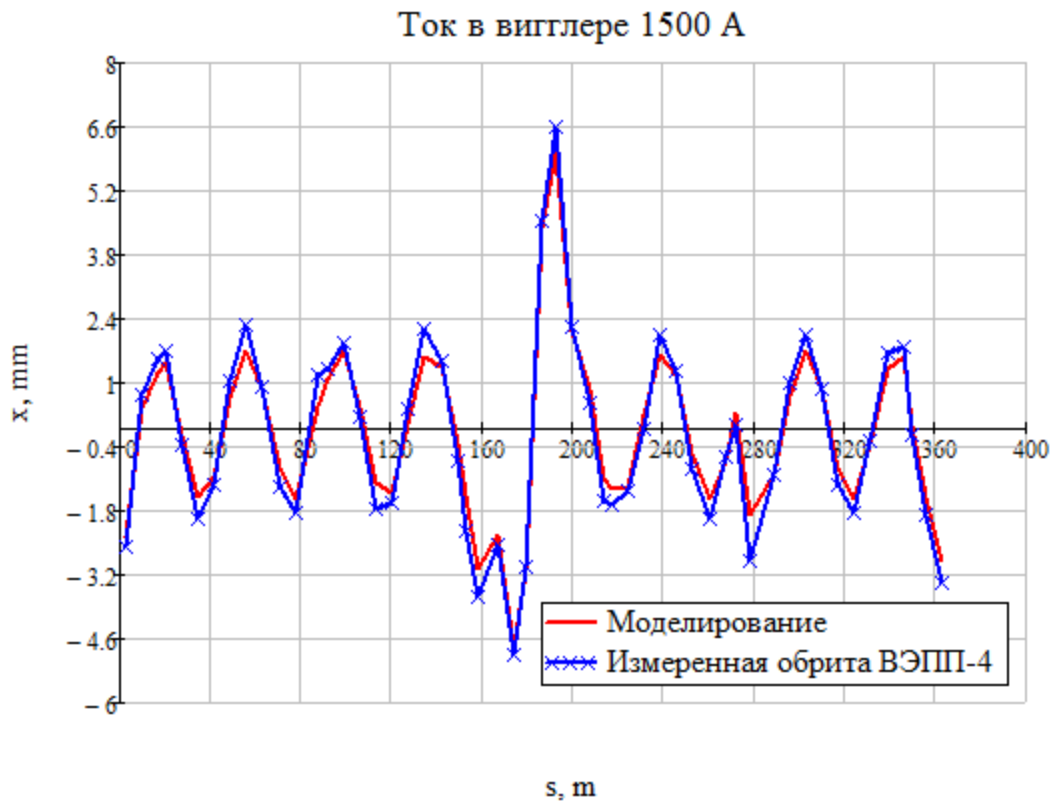


Рис. 5.3. Ток вигглера 1500 А.

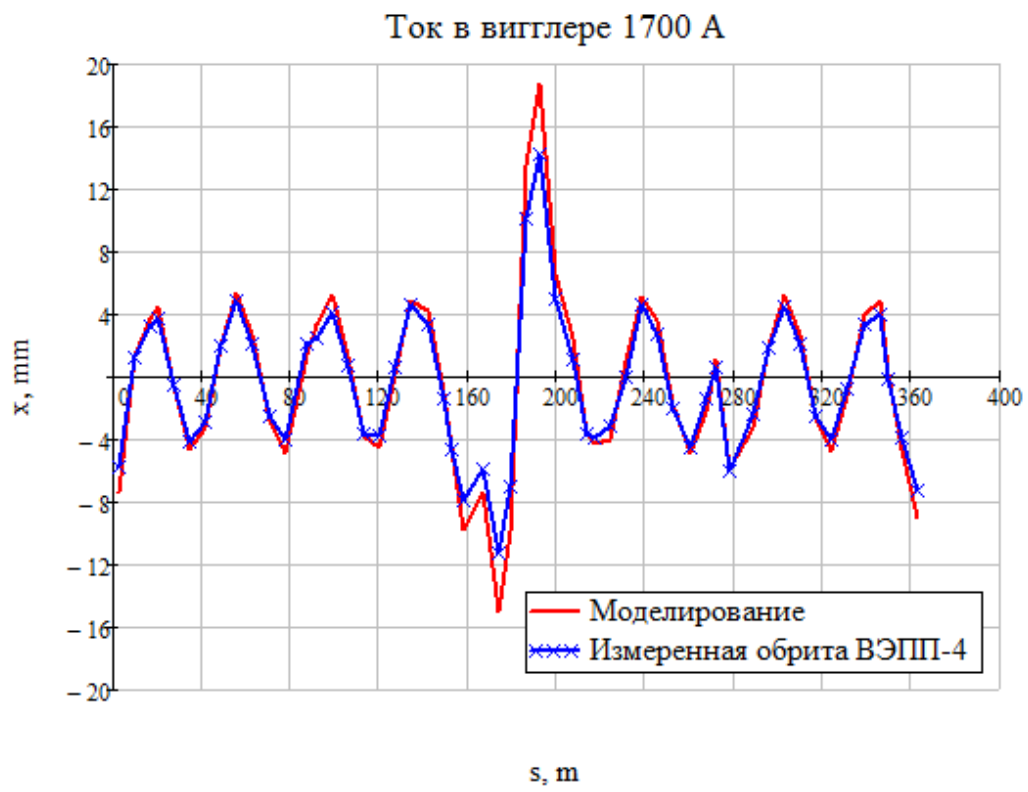


Рис. 5.4. Ток вигглера 1700 А.

Из результатов измерений видно, что они хорошо совпадают с результатами численного моделирования. В соответствии с данными магнитных измерений (таблица 2.2), из-за насыщения ярма вигглера, в районе тока питания основных катушек 1500 А первый и второй интегралы поля вигглера меняют знаки (см. таблицу 2.2). Измерения подтверждают эти результаты: сравнивая поведение замкнутой орбиты при токах питания гибридного вигглера 1000 А и 1500 А можно увидеть, что показания пикап-электродов меняют знак, в соответствии со сменой знака дипольного возмущения.

После тока питания 1700 А без введённых коррекций искажение орбиты становится столь большим, что пучок гибнет. Включение корректирующих катушек расчётным образом полностью исправляет замкнутую орбиту: за пределами вигглера она практически не отличается от невозмущенной.

## 5.2. Сдвиг частоты

Изучение влияния поля гибридного вигглера на линейную оптику пучка в ВЭПП-4М проводилось при энергии инжекции (1.9 ГэВ); ток пучка выдерживался постоянным и малым, около 1 мА. При этом чувствительность датчиков уже достаточно высока для надёжных измерений, но коллективные эффекты, которые также сдвигают бетатронную частоту, ещё слабы. Зависимость бетатронной частоты от тока пучка была измерена и составляет:

$$\begin{aligned}\Delta\nu_x(I) &= -0.0001 \cdot I, \\ \Delta\nu_y(I) &= -0.0014 \cdot I,\end{aligned}\tag{5.1}$$

где  $I$  — ток в мА.

Для измерения частоты возбуждались когерентные бетатронные колебания пучка коротким импульсом электромагнитного поля. Для этого в горизонтальном направлении использовались пластины кикера, запитанные от формирующей линии, управляемой водородным тиратроном, которая созда-

ёт синусоидальный импульс с полупериодом равным 50 нс и максимальной амплитудой 30 кВ. Вертикальный удар осуществляется инфлектором инъекции позитронов. Амплитуда и длительность его импульса 25 кВ и 150 нс соответственно.

Напомним, что невозмущенные бетатронные частоты (см. таблицу 1.1) равны  $\nu_x = 8.54$ ,  $\nu_y = 7.58$ . Когерентные колебания малой (около 1 мм) амплитуды (чтобы не учитывать нелинейную зависимость частоты от амплитуды) измерялись однооборотным датчиком положения пучка в течение 1024 оборотов. Преобразование Фурье полученной координатной последовательности позволяет определить нецелую часть бетатронной частоты. Характерный сигнал с пикап-электрода показан на рисунке 5.5. Уменьшение амплитуды колебаний с номером оборота связано не с радиационным затуханием (для этого время затухания слишком велико — 139 мс для вертикальной плоскости), а с раскогерениванием пучка из-за наличия зависимости частоты колебаний от амплитуды. Фурье-спектр этого сигнала приведён на рисунке 5.6; хорошо видны пики вертикальной и горизонтальной (из-за наличия линейной связи бетатронных колебаний) бетатронной частот. Напомним, что быстрое преобразование Фурье даёт  $N$  гармоник в спектре и гармоники симметричны относительно центра графика. Точность определения бетатронной частоты при измерениях составляла около  $10^{-5}$ .

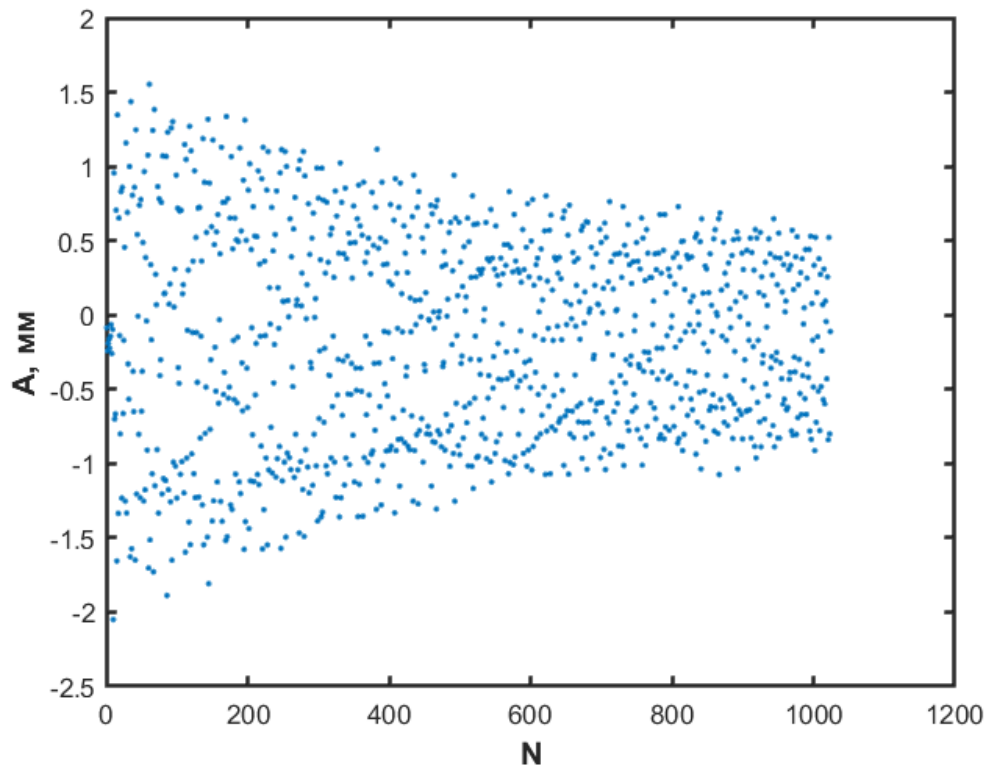


Рис. 5.5. Когерентные колебания пучка на одном из датчиков положения пучка, возбуждённые коротким импульсом.

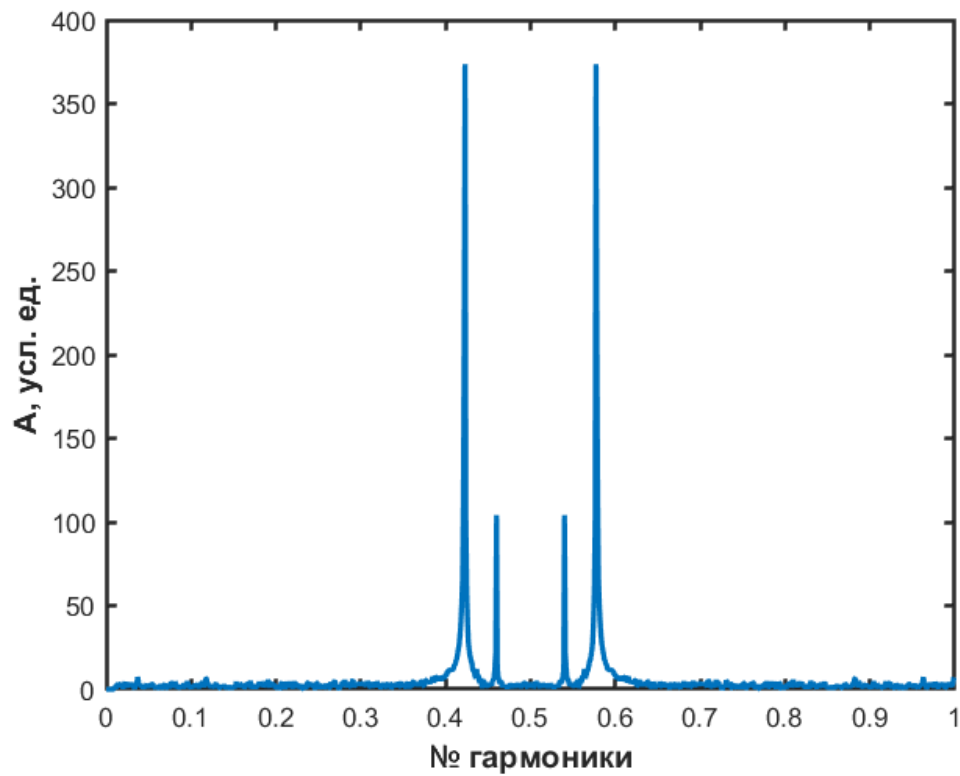


Рис. 5.6. Спектр Фурье сигнала с рисунка 5.5.

На рисунке 5.7 показан измеренный сдвиг вертикальной бетатронной частоты (точки) в зависимости от амплитуды поля в вигглере. Гладкая кривая представляет результаты аппроксимации измеренных точек квадратичной функцией.

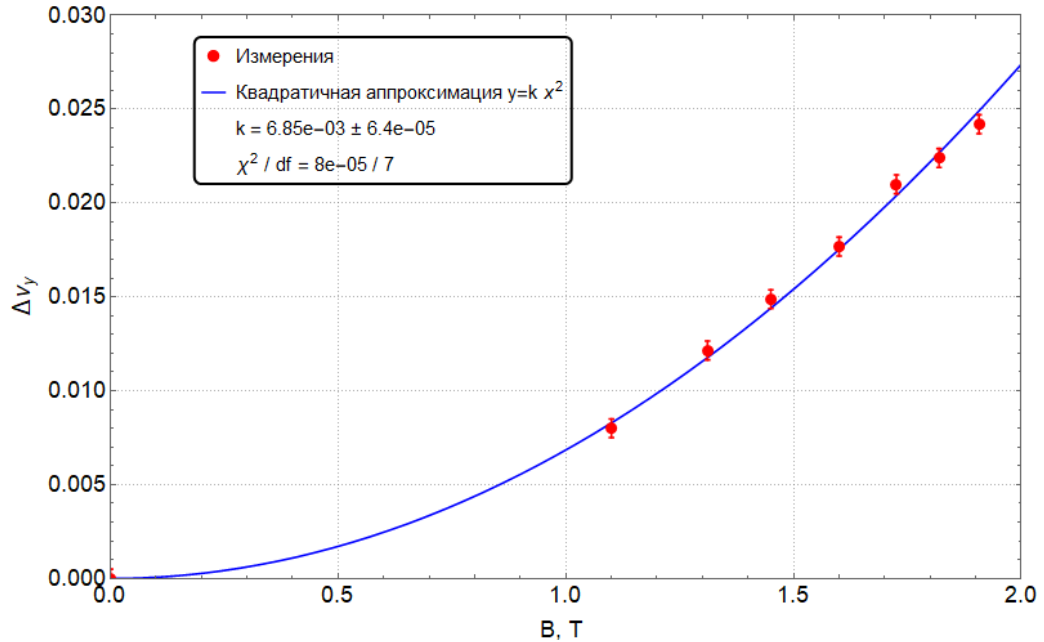


Рис. 5.7. Сдвиг вертикальной бетатронной частоты в вигглере.

Видно, что измеренное поведение вертикальной бетатронной частоты от поля вигглера хорошо согласуется с результатами моделирования, приведёнными в главе 4.

В таблице 5.1 представлена измеренная зависимость вертикальной бетатронной частоты от тока в вигглере.

Таблица 5.1. Измеренный сдвиг частот в зависимости от поля и тока вигглера

B, T	I, A	$\Delta\nu_x$	$\Delta\nu_y$
0	0	0	0
1.1	1200	0	0.008
1.31	1400	0	0.0121
1.45	1600	0	0.0149
1.6	1700	0	0.0179
1.72	1800	0	0.021
1.82	1900	0	0.0224
1.907	2000	0	0.0242

Измерения горизонтальной бетатронной частоты показали, что, как и предсказывает теория, она не зависит от поля в вигглере.

### 5.3. Измерение зависимости частоты бетатронных колебаний от амплитуды

Зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды является простой характеристикой, позволяющей оценить вклад различного рода возмущений в нелинейное движение пучка. В предыдущей главе были проведены аналитические и численные оценки такой зависимости для гибридного вигглера. Результаты экспериментальной проверки этих оценок приводятся в этом разделе.

Измерения проводились так же, как в предыдущем параграфе: коротким электромагнитным импульсом возбуждались бетатронные колебания пучка как целого с заданной амплитудой. Пооборотные измерения координаты с 54-х датчиков положения пучка обрабатывались, и с помощью преобразова-

ния Фурье определялась частота колебаний. В каждой точке по координате делалось несколько измерений и результирующая частота получалась путём усреднения по всем пикапам и по серии измерений.

При измерениях нужно учитывать следующие факторы. Магнитная структура ВЭПП-4М содержит нелинейные магнитные элементы — секступольные линзы, корректирующие натуральный хроматизм и октупольные линзы, необходимые для подавления когерентных неустойчивостей («затухание Ландау») и получения большого тока в сгустке [46]. Эти нелинейности так же вносят зависимость частоты от амплитуды, и влияние гибридного вигглера необходимо отделить от влияния этих магнитов.

Регулярные нелинейные элементы ВЭПП-4М включают в себя:

- Две пары сосредоточенных секступольных линз, расположенных в экспериментальном прямолинейном промежутке симметрично относительно точки встречи: NES1 и SES1, NES2 и SES2.
- Секступольные коррекции в элементах периодичности. По 32 вертикальных и горизонтальных коррекции объединены по питанию в два семейства DS и FS.
- Сеступольная компонента в профиле полюса F7 и D7 элемента периодичности.
- Сосредоточенные октупольные магниты вблизи места встречи (SEOQ и NEOQ).

Параметры (магнитная длина элемента, коэффициент зависимости силы мульти-поля от тока, максимальный ток источника питания и расчётные оптические функции.) секступольных коррекций приведены в таблице 5.2, а октупольных — в таблице 5.3.

Таблица 5.2. Источники секступольных возмущений в кольце ВЭПП-4М

	$L$ , см	$K$ , Гс/см <sup>2</sup> /А	$I_{max}$ , А	$\beta_{x,М}$	$\beta_{y,М}$	$\eta,М$
FS	34.2	0.05	700	10.1	6.4	0.8
DS	34.2	0.05	700	4.6	13.4	0.8
SES1, NES1	20	5.06	20	40	93	1.2
SES2, NES2	20	1.43	20	124	19.5	1.9

Таблица 5.3. Источники октупольных возмущений в кольце ВЭПП-4М

	$L$ , см	$K$ , Гс/см <sup>3</sup> /А	$I_{max}$ , А	$\beta_{x,М}$	$\beta_{y,М}$
SEOQ, NEOQ	12	50	20	57	75

Оценка нелинейного влияния различных магнитных элементов ВЭПП-4М, полученная с помощью моделирования, приведена в таблице 4.2, откуда видно, что преобладающим источником изменения бетатронной частоты от амплитуды являются октупольные линзы.

Ещё одно соображение касается возмущения вигглером бетатронных функций ВЭПП-4М. На рисунке 5.8 показано расчётное (идеальное) поведение оптических функций накопителя, точками отмечены позиции датчиков положения пучка. На рисунке 5.9 показаны модельные графики оптических функций ВЭПП-4М, но искажённые гибридным вигглером (см., также, рисунки 4.7 и 4.9). Изменение оптических функций в местах размещения нелинейных магнитов накопителя (прежде всего, октупольных линз) приводит к тому, что меняется и зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды. Собственный вклад нелинейных полей гибридного вигглера должен определяться с учётом этого эффекта.



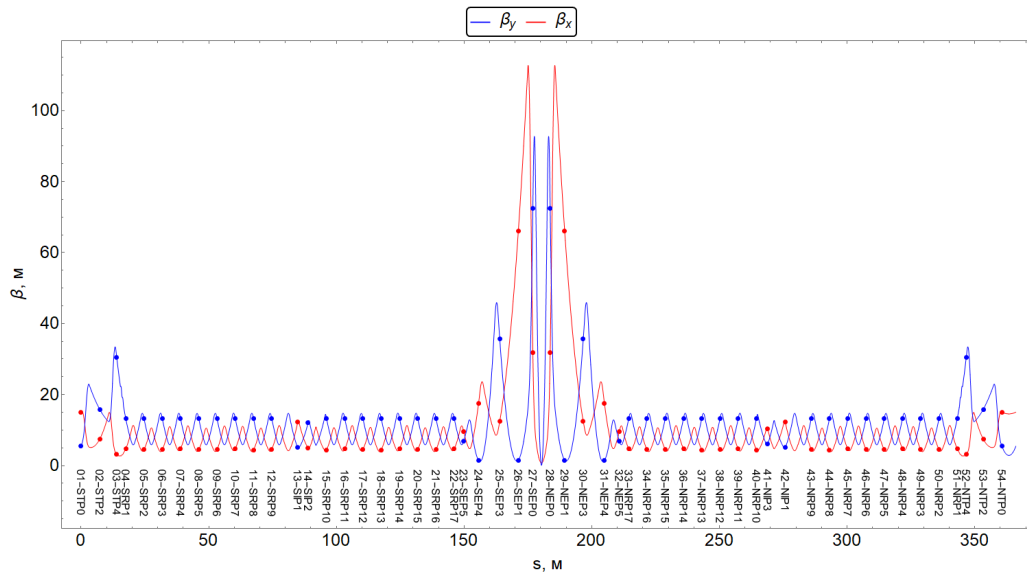


Рис. 5.8. Базовая оптика ВЭПП-4М. Точками показаны бета-функции на пикапах.

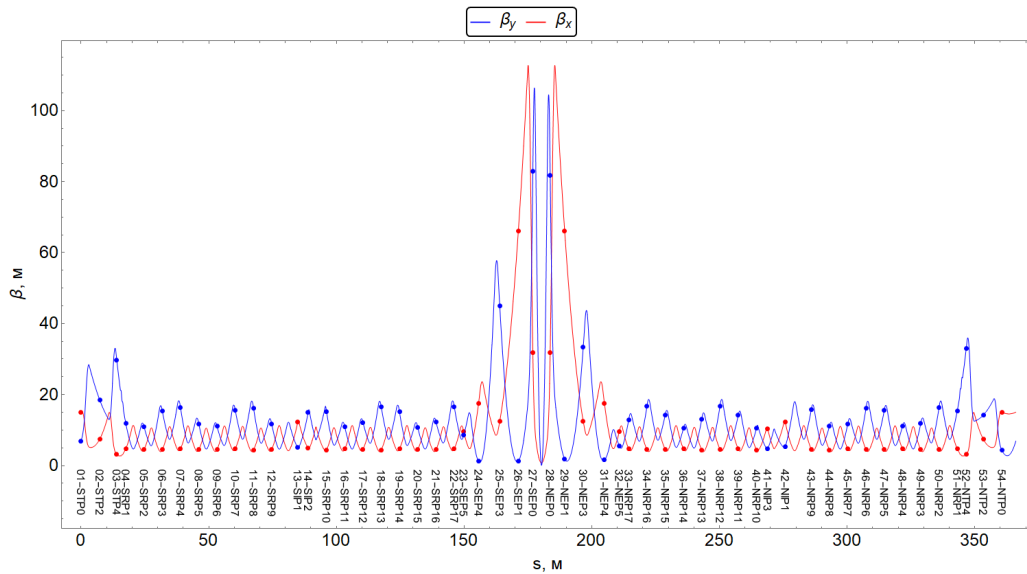


Рис. 5.9. Оптика ВЭПП-4М с вигглером. Точками показано положение датчиков положения пучка.

Измерение зависимости вертикальной бетатронной частоты, как функции амплитуды, проводились при следующих условиях:

- Использовались данные со всех 54 датчиков положения пучка (все они работают в однооборотной моде). Усреднение позволяет улучшить точность определения частоты. Поскольку амплитуда колебаний на разных датчиках положения зависит от величины бетатронной функции, коор-

дината «заброса» пучка приводится к переменной действия (см. 4.3), которая является константой вдоль кольца.

- Амплитуда горизонтального «удара» выставлялась равной нулю.
- Измерения проводились при токе пучка около 1 мА, который выдерживался примерно равным в каждой серии.
- В каждой точке по амплитуде производилось от 10 до 20 измерений частоты; результаты усреднялись.

Для определения вклада различных составляющих в величину зависимости частоты от амплитуды (нелинейные магниты, искажение линейной оптики включённым гибридным вигглером, собственное нелинейное поле вигглера), измерения проводились в нескольких режимах:

- Базовый (стандартный) режим с выключенным гибридным вигглером и включёнными нелинейными магнитами. В этом режиме основной вклад в зависимость вертикальной бетатронной частоты от амплитуды вносят октупольные линзы, размещённые в экспериментальном промежутке. Ниже этот режим обозначается как «В4». Зависимость вертикальной частоты от переменной действия для этого режима показана на рисунке 5.10.
- Базовый режим с включённым гибридным вигглером, скорректированной орбитой, но с искажённой оптикой (рисунок 5.9). Этот режим называется «В4+ГВ». Зависимость вертикальной частоты от переменной действия для него показана на рисунке 5.11.
- Базовый режим с выключенными октупольными линзами («В4-Ок»). В этом режиме невозможно инжектировать сгусток электронов с большой интенсивностью, однако для наших экспериментов это не имеет

значения, поскольку все измерения проводились с током около 1 мА. Зависимость вертикальной частоты от переменной действия для этого режима показана на рисунке 5.12.

- Режим с выключенными октупольными линзами и включённым гибридным вигглером («В4+ГВ-Ок»). Искажение бетатронных функций в кольце ВЭПП-4М, вызванное действием гибридного вигглера, исправлено по описанной выше методике, однако, значение вертикальной бета-функции в самом вигглере увеличилось с 7 м до 8 м. График вертикальной бетатронной частоты, как функция вертикального действия для этого режима приведён на рисунке 5.13.

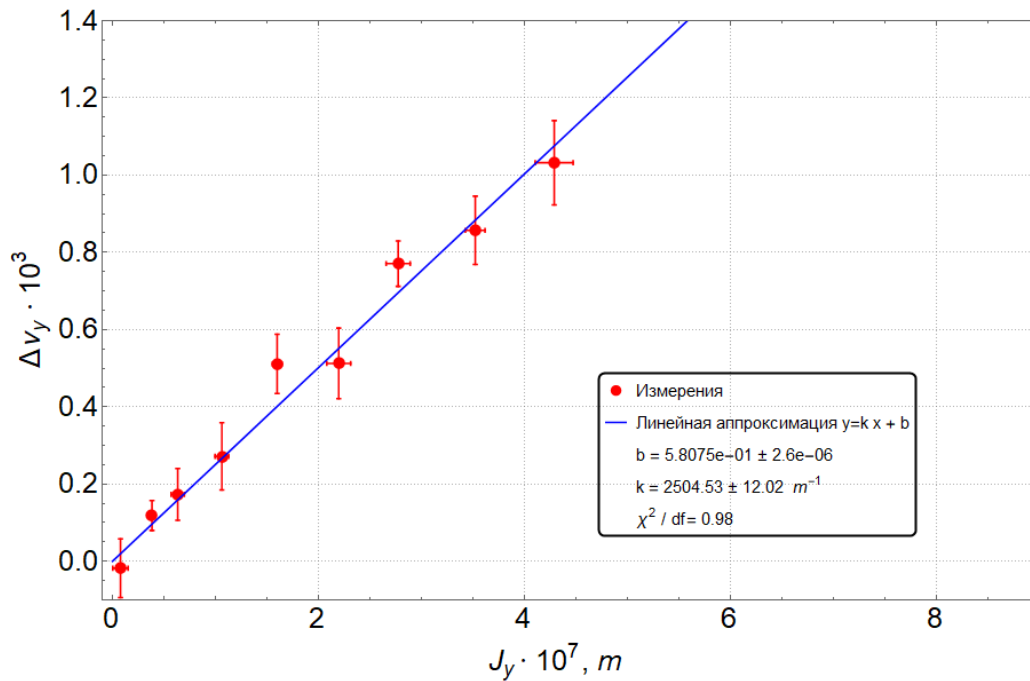


Рис. 5.10. Зависимость сдвига вертикальной частоты от  $J_y$  в базовой структуре «В4».

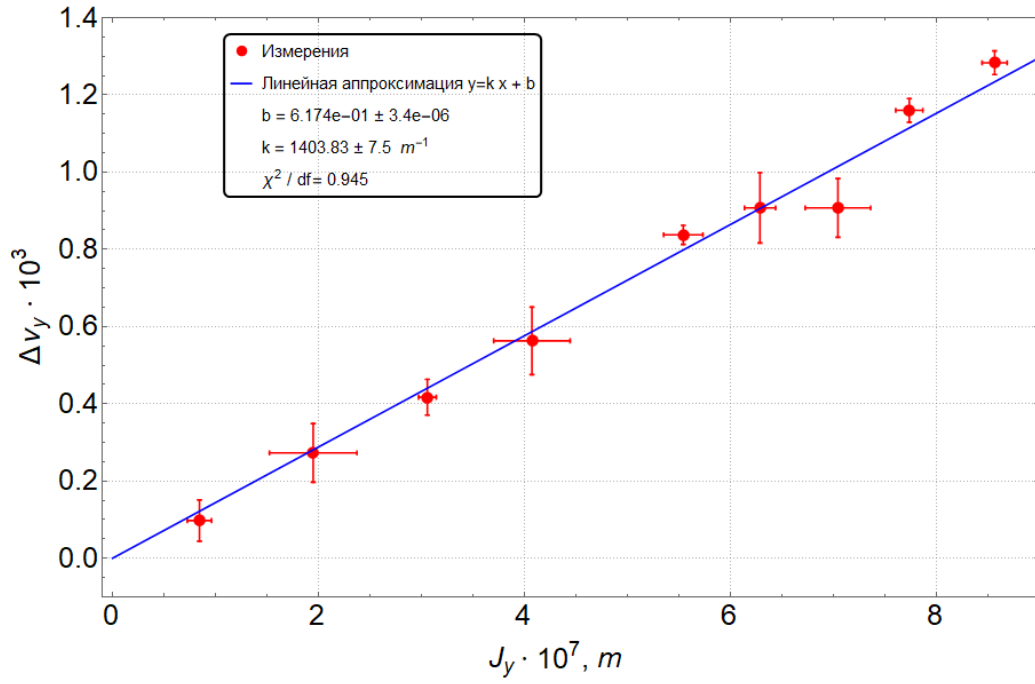


Рис. 5.11. Зависимость сдвига вертикальной частоты от  $J_y$  в структуре с вигглером. Оптика возмущена. Режим «В4+ГВ».

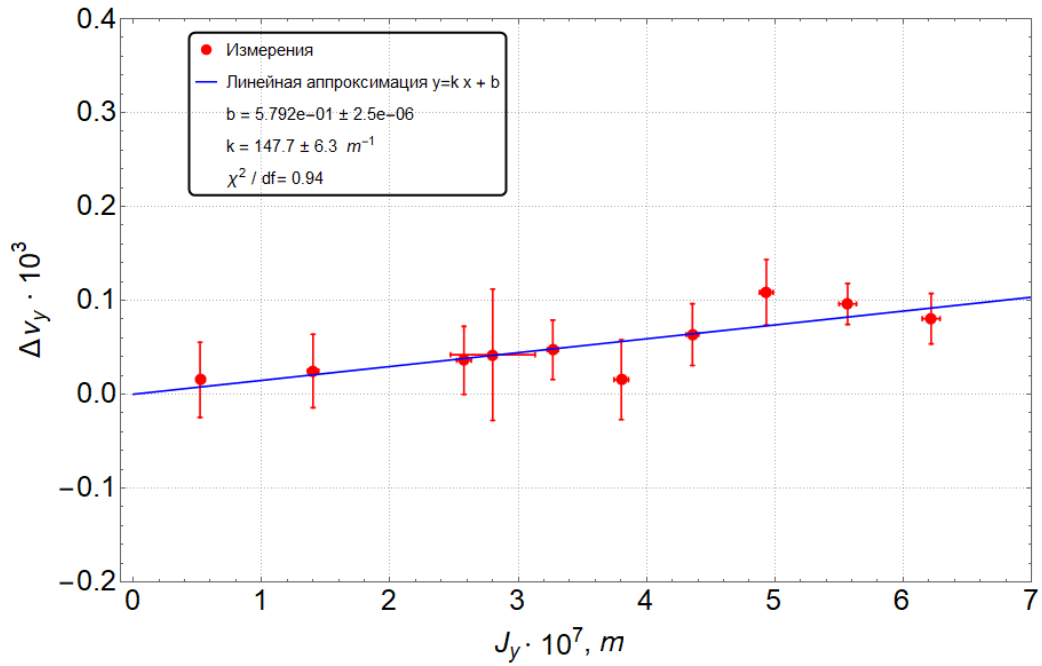


Рис. 5.12. Зависимость сдвига вертикальной частоты от  $J_y$  в структуре без октуполей. Режим «В4-Ок».

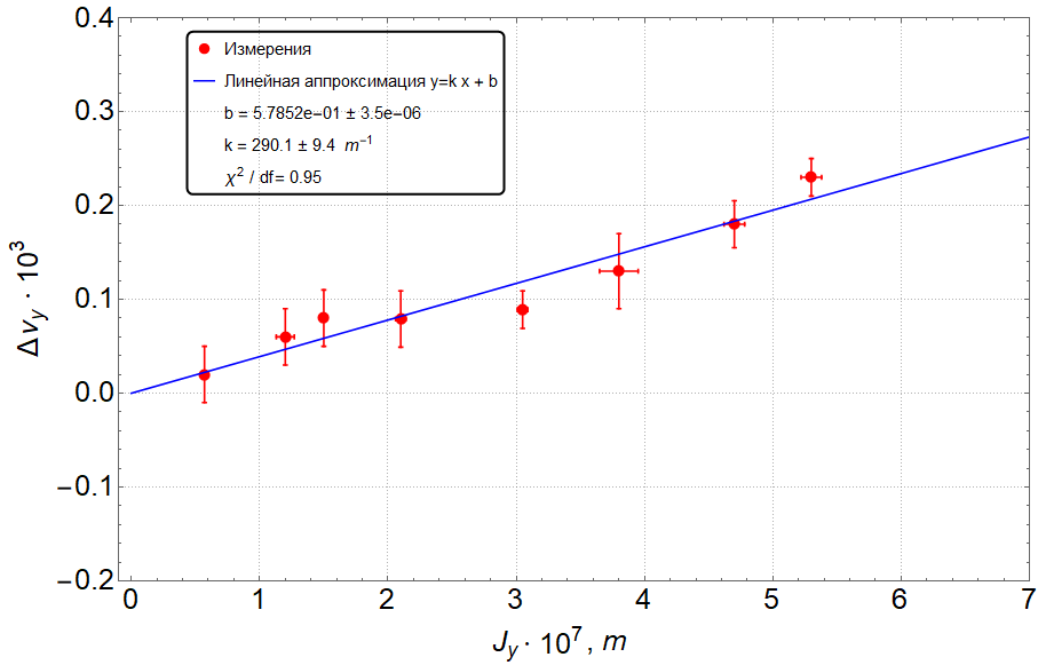


Рис. 5.13. Зависимость сдвига вертикальной частоты от  $J_y$  в структуре без октуполей и включённым гибридным вигглером. Режим «В4+ГВ-Ок».

Сравнение режимов «В4-Ок» и «В4+ГВ-Ок» позволяет определить собственный вклад нелинейного поля гибридного вигглера в зависимость частоты вертикальных бетатронных колебаний от амплитуды (выраженной в величинах действия). Полученные результаты для всех четырёх режимов приведены в таблице 5.4; сравнение с таблицей 4.2 показывает хорошее согласие результатов — разница между измеренными коэффициентами  $\alpha_{yy}$  для режима В4-Ок и В4+ГВ-Ок составляет  $\Delta\alpha_{yy} = 142.3\text{м}^{-1}$ , что соответствует значению, предсказанному оценками главы 4.

Таблица 5.4. Коэффициенты  $\alpha_{yy}$ . Моделирование и эксперимент.

Режима	В4	В4+ГВ	В4-Ок	В4+ГВ-Ок
Моделирование $\alpha_{yy}, \text{м}^{-1}$	2434.99	1275.484	250	387
Эксперимент $\alpha_{yy}, \text{м}^{-1}$	$2504.53 \pm 12.02$	$1403.03 \pm 7.5$	$147.7 \pm 6.3$	$290 \pm 9.4$

## 5.4. Влияние гибридного вивглера на разброс энергий в пучке

Равновесный продольный размер электронного пучка  $\sigma_l$ , определяемый синхротронным излучением (для малого тока сгустка возможными коллективными эффектами пренебрегаем) связан с энергетическим разбросом следующим выражением [48; 49].

$$\sigma_l = \frac{c \alpha_p}{\Omega_s} \sigma_E, \quad (5.2)$$

где  $\alpha_p$  — коэффициент уплотнения орбит,  $\Omega_s$  — частота малых синхротронных колебаний.

Экспериментальное исследование влияния гибридного вивглера на продольного распределения пучка проводилось с помощью стрик-камеры PN-01/S20, разработанной в ИЯФ РАН [50]. Параметры стрик-камеры представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. Стрик-камера PN-01/S20

Спектральный диапазон фотокатода	350–1300 нм
Длительность развертки	200/100/30/10/1.5/0.75/0.25 нс
Временное разрешение	<1 пс
Временная нелинейность разверток	Не более 10%
Нестабильность срабатывания	Не более 3%
Максимальная частота запуска	1 КГц

Синхротронное излучение из поворотного магнита ВЭПП-4М, с помощью системы зеркал и объектива фокусируется на фотокатоде стрик-камеры. Полученные на фотокатоде фотоэлектроны ускоряются и проходят через зазор между сканирующими электродами, к которым приложено пилообразное напряжение, формирующее отклоняющее электрическое поле. В результате

фотоэлектроны, пролетевшие зазор в разное время, отклоняются на разный угол по вертикали. После этого, электронный сигнал усиливается в микроканальной пластине и попадает на люминофор, интенсивность свечения которого пропорциональна числу попавших на него фотоэлектронов. Результатом однократного срабатывания стрик-камеры является двумерное изображение на люминофоре, на котором вертикальная ось содержит информацию о поперечном распределении, а горизонтальная — информацию о временной зависимости интенсивности сигнала относительно момента начала развёртки [51].

Для сохранения и последующей обработки изображения используется цифровая ПЗС-камера. Развёртка стрик-камеры длительностью 1.5 наносекунды позволила получить требуемые временное разрешение и интенсивность изображения пучка. Стрик-камера была установлена в систему оптической диагностики ВЭПП-4М [52]. Пример профиля пучка на стрик-камере показан на рисунке 5.14



Рис. 5.14. Продольный профиль пучка.

График энергетического разброса пучка ВЭПП-4М (вычисленный из измеренной длины сгустка), как функции тока основного питания гибридного вигглера показан на рисунке 5.15.

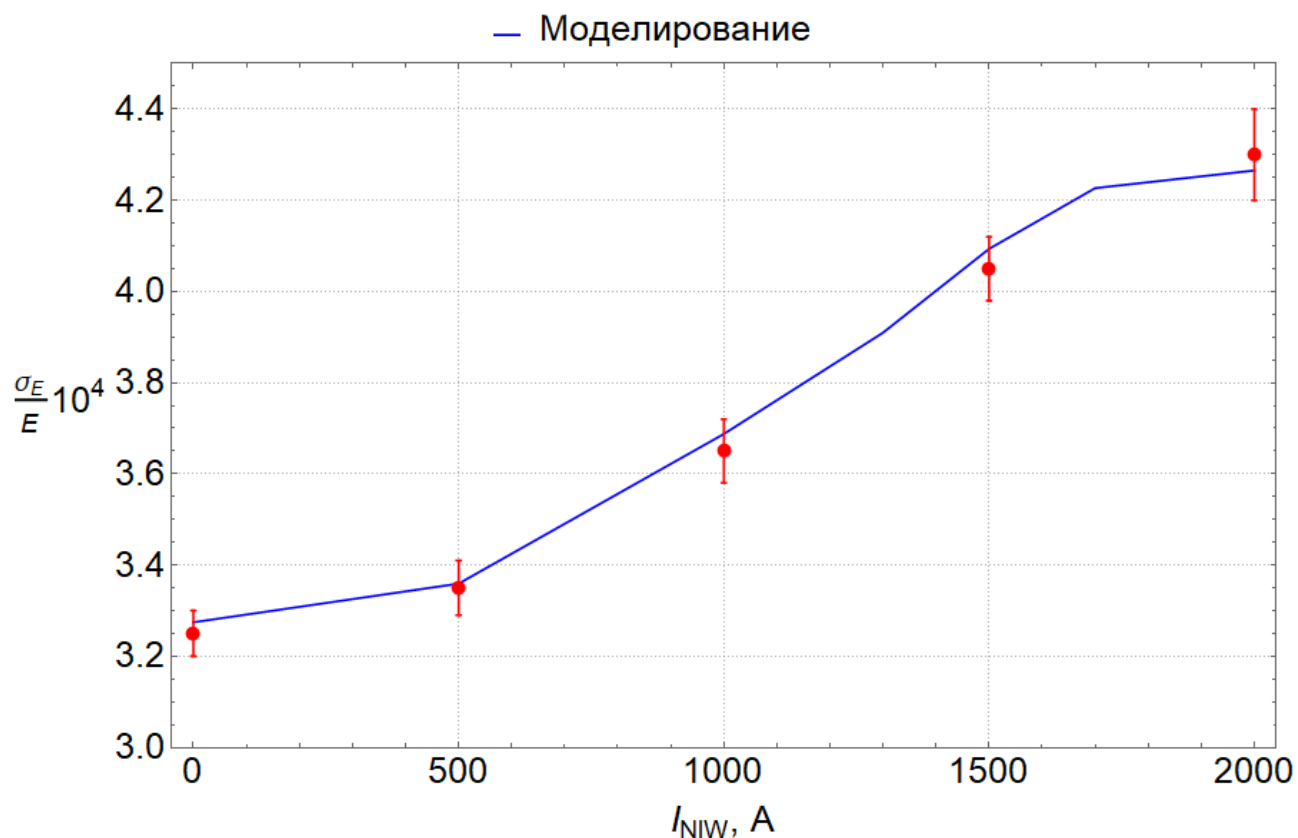


Рис. 5.15. Зависимость энергетического разброса пучка ВЭПП-4М от тока основного питания гибридного вивглера.

Сравнения полученных результатов с аналитической оценкой и моделированием с использованием измеренного поля вивглера приводится в таблице 5.6 и показывает хорошее согласие.

Таблица 5.6. Параметры структуры с включённым вивглером. Энергия 1.9 ГэВ

	ВЭПП-4М	Оценка	Моделирование	Измерение
$\frac{\sigma}{E} \cdot 10^4$	3.2	4.7	4.3	$4.25 \pm 0.6$



## 5.5. Влияние гибридного вигглера на эмиттанс пучка в ВЭПП-4М

Для оценки влияния гибридного вигглера на эмиттанс пучка электронов ВЭПП-4М использовалось измерение поперечного размера пучка с помощью стандартной системы диагностики пучка, основанной на ПЗС-матрице SONY ICX084AL [53].

Среднеквадратичный (горизонтальный) размер пучка, измеряемый по синхротронному излучением, вычисляется по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x + \sigma_E^2 \eta_x^2}, \quad (5.3)$$

где  $\epsilon_x$  — горизонтальный эмиттанс пучка,  $\beta_x$  — горизонтальная бета-функция в месте испускания регистрируемого СИ,  $\sigma_E$  — энергетический разброс,  $\eta_x$  — горизонтальная дисперсия в месте излучения СИ.

Из формулы 5.3 эмиттанс пучка выражается как:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_E^2 \eta_x^2}{\beta_x}. \quad (5.4)$$

Оценка погрешности измерений запишется следующим образом

$$\Delta\epsilon_x = \sqrt{\left(\frac{2\sigma_x}{\beta_x} \Delta\sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\sigma_x^2 - \sigma_E^2 \eta_x^2}{\beta_x^2} \Delta\beta_x\right)^2 + \left(\frac{2\sigma_E \eta_x^2}{\beta_x} \Delta\sigma_E\right)^2 + \left(\frac{\sigma_E^2 2\eta_x}{\beta_x} \Delta\eta_x\right)^2}. \quad (5.5)$$

Измерение поперечного размера проводилось для двух режимов: базовой оптики ВЭПП-4М без гибридного вигглера и с включённым вигглером и исправленной оптикой кольца, как это описывалось выше. Результаты измерений показаны на рисунке 5.16 и рисунке 5.17.

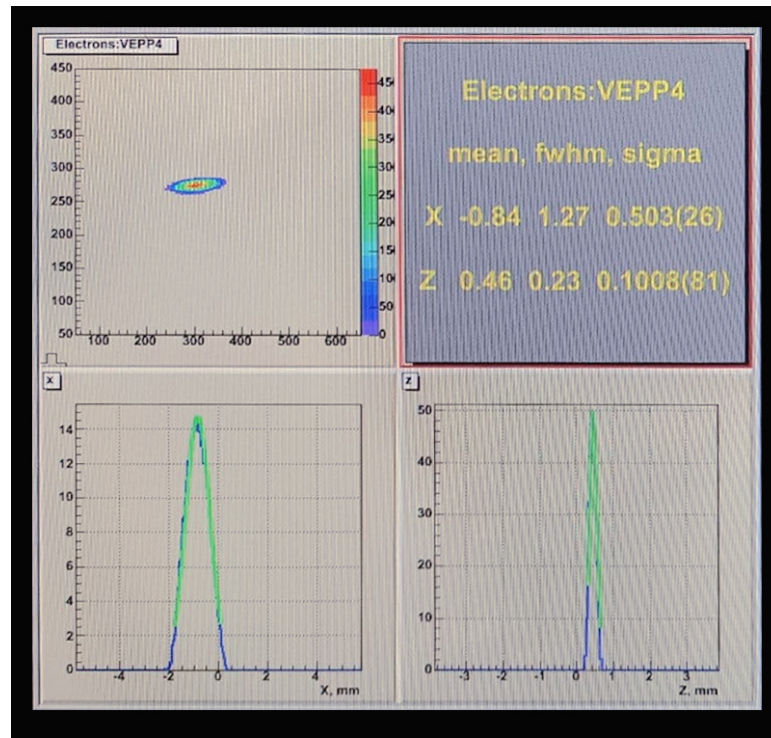


Рис. 5.16. Поперечный профиль пучка в базовой структуре ВЭПП-4М.

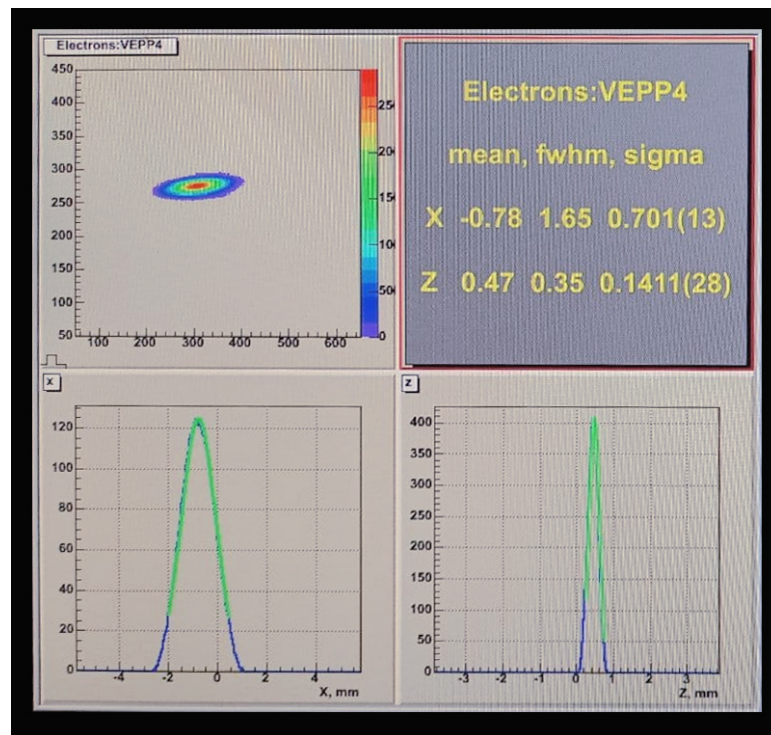


Рис. 5.17. Поперечный профиль пучка со включённым гибридным вигглером.

Для вычисления эмиттанса мы брали измеренный энергетический разброс пучка (рисунок 5.15) и расчётные значения оптических функций в точке вывода синхротронного излучения на ПЗС-матрицу. Согласно [54] эти модель-

ные и измеренные значения оптических функций совпадают с точностью 5%, что вполне достаточно для целей нашего исследования.

Результаты исследования приведены в таблице 5.7:

Таблица 5.7. Параметры для вычисления эмиттанса

Параметр	$\sigma_E \cdot 10^4$	$\beta_x$ , м	$\eta_x$ , м	$\sigma_x$ , мм	$\epsilon_x$ , нм·рад
Вигглер выкл.	$3.2 \pm 0.05$	$7 \pm 0.7$	$0.95 \pm 0.095$	$0.503 \pm 0.026$	$23.7 \pm 5$
Вигглер вкл.	$4.1 \pm 0.15$	$7 \pm 0.7$	$0.95 \pm 0.095$	$0.701 \pm 0.013$	$49 \pm 7$

Прирост горизонтального эмиттанса пучка ВЭПП-4М, вызванный влиянием гибридного вигглера и приведённый в таблице 5.7 хорошо совпадает с результатами моделирования, выполненным в главе 4 ( см. таблицу 4.6).

## Экспериментальные возможности гибридного вигглера

В этой главе мы подробнее рассмотрим, как изменились условия проведения экспериментов с синхротронным излучением после постановки на ВЭПП-4М гибридного вигглера. В качестве примера будет приведено несколько экспериментальных методик с пояснением, какие их исследовательские характеристики изменяются из-за нового излучателя и как.

### 6.1. Расчёт параметров излучения гибридного вигглера

Для расчёта параметров излучения использовалась известная программа SPECTRA [55; 56], которая позволяет задавать характеристики источника СИ (энергию, ток, размеры пучка на азимуте излучения и т.д.), «идеальное» (однородное для поворотных магнитов или косинусное для ондуляторов) магнитное поле, а также, произвольное (модельное или полученное экспериментальным путём) магнитное поле излучателя, и рассчитывает такие величины, как поток, яркость, плотность мощности СИ и т.п. Главное «окно» пользовательского интерфейса программы SPECTRA показано на рисунке 6.1.

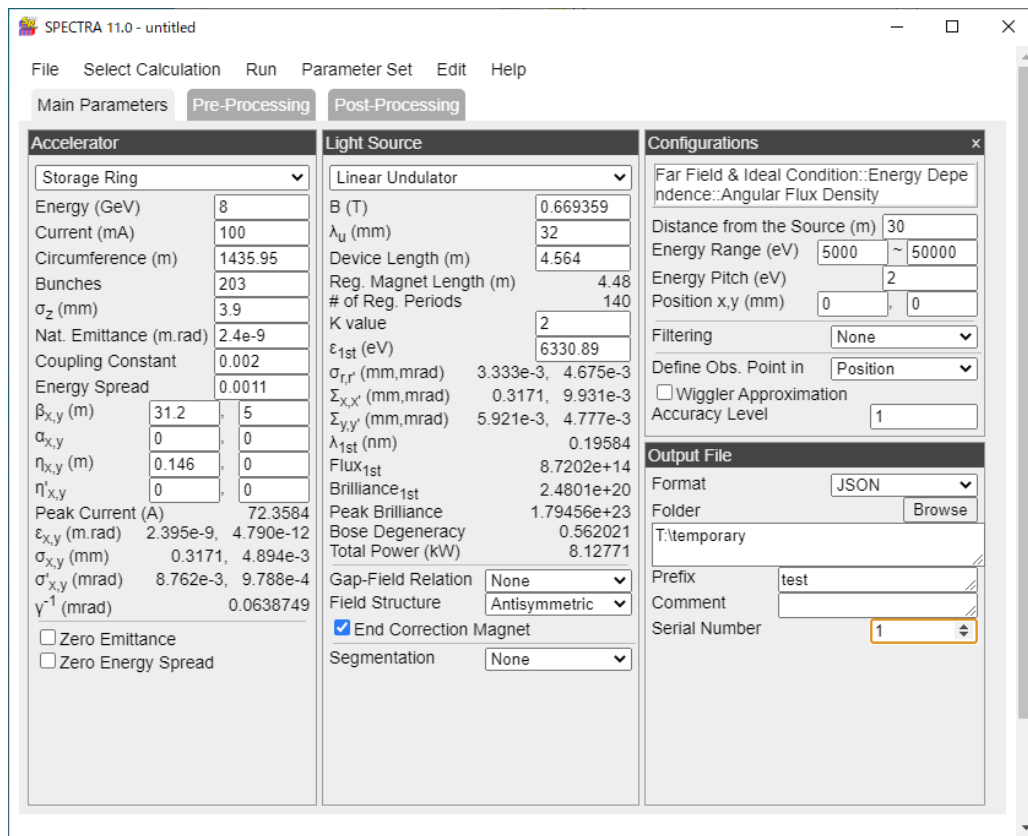


Рис. 6.1. Главное окно программы SPECTRA.

График плотности потока СИ в зависимости от энергии фотонов, рассчитанный программой SPECTRA, показан на рисунке 6.2. Оценка производилась для энергии электронов 4.5 ГэВ, максимальном поле вигглера и токе пучка 20 мА.

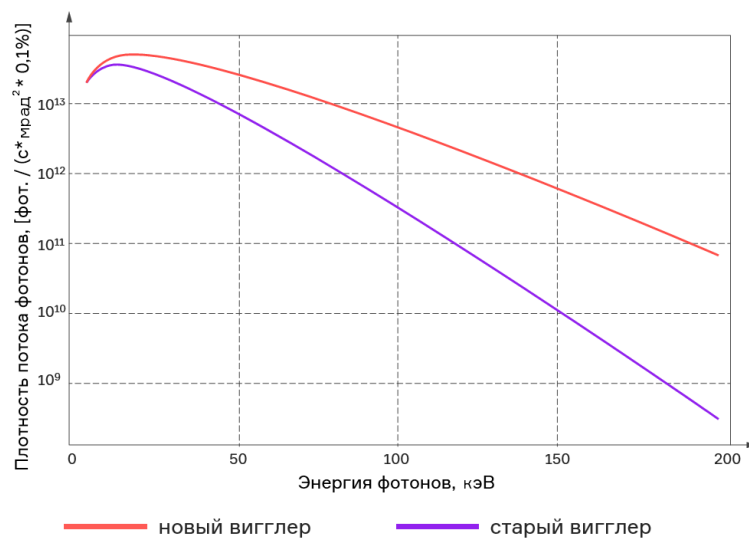


Рис. 6.2. Плотность потока фотонов из нового и старого вигглера.

Для сравнения на том же рисунке 6.2 показан аналогичный график для старого вигглера. Для экспериментальных методик, используемых в экспериментах с СИ на ВЭПП-4М, наиболее востребованы следующие диапазоны энергии квантов: 30–40 кэВ (для станции детонационных процессов), и 100–120 кэВ (для станций фазоконтрастной микроскопии, микротомографии и рентгено-флуоресцентного анализа). Как показывает сравнение графиков, в последнем случае можно ожидать примерно 30-кратное увеличение потока по сравнению со старым вигглером.

Важным инженерным аспектом применения гибридного вигглера является возможность использования уже существующего оборудования вывода СИ из накопителя (т.н., «фронт-энд»), в частности, щелевого коллиматора — приёмника излучения, который формирует пучки излучения, поступающие по каналам вывода к экспериментальным станциям защищённого бункера ВЭПП-4М (рисунок 6.3). Необходимость изменения этого приёмника, находящегося в вакуумной камере, и его замена существенно усложнили бы постановку и использование гибридного вигглера ввиду того, что это потребовало бы переделки идущих далее каналов вывода. Поэтому было проведено моделирование распределения плотности мощности СИ на поверхности приёмника с целью определения, достаточно ли возможности существующей системы охлаждения для съёма дополнительной тепловой нагрузки.

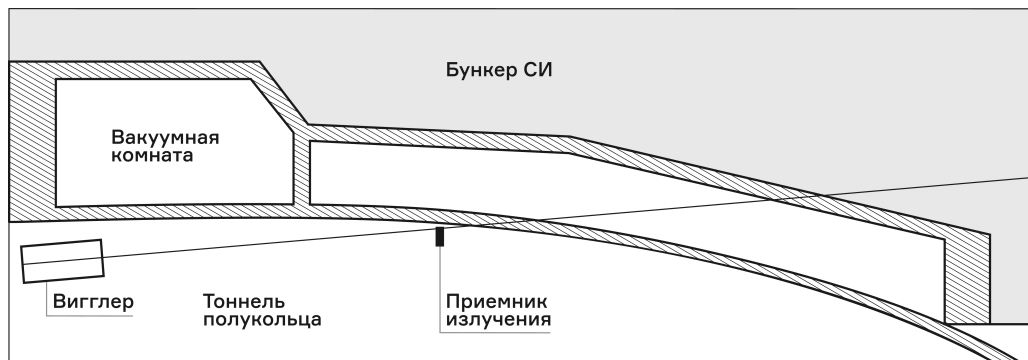


Рис. 6.3. Схема бункера СИ с каналами излучения и частью магнитной системы ВЭПП-4М в которой установлен вигглер.

Приёмник-коллиматор, формирующий излучение, находится в 9.5 м от центра вивглера и имеет щель размером 1 см х 5 см, как это показано на рисунке 6.4.



Рис. 6.4. Приёмник излучения из вивглера. Слева щель в которую поступает СИ из вивглера.

Приёмник излучения, показанный на рисунке 6.4, представляет из себя кусок вакуумной камеры с медной водоохлаждаемой шторкой в отверстия которой поступает излучение с магнитов кольца ВЭПП-4М (в том числе и из вивглера). Для расчётов тепловой мощности приходящейся на стенки приёмника излучения была взята его упрощённая геометрическая модель 6.5.

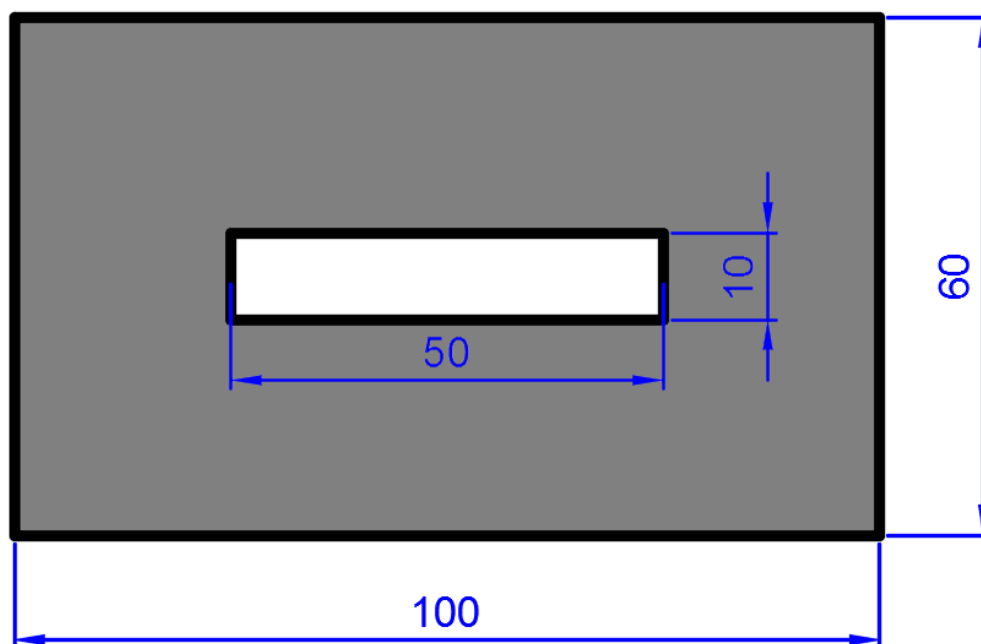


Рис. 6.5. Приёмник излучения из вивглера.

Расчёты показывают, что при токе пучка 20 мА, максимальном поле вивглера 1.9 Тл и энергии частиц 4.5 ГэВ полная мощность излучения из вивглера составит 900 Вт, а максимальная плотность мощности —  $140 \text{ Вт/см}^2$ .

При этом на приёмник излучения приходится 250 Вт, а оставшиеся 650 Вт проходят в щель (рисунок 6.6).

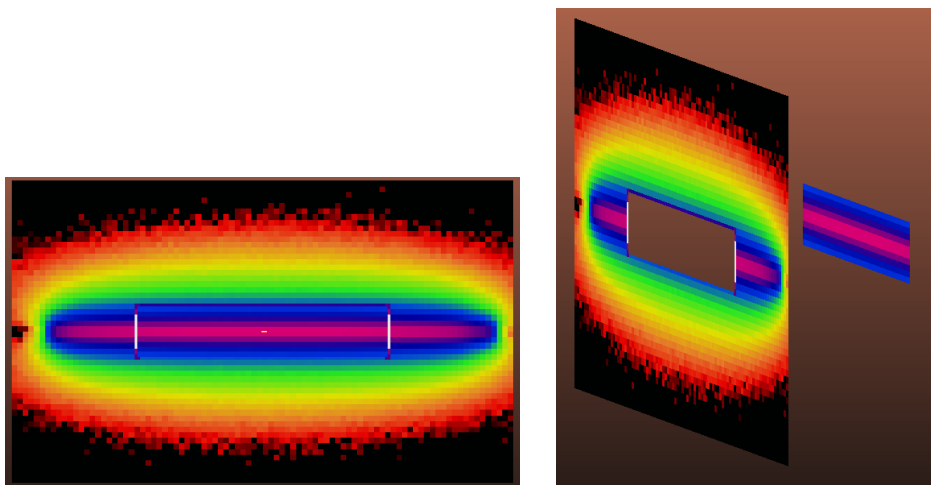


Рис. 6.6. Распределение падающей мощности на приёмник излучения.

Мощность, приходящаяся на боковые стенки приёмника, которые параллельны или составляют незначительный угол с направлением излучения, пренебрежимо мала. Конструкция приёмника позволяет выдержать плотность мощности падающего СИ до  $100 \text{ Вт/см}^2$ ; такая мощность эффективно снимается водой, проходящей по трубкам охлаждения. Из рисунка 6.7 на котором показано распределение плотности мощности по приёмнику излучения видно, что максимальная плотность мощности СИ из гибридного вивглера по границе щели не превышает  $20 \text{ Вт/см}^2$ , что является допустимым значением с существенным запасом. Таким образом, переделка коллиматора-приёмника излучения, формирующего поле излучения в каналах вывода ВЭПП-4М не требуется.



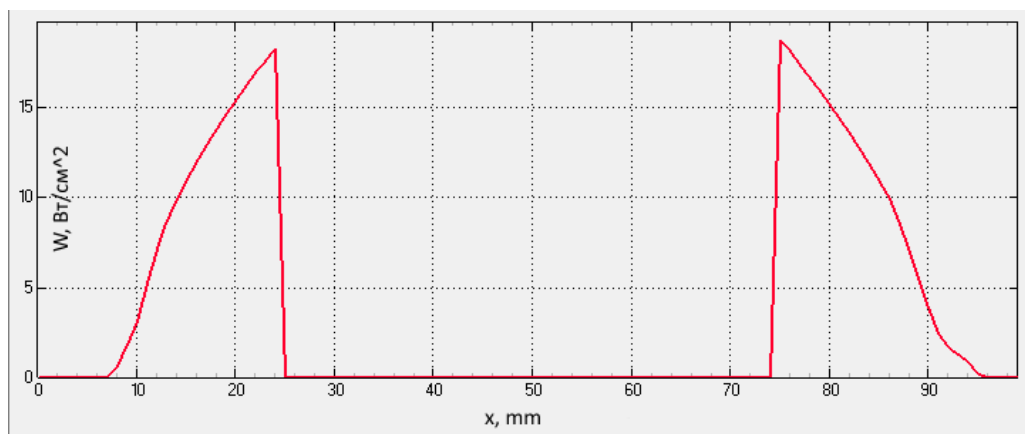


Рис. 6.7. Распределение плотности мощности по приёмнику излучения.

Средняя по площади плотность мощности СИ внутри щели (рисунок 6.8) составляет 140 Вт/см<sup>2</sup>.

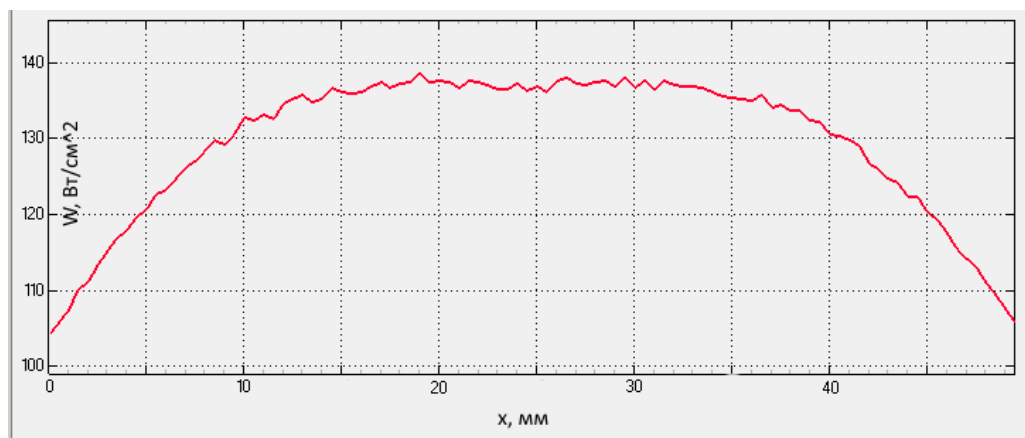


Рис. 6.8. Распределение плотности мощности по щели.

Из рисунка 6.8, что подавляющая часть мощности СИ из гибридного вивглера проходит через щель коллиматора.

## 6.2. Применение излучения гибридного вивглера для экспериментов на ВЭПП-4М

Для ряда экспериментальных методик, использующих СИ, существенна высокая интенсивность излучения с жёстким рентгеновским спектром (с энергией квантов до сотни килоэлектронвольт). Достаточно высокая энергия

ВЭПП-4М (4.5 ГэВ) и улучшенные характеристики гибридного вивглера позволяют эффективно реализовать такие методики, к которым, в частности, можно отнести:

- Исследование микропучковой терапии онкологических заболеваний, изучение механизмов подавления радиационной резистивности опухолевых тканей препаратами с содержанием наночастиц.
- Разработка методов рентгенофлуоресцентного анализа в жёстком рентгеновском диапазоне для исследования редкоземельных металлов, платиноидов и других полезных ископаемых.
- Изучение динамики интенсивного энергообмена с конструкционными материалами, например, взаимодействие плазмы со стенками термоядерных реакторов.
- Изучение быстропротекающих процессов в энергетических материалах (детонация и др.), процессы структурной модификации материалов при ударноволновом нагружении.

В этом разделе мы кратко опишем преимущества использования гибридного вивглера для некоторых экспериментальных методик, использующихся на ВЭПП-4М.

### **6.2.1. Повышение эффективности радиационных методов терапии рака**

Жёсткое СИ (в диапазоне энергии квантов 30-100 кэВ) востребовано в экспериментах по радиационному воздействию на раковые клетки, ведущихся на ВЭПП-4М [16]. Радиотерапия является распространенным методом лечения онкологических опухолей. Несмотря на то, что радиотерапия массово используется уже несколько десятилетий, не прекращаются исследования по разработке новых подходов в лечении рака.

Одним из современных и перспективных направлений является использование наночастиц, накапливаемых в клетках опухолей. В частности, в ИЯФ СО РАН (совместно с сотрудниками ИЦиГ СО РАН) ведутся исследования цитопатического влияния наночастиц оксида марганца при радиационном облучении агрессивной формы рака головного мозга — глиобластомы [57; 58]. После инкубации клеток глиобластомы с наночастицами оксида марганца проводилось их облучение СИ, генерируемым гибридным вигглером. Жёсткий энергетический диапазон СИ позволял имитировать радиационное облучение, используемое при лучевой терапии в клинических условиях. Высокая интенсивность СИ из нового вигглера дала возможность проводить экспозицию глиобластом в течение долей секунд (это было невозможно со старым вигглером), что сопоставимо с условиями конвенциональной лучевой терапии, при этом дозы облучения составляли от 1 Гр до 160 Гр.

В результате использования наночастиц оксида марганца было выявлено увеличение цитопатического действия СИ на клетки глиобластомы. Было показано, что инкубация клеточных линий глиобластом с наночастицами оксида марганца позволяет снизить дозу облучения в 2–3 раза, сохранив эффективность воздействия, и сократив период жизнедеятельности клеток опухоли после облучения на 30 %. По результатам исследований был сделан вывод, что комбинация рентгеновского облучения и наночастиц, предоставляет новые возможности для разработки модели лечения опухолей головного мозга.

### **6.2.2. Рентгенофлуоресцентный элементный анализ**

Рентгенофлуоресцентный элементный анализ (РФА) широко используется как для количественного определения содержания элементов, так и для визуализации картины распределения химических элементов в различных образцах [10].

В Сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения коллективом исследователей из разных научных групп давно проводятся работы

по использованию РФА-СИ на специализированной станции «Элементный анализ» накопителя ВЭПП-3. Рабочий диапазон энергии фотонов при этом ограничен характеристиками накопителя и составляет от 10 кэВ до 40 кэВ. В этом диапазоне РФА тяжёлых и редкоземельных элементов (РЗЭ) возможен только по линиям L серии (от 4.6 кэВ до 10.1 кэВ). Сложность определения редкоземельных элементов (лантаноидов) La-Lu по L-серии связана с наложением линий от K-серии таких элементов как Ti, Fe, Co, Ni, Cu, Zn. Это является причиной низкой чувствительности, а порой и невозможности определения РЗЭ в исследуемых образцах методом РФА. K-линии лантаноидов лежат в жёстком диапазоне энергий фотонов от 33 кэВ до 63 кэВ и недоступны для излучения из ВЭПП-3.

С вводом в эксплуатацию в 2014 г. станции СИ «Фазово-контрастная томография и РФА» на накопителе ВЭПП-4М появилась возможность продолжить работы по элементному анализу в диапазоне энергий фотонов от 30 кэВ до 100 кэВ [59], а после ряда улучшений параметров ВЭПП-4М (увеличения максимальной энергии до 4.5 ГэВ, максимального тока пучка до 20 мА и т.д.) и, особенно, после постановки гибридного вигглера эффективность методики РФА существенно возросла. В частности, плотность потока на станции РФА-СИ в области энергии фотонов 100 кэВ увеличилась более чем на два порядка по сравнению со старым вигглером [60; 61].

На рисунке 6.9 приведены графики расчётной спектральной плотности потока фотонов на станции РФА-СИ, падающих на первый кристалл монохроматора, для старого и нового вигглеров. Вычисление спектрального распределения плотности потока проводилось с учётом алюминиевых фильтров толщиной 2 мм (для старого) и 5 мм (для нового) вигглеров, установленных для предотвращения перегрева рентгенооптических элементов.

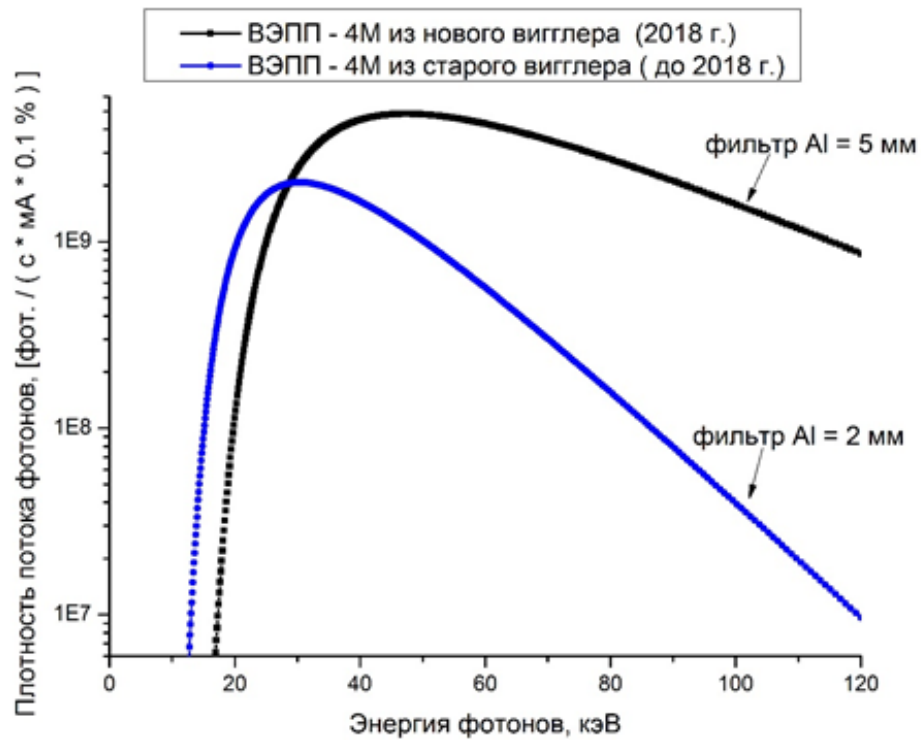


Рис. 6.9. Расчётные спектральные плотности потока фотонов на первом кристалле монохроматора.

Увеличение на два порядка плотности потока фотонов в жёстком рентгеновском диапазоне приводит к такому же увеличению загрузки полупроводникового энергодисперсионного детектора, который регистрирует флуоресцентные кванты от исследуемого образца. Что, в свою очередь, позволяет уменьшить на порядок время экспозиции при одинаковых значениях пределов обнаружения химических элементов.

Интенсивное излучение из гибридного вивглера даёт возможность развивать новые методики применения РФА-СИ, в частности, со сплошным сканированием влажных кернов донных осадков на тяжёлые элементы и РЗЭ (что невозможно на ВЭПП-3) или с использованием фокусировки жёсткого монохроматического пучка с помощью преломляющих составных рентгеновских линз [62].

На рисунке 6.10 показан спектр рентгенофлуоресценции, полученный при облучении стандартного образца монохроматическим пучком с энергией

возбуждения 112 кэВ из гибридного вигглера. Время накопления спектра составляло 600 с.

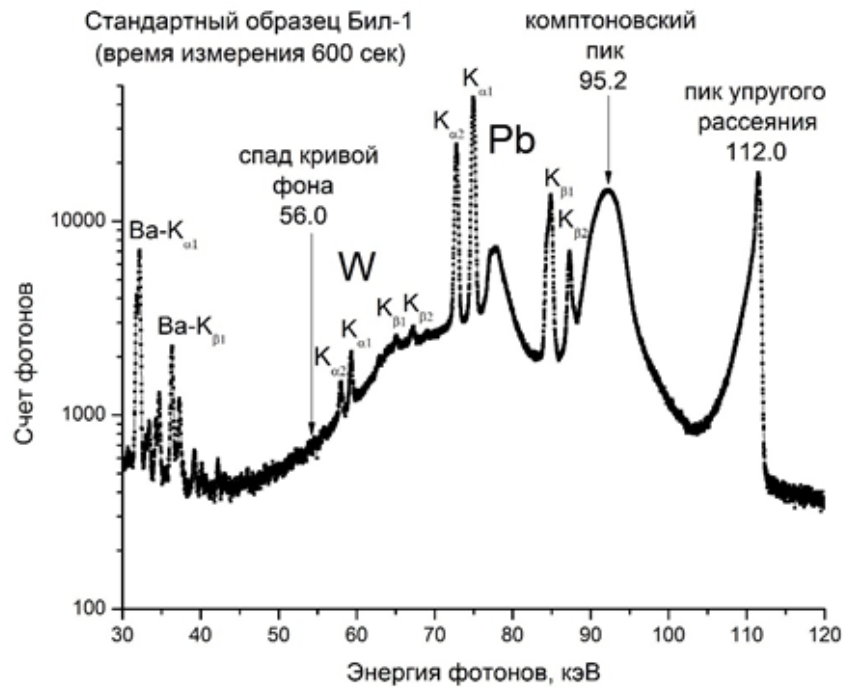


Рис. 6.10. РФА-спектр от стандартного образца БИЛ-1 (байкальский ил), энергия возбуждения 112 кэВ, время измерения 600 с.

Станция РФА-СИ на накопительном кольце ВЭПП-4М, оснащённая системой детектирования спектров рентгенофлуоресценции и методикой их анализа в диапазоне энергий фотонов от 40 кэВ до 120 кэВ, является необходимым инструментом при анализе геологических, археологических, геохимических образцов, содержащих тяжёлые и редкоземельные элементы. Панорамное определение всей группы редкоземельных элементов, полученное неразрушающим методом РФА-СИ на накопительном кольце ВЭПП-4М, в России в настоящее время уникально.

### 6.2.3. Взаимодействие плазмы со стенками термоядерного реактора

На станции рассеяния синхротронного излучения «Плазма» ВЭПП-4М проводятся эксперименты по изучению динамики распределений деформа-

ций и напряжений в монокристаллических образцах вольфрама [63]. При этом согласно схеме эксперимента исходное полихроматическое синхротронное излучение с энергией около К-края поглощения вольфрама ( $\sim 69$  кэВ) проходит сквозь образец. Поэтому доступная толщина образцов ограничена интенсивностью исходного синхротронного излучения. Благодаря замене вивгера спектральная плотность излучения в области энергий около 69 кэВ возросла примерно на 2 порядка, что позволило увеличить толщину образцов с 200 мкм до 450 мкм. Это изменение является принципиальным для корректного моделирования предполагаемых условий воздействия на материалы в термоядерном реакторе на основе замкнутой магнитной конфигурации, так как глубина проникновения тепла при использовавшейся длительности импульсного нагрева за время нагрева около 200 мкм. То есть с увеличенной толщиной задняя сторона во время импульсного нагрева остаётся холодной, что соответствует реальной ситуации. Разница хорошо видна при сравнении динамики дифрактограмм во время импульсного нагрева и сразу после него (рисунки 6.11 и 6.12). При измерении динамики дифрактограмм на образце с увеличенной толщиной левая граница дифракционного пика смещается значительно меньше, что соответствует относительно слабому нагреву задней стороны образца. Изменение остаточной формы дифракционного пика представляет собой не смещение, а изменение формы. Это соответствует тому, что пластическая деформация происходит не равномерно по толщине образца, а только в слоях образца, которые имели высокую максимальную температуру при нагреве.

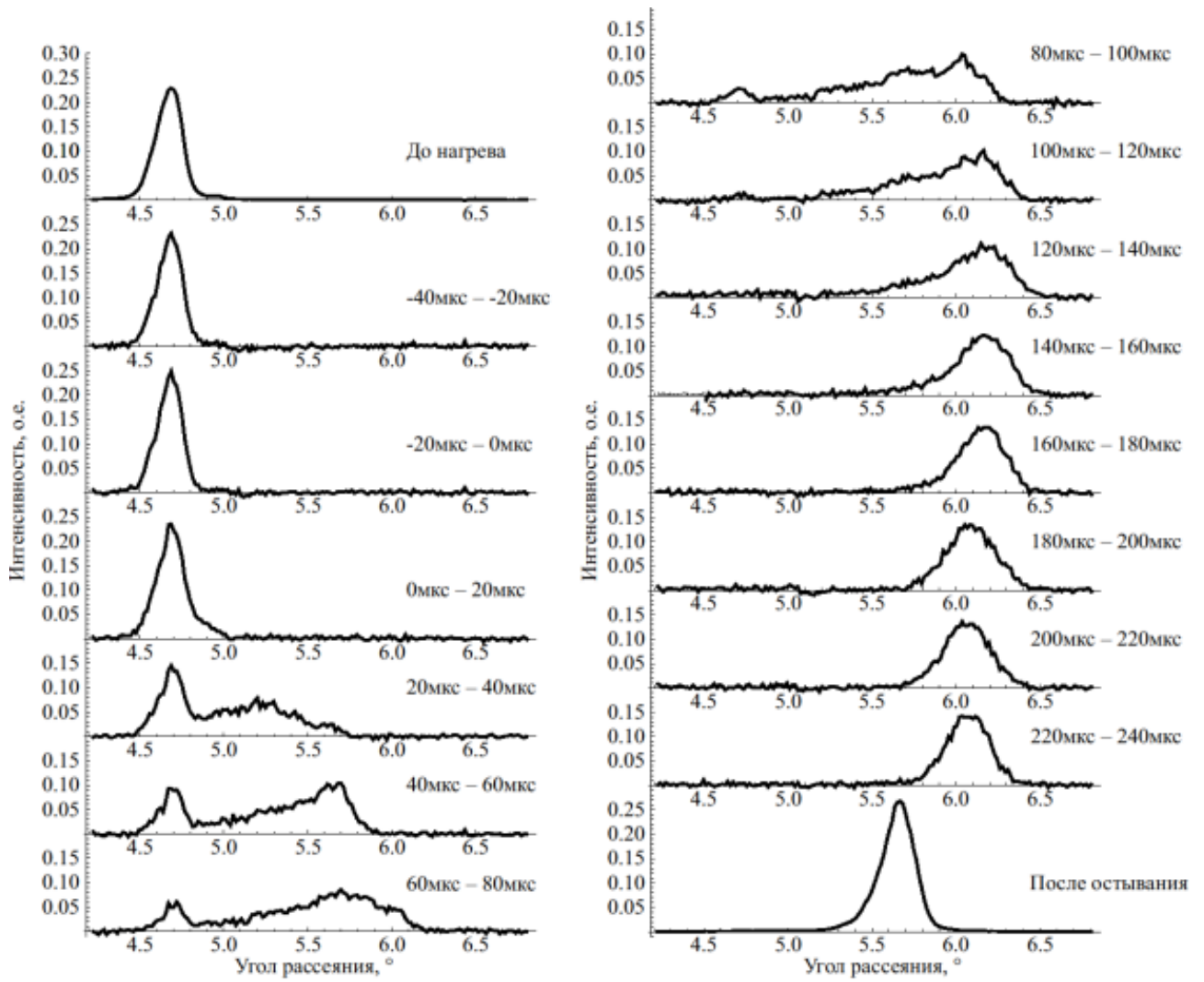


Рис. 6.11. Исходное состояние, конечное состояние и динамика дифракционного пика 110 от монокристаллического вольфрама с ориентацией (100) толщиной 200 мкм при импульсной тепловой нагрузке. Нагрев начался примерно в 0 мкс и завершился в 140 мкс.



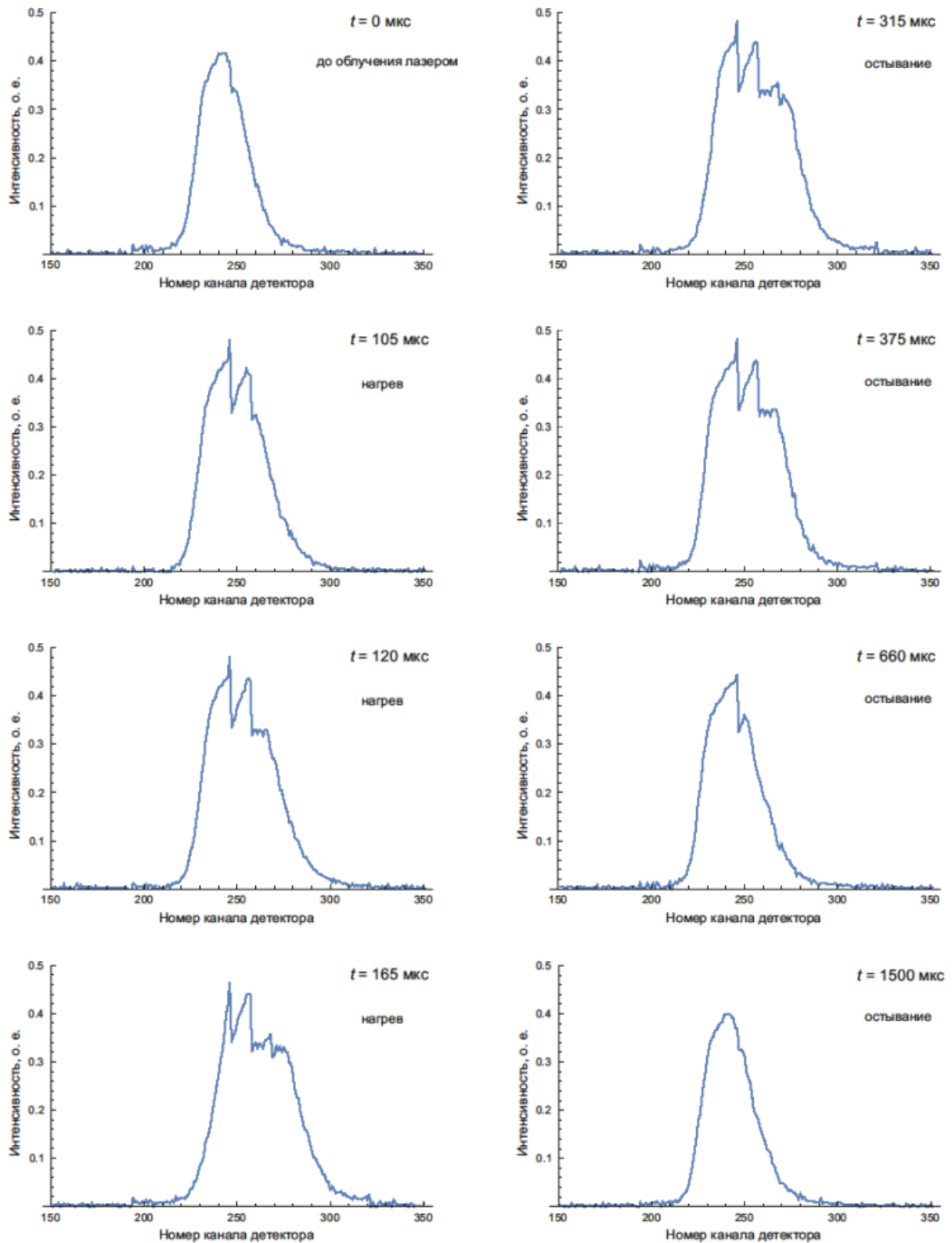


Рис. 6.12. Динамика дифракционного пика 110 от монокристаллического вольфрама с ориентацией (100) толщиной 450 мкм при импульсной тепловой нагрузке. Нагрев начался примерно в 15 мкс и завершился в 165 мкс.

## Заключение

В результате проделанной работы был создан новый гибридный вигглер, в котором магнитное поле генерируется комбинацией постоянных и электромагнитов. Такая конструкция позволила увеличить максимальное поле в зазоре и увеличить число полюсов, что, совместно, привело к существенному увеличению потока фотонов жёсткого рентгеновского диапазона, востребованного целым рядом исследователей на ВЭПП-4М. Новый вигглер был установлен в прямолинейный промежуток на место старого вигглера без переделки окружающих магнитной и вакуумной систем накопителя; не потребовалась и переделка фронт-эндгов, коллиматоров и другого оборудования каналов вывода СИ, формирующего распределение пучков на экспериментальных станциях. Все это позволило ввести новое устройство в эксплуатацию в короткие сроки и с небольшими затратами.

Для достижения основной цели автором была проделана следующая научно-исследовательская и инженерно-техническая работа:

- Произведён подробный численный анализ распределения магнитного поля гибридного вигглера включая оптимизацию поля корректирующих полюсов с целью зануления первого и второго интегралов поля вигглера для предотвращения искажения замкнутой орбиты пучка в ВЭПП-4М.
- Проведены измерения распределения магнитного поля вигглера вплоть до насыщения ярма. Проведённые измерения позволили уточнить токи корректирующих катушек, позволяющие минимизировать возмущения, вносимые гибридным вигглером в движение пучка в ВЭПП-4М для всего диапазона основного тока питания магнита (амплитуды поля в зазоре).
- На основе полученных с помощью магнитных измерений данных разработана простая модель поля гибридного вигглера, позволившая модели-

ровать все основные эффекты, вносимые вигглером в динамику пучка ВЭПП-4М.

- Теоретически рассмотрены основные аспекты влияния гибридного вигглера на пучок электронов в накопителе. Исследования включали возмущение линейной оптики кольца, изменение радиационных параметров и нелинейные эффекты (изменение бетатронной частоты в зависимости от амплитуды колебаний).
- Численно с помощью моделирующей программы исследованы возмущения, вносимые вигглером в движение частиц, включая искажение оптических функций, сдвиг частоты бетатронных колебаний, изменение эмиттанса и энергетического разброса пучка и т. д. Произведено сравнение теоретических оценок и модели по магнитным измерениям.
- После постановки гибридного вигглера на ВЭПП-4М проведён цикл измерений параметров и характеристик пучка в ВЭПП-4М. Показано, что экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами аналитических оценок и численных расчётов. Найденные с помощью магнитных измерений токи коррекций позволили скомпенсировать искажение замкнутой орбиты за пределами вигглера с точностью до разрешения мониторов положения пучка. Влияние нового устройства на линейную оптику корректируется регулярной магнитной структурой ВЭПП-4М. Пооборотные измерения когерентного движения пучка электронов, возбуждаемого быстрым импульсом электромагнитного поля, позволили исследовать влияние поля гибридного вигглера на нелинейные характеристики движения. Полученная зависимость частоты вертикальных бетатронных колебаний от амплитуды соответствует расчётной с точностью 10% и не приводит к негативным последствиям для динамики частиц.

- Автор принимал участие в ряде экспериментов с использованием жёсткого рентгеновского излучения из гибридного вигглера. Результаты этих экспериментов подтвердили существенное увеличение потока квантов жёсткого рентгеновского диапазона по сравнению со старым вигглером.

В целом можно заключить, что новый гибридный вигглер позволил значительно увеличить эффективность и расширить экспериментальные возможности программы исследований с синхротронным излучением в области жёсткого рентгена вплоть до энергии квантов 100 кэВ и выше. Цель обозначенная во введении была достигнута.

Автор выражает благодарность научному руководителю Е.Б. Левичеву за помощь и ценные наставления по ходу выполнения и написания работы. Автор выражает признательность А.В. Богомягкову, С.В. Синяткину, И.Н. Окуневу, П.А. Пиминову, О.И. Мешкову, В.М. Борину, В.В. Зуеву за плодотворные дискуссии и помощь при проведении экспериментов и обсуждении результатов. Также с большой благодарностью автор вспоминает совместную работу с автором гибридного вигглера П.Д. Воблым. Автор выражает благодарность сотрудникам лабораторий 1-3 ИЯФ СО РАН за обеспечение стабильной работы комплекса ВЭПП-4.

Отдельно хотелось бы поблагодарить О.Н. Бобровникову и С.Н. Макарову за помощь в подготовке диссертационных документов и текста диссертации.

## Список литературы

1. *Bilderback D. H., Elleaume P., Weckert E.* Review of third and next generation synchrotron light sources // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2005. — Апр. — Т. 38, № 9. — S773—S797. — DOI: [10.1088/0953-4075/38/9/022](https://doi.org/10.1088/0953-4075/38/9/022). — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-4075/38/9/022>.
2. Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске / Г. Баранов [и др.] // *Сибирский физический журнал*. — 2020. — Т. 3, № 1. — DOI: [10.25205/2541-9447-2020-15-1-5-23](https://doi.org/10.25205/2541-9447-2020-15-1-5-23).
3. Far Infrared Coherent Synchrotron Edge Radiation at ANKA / A.-S. Müller [и др.] // *Synchrotron Radiation News*. — 2006. — Т. 19, № 3. — С. 18—24. — DOI: [10.1080/08940880600755202](https://doi.org/10.1080/08940880600755202). — eprint: <https://doi.org/10.1080/08940880600755202>. — URL: <https://doi.org/10.1080/08940880600755202>.
4. STATUS OF THE 1.5 GEV SYNCHROTRON LIGHT SOURCE DELTA AND RELATED ACCELERATOR PHYSICS ACTIVITIES / T. Weis [и др.] //. — 01.2006.
5. DAFNE-Light INFN-LNF Synchrotron Radiation Facility / A. Balerna [и др.] // *AIP Conference Proceedings*. — 2010. — Июнь. — Т. 1234, № 1. — ISSN 0094-243X. — DOI: [10.1063/1.3463191](https://doi.org/10.1063/1.3463191).
6. BEPC II: construction and commissioning // *Chinese Physics C*. — 2009. — Июнь. — Т. 33, S2. — С. 60—64.
7. OPERATION AND PLANS ON THE ACCELERATOR COMPLEX IN KURCHATOV CENTER OF SYNCHROTRON RADIATION / V. Korchuganov [и др.] //. — 2004.

8. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ВНУТРЕННИМИ МИШЕНЯМИ НА НАКОПИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ ВЭПП-3 / Д. М. Николенко [и др.] // ядерная физика. — 2020. — Т. 73, № 8. — С. 1365—1381.
9. Артамонов А., Барков Л., Мезенцев Н. Первыею результаты работы со сверхпроводящей «змейкой» на накопителе ВЭПП-3 // Nucl.Instr. and Meth. — 1980. — С. 239.
10. The SRXFA Station on the VEPP-4M Storage Ring / А. А. Legkodymov [и др.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2019. — Т. 83, № 2. — С. 112—115. — URL: [www.scopus.com](http://www.scopus.com) ; Cited By :4.
11. Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // Усп. физ. наук. — 1977. — Т. 122, № 7. — С. 369—418. — DOI: [10.3367/UFNr.0122.197707a.0369](https://doi.org/10.3367/UFNr.0122.197707a.0369). — URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1977/7/a/>.
12. Short-period equipotential-bus electromagnetic undulator for a far infrared free-electron laser / Y. Jeong [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1998. — Т. 407, № 1—3. — С. 396—400.
13. Halbach K. Some concepts to improve the performance of dc electromagnetic wigglers // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. — 1986. — Т. 250, № 1/2. — С. 115—119.
14. Halbach K. Concepts for insertion devices that will produce high-quality synchrotron radiation // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. — 1986. — Т. 246, № 1—3. — С. 77—81.
15. Design and Magnetic Measurements of a Hybrid Wiggler for SR Research Program at VEPP-4 / G. Baranov [и др.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2018. — Т. 28, № 3. — ISSN 10518223. — DOI: [10.1109/TASC.2018.2791921](https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2791921).

16. Experiments with Synchrotron Radiation at the VEPP-4M / G. Baranov [и др.] // Journal of Surface Investigation. — 2020. — Т. 14, № 1. — С. 150—154. — URL: [www.scopus.com](http://www.scopus.com) ; Cited By :1.
17. Hybrid Nine-Pole Wiggler as a Source of “Hard” X-ray Radiation at the VEPP-4 Accelerator Complex / G. N. Baranov [и др.] // Journal of Surface Investigation. — 2020. — Т. 14, № 6. — С. 1290—1293. — URL: [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
18. Beam optics and dynamics in electron storage rings with ultralow emittance / G. Baranov [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2016. — Т. 13, № 7. — С. 884—889. — DOI: [10.1134/S1547477116070086](https://doi.org/10.1134/S1547477116070086).
19. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 / P. Piminov [и др.] // Т. 84. — 2016. — С. 19—26. — DOI: [10.1016/j.phpro.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005).
20. Hybrid Magnet Wiggler for SR Research Program at VEPP-4M / P. Vobly [и др.] // Т. 84. — 2016. — С. 126—130. — DOI: [10.1016/j.phpro.2016.11.022](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.022).
21. *Левичев Е. Б.* Статус и перспективы накопительного комплекса ВЭПП-4 // Письма в ЭЧАЯ. — 2016. — Т. 13. — С. 1365—1375.
22. УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-4 / А. Алешаев [и др.] // ИЯФ СО РАН. — 2011.
23. The energy calibration system of the KEDR tagger / V. Bobrovnikov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2014. — Окт. — Т. 9. — С. C10017. — DOI: [10.1088/1748-0221/9/10/C10017](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/C10017).
24. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider / V. Blinov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. —

2009. — ЯНВ. — Т. 598. — С. 23—30. — DOI: [10.1016/j.nima.2008.08.078](https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.078).
25. Beam Energy and Energy Spread Measurement by Compton Backscattering of Laser Radiation at the VEPP-4M Collider / V. Blinov [и др.] // ICFA Beam Dynamics Newsletter. — 2009. — Т. 598. — С. 195—207.
26. The KEDR detector / V. Anashin [и др.] // Physics of Particles and Nuclei. — 2013. — Июль. — Т. 44. — DOI: [10.1134/S1063779613040035](https://doi.org/10.1134/S1063779613040035).
27. The MAXIV storage ring project / P. F. Tavares [и др.] // Journal of Synchrotron Radiation. — 2014. — Сент. — Т. 21, № 5. — С. 862—877. — DOI: [10.1107/S1600577514011503](https://doi.org/10.1107/S1600577514011503). — URL: <https://doi.org/10.1107/S1600577514011503>.
28. RF system of VEPP-4M electron-positron collider / E. Gorniker [и др.] // Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference. Т. 3. — 1995. — С. 1681—1683. — URL: [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
29. *Bekhtenev E. A., Karpov G. V.* BPM System for VEPP-4M Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2018. — Т. 15, № 7. — С. 929—932. — DOI: [10.1134/S1547477118070154](https://doi.org/10.1134/S1547477118070154).
30. The upgraded optical diagnostic of the VEPP-4M collider / O. Meshkov [и др.]. — 2004. — ЯНВ.
31. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов горения и взрыва / А. Н. Алешаев [и др.] // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37. — С. 104—113. — ISSN 0430-6228.
32. *Motz H., Thon W., Whiterhurst R. N.* Experiments on Radiation by Fast Electron Beams // Journal Applied Physics. — 1953. — Т. 7. — С. 826. — DOI: [10.1063/1.1721389](https://doi.org/10.1063/1.1721389).



33. *Gluskin E., Mezentsev N.* Superconducting Wigglers and Undulators // . — 01.2019. — С. 1—51. — ISBN 978-3-319-04507-8. — DOI: [10.1007/978-3-319-04507-8\\_61-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_61-1).
34. LUVATA. — URL: <https://www.luvata.com/>.
35. COMSOL APPLICATION. — URL: [www.comsol.ru](http://www.comsol.ru).
36. *Прохоров. А. М.* Большая российская энциклопедия // . — 1969—1978.
37. *Walker R. P.* Wigglers. — 1995. — DOI: [10.5170/CERN-1995-006.807](https://doi.org/10.5170/CERN-1995-006.807). — URL: <http://cds.cern.ch/record/399409>.
38. Magnetic and current measuring equipment. — URL: <https://fwbell.com/>.
39. The new VME-based system for magnetic measurements with Hall sensors / A. Batrakov [и др.] // . — 2006. — С. 55—57. — URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-65449159472&partnerID=40&md5=f9548ce2adb801c12cdf506f0bc61a9b>.
40. КОМПЛЕКС АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТОЧНОЙ НАСТРОЙКИ ВИГГЛЕРОВ-ЗАТУХАТЕЛЕЙ НАКОПИТЕЛЯ РЕТРА III / А. Batrakov [и др.] // ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. — 2011. — С. 26—35. — ISSN 1028-0960.
41. *Карнов Г. В.* ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНИТОМЕТР НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА // АВТОМЕТРИЯ. — 2015. — Т. 51, № 1.
42. *Halbach K.* Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear Instruments and Methods. — 1980. — Т. 169, № 1. — С. 1—10. — ISSN 0029-554X. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90094-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90094-4). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X80900944>.

43. ANALYSIS OF THE NON-LINEAR FRINGE EFFECTS OF LARGE APERTURE TRIPLETS FOR THE HL-LHC PROJECT / A. Bogomyagkov [и др.]. — 2014. — ИЮНЬ.
44. Evaluation of synchrotron radiation integrals / M. Sands [и др.] // IEEE. — 1973.
45. MAD-X. — — URL: <http://cern.ch/madx>.
46. *Chao A. W.* handbook of accelerator physics and engineering. — London : World scientific publisher, 1998.
47. *Bekhtenev E. A., Karpov G. V., Piminov P. A.* A beam-position monitor system at the VEPP-4M electron-positron collider // Instruments and Experimental Techniques. — 2017. — СЕНТ. — Т. 60, № 5. — С. 679—685. — ISSN 1608-3180. — DOI: [10.1134/S0020441217050025](https://doi.org/10.1134/S0020441217050025). — URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441217050025>.
48. *Sands M.* The Physics of Electron Storage Rings: an introduction. — Stanford Linear Accelerator Center, 1971. — С. 190.
49. *Wiedemann H.* Particle Accelerator Physics, 3rd edition. — Berlin, 2007. — С. 948.
50. The longitudinal broadband impedance and energy spread measurements at VEPP-4M / V. Borin [и др.] //. — Joint Accelerator Conferences Website (JACoW), 2016. — С. 650—652. — ISBN 9783954501816. — URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85058692250&partnerID=40&md5=8cf71ee3e8b9987767237121034c66f8>.
51. *Scheidt K.* Review of Streak Cameras for Accelerators: Features, Applications and Results // Proceedings of EPAC. — 2000. — С. 181—186.
52. *Piminov P.* Status of the Electron-Positron Collider VEPP-4 // Proceedings of IPAC. — 2017. — С. 2985—2988.

53. TRANSVERSE BEAM PROFILE MEASUREMENT AT THE VEPP-4M COLLIDER / M. Fedotov [и др.] // Proceedings of EPAC. — 2002.
54. Морозов И. А. Личное сообщение. — 2020.
55. SPECTRA. — URL: <https://spectrax.org/spectra/>.
56. Tanaka T., Kitamura H. SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code // Journal of Synchrotron Radiation. — 2001. — Ноябрь. — Т. 8, № 6. — С. 1221—1228. — DOI: [10.1107/S090904950101425X](https://doi.org/10.1107/S090904950101425X). — URL: <https://doi.org/10.1107/S090904950101425X>.
57. Selective Cytotoxicity of Manganese Nanoparticles against Human Glioblastoma Cells / I. Razumov [и др.]. — 2017. — DOI: [10.1007/s10517-017-3849-0](https://doi.org/10.1007/s10517-017-3849-0).
58. Cytopathic Effects of X-ray Irradiation and MnO Nanoparticles on Human Glioblastoma (U87) / K. Kuper [и др.] // Т. 84. — 2016. — С. 252—255. — DOI: [10.1016/j.phpro.2016.11.043](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.043).
59. Applying Hard X-rays to determination of the minimum detection levels of rare earth element by the XRFA-SR method / A. Legkodymov [и др.]. — 2015. — DOI: [10.3103/S1062873815010207](https://doi.org/10.3103/S1062873815010207).
60. The SRXFA Station on the VEPP-4M Storage Ring / A. Legkodymov [и др.]. — 2019. — DOI: [10.3103/S1062873819020199](https://doi.org/10.3103/S1062873819020199).
61. Zolotarev K., Legkodymov A. The code for processing of the SRXRF spectra // Т. 2299. — 2020. — DOI: [10.1063/5.0030556](https://doi.org/10.1063/5.0030556).
62. XRF microanalysis of thick objects / V. Nazmov [и др.] // Т. 2299. — 2020. — DOI: [10.1063/5.0030498](https://doi.org/10.1063/5.0030498).
63. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load / A. Arakcheev [и др.]. — 2019. — DOI: [10.1107/S1600577519007306](https://doi.org/10.1107/S1600577519007306).

## Приложение А

### Вывод формулы для вивглера

Для описания вивглера будем рассматривать поле с симметрией относительно медианной плоскости (рисунок А.1).

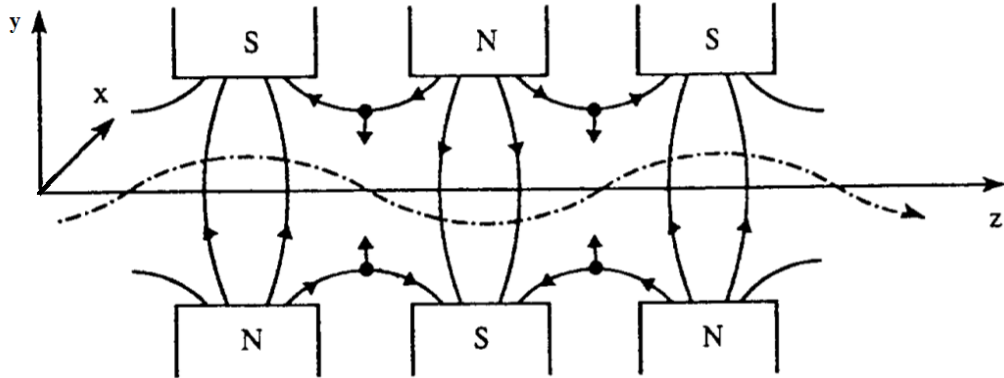


Рис. А.1. Линии магнитной индукции и траектория пучка позитронов в вивглере.

При рассмотрении стационарной задачи, можно использовать скалярный потенциал магнитного поля, который в условиях симметрии будет равен  $\varphi(x, y, z) = \varphi(x, -y, z)$ , а магнитное поле будет записываться как  $B = \nabla\varphi$ . Исходя из этого можно записать условия на симметрию компонент магнитного поля:

$$\begin{aligned} B_x(x, y, z) &= -B_x(x, -y, z), \\ B_y(x, y, z) &= B_y(x, -y, z), \\ B_z(x, y, z) &= -B_z(x, -y, z). \end{aligned} \tag{A.1}$$

Таким образом, из уравнений Максвелла следует:

$$\operatorname{div}\bar{B} = \Delta\varphi = 0. \tag{A.2}$$

Предположим, что в продольном направлении вдоль оси «z» поле изменяется по синусному закону, тогда запишем потенциал магнитного следую-

щим образом:

$$\varphi = K(x)P(y)\cos(k_w z). \quad (\text{A.3})$$

для того чтобы найти вид функций  $K(x)$  и  $P(y)$  воспользуемся выражением (A.2) и получим:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2 K(x)}{\partial x^2} P(y)\cos(k_w z) + \frac{\partial^2 P(y)}{\partial y^2} K(x)\cos(k_w z) - k_w^2 K(x)P(y)\cos(k_w z) = 0. \quad (\text{A.4})$$

Откуда можно записать, что  $\frac{1}{K(x)} \frac{\partial^2 K(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{P(y)} \frac{\partial^2 P(y)}{\partial y^2} - k_w^2 = 0$ . Что приводит к следующему соотношению:

$$k_x^2 + k_y^2 = k_w^2, \quad (\text{A.5})$$

где  $k_x^2 = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 K}{\partial x^2}$ ,  $k_y^2 = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}$ . Используя эти соотношения можем найти вид коэффициентов  $K(x)$  и  $P(y)$

$$\begin{aligned} K(x) &= \frac{e^{k_x x} + e^{-k_x x}}{2} = ch(k_x x), \\ P(y) &= \frac{e^{k_y y} - e^{-k_y y}}{2} = sh(k_y y). \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Для магнита с двумя плоскостями симметрии, вертикальной и горизонтальной, проходящими через его ось граничные условия потенциала магнитного поля можно записать:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z) &= -\varphi(x, -y, z), \\ \varphi(x, y, z) &= \varphi(-x, y, z), \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

подставив коэффициенты A.6 в A.3 получим выражение описывающее потенциал магнитного поля

$$\varphi = A_0 ch(k_x x) sh(k_y y) \cos(k_w z). \quad (\text{A.8})$$

Подставив выражение для потенциала в A.2, найдём компоненты магнитного поля.

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} = k_x A_0 \operatorname{sh}(k_x x) \operatorname{sh}(k_y y) \cos(k_w z), \\ B_y &= \frac{\partial \varphi}{\partial y} = k_y A_0 \operatorname{ch}(k_x x) \operatorname{ch}(k_y y) \cos(k_w z), \\ B_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} = -k_w A_0 \operatorname{ch}(k_x x) \operatorname{sh}(k_y y) \sin(k_w z). \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Константу  $A_0$ , в этом выражении, можно найти из условия, что  $B_y(0, 0, 0) = B_0 = A_0 k_y$ . Где  $B_0$  — максимальное значение магнитного поля. Таким образом  $A_0 = \frac{B_0}{k_y}$  и подставив это выражение в A.9 получим значения компонент магнитного поля для синусной модели вигглера.

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{k_x}{k_y} B_0 \operatorname{sh}(k_x x) \operatorname{sh}(k_y y) \cos(k_w z), \\ B_y &= B_0 \operatorname{ch}(k_x x) \operatorname{ch}(k_y y) \cos(k_w z), \\ B_z &= -\frac{k_w}{k_y} B_0 \operatorname{sh}(k_x x) \operatorname{sh}(k_y y) \sin(k_w z). \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Для получения уравнений движения, которые бы подходили для расчета нелинейных эффектов, требуется найти потенциал магнитного поля. Он находится из условия, что  $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$ . Подставив в это выражение A.10 получим выражения для векторного потенциала магнитного поля :

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{B_0}{k_w} \operatorname{ch}(k_x x) \operatorname{ch}(k_y y) \sin(k_w z), \\ A_y &= -\frac{k_x}{k_y} \frac{B_0}{k_w} \operatorname{sh}(k_x x) \operatorname{sh}(k_y y) \sin(k_w z). \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Следующим шагом необходимо найти базисную траекторию, относительно которой можно сделать разложение поля. Для базисной траектории положим, что  $y = 0$ ,  $\dot{y} = 0$ ,  $B_z = 0$  и  $B_x = 0$ .

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 &= -\frac{e}{\gamma m c} \dot{z}_0 B_y, \\ \ddot{z}_0 &= \frac{e}{\gamma m c} \dot{x}_0 B_y, \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

тут, при рассмотрении движения частицы удобнее будет заменить производную по времени производной по пройденному пути  $s$ . В этом случае  $ds = V dt$ ,

$\dot{x} = Vx'$  и  $\ddot{x} = V^2x''$ , что при подстановке в A.12 даёт:

$$\begin{aligned} x_0'' &= -\frac{e}{\gamma mcV} z_0' B_y = -K_0 z_0' \operatorname{ch}(k_x x_0) \cos(k_w z_0), \\ z_0'' &= \frac{e}{\gamma mcV} x_0' B_y = K_0 x_0' \operatorname{ch}(k_x x_0) \cos(k_w z_0), \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

где  $K_0 = \frac{eB_0}{\gamma mcV}$ . Если учесть, что змейка обладает бесконечными плоскопараллельными полюсами, то в A.13  $k_x \rightarrow 0$ , а  $\operatorname{ch}(k_x x) \rightarrow 1$  тогда получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} x_0'' &= -K_0 z_0' \cos(k_w z_0), \\ z_0'' &= K_0 x_0' \cos(k_w z_0), \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Из A.14 можно легко найти, что  $x_0' = -\frac{K_0}{k_w} \sin(k_w z_0)$  из чего следует:  $z_0'^2 = 1 - x_0'^2 = 1 - \frac{K_0^2}{k_w^2} \sin^2(k_w z_0) \approx 1$ . Это даёт следующие уравнения базисной траектории:

$$\begin{aligned} x_0 &= -\frac{K_0}{k_w} \cos(k_w s), \\ z_0 &= s. \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Далее, чтобы получить разложение поля на базисной траектории перейдём в сопутствующий базис, так как показано на рисунке A.2 .

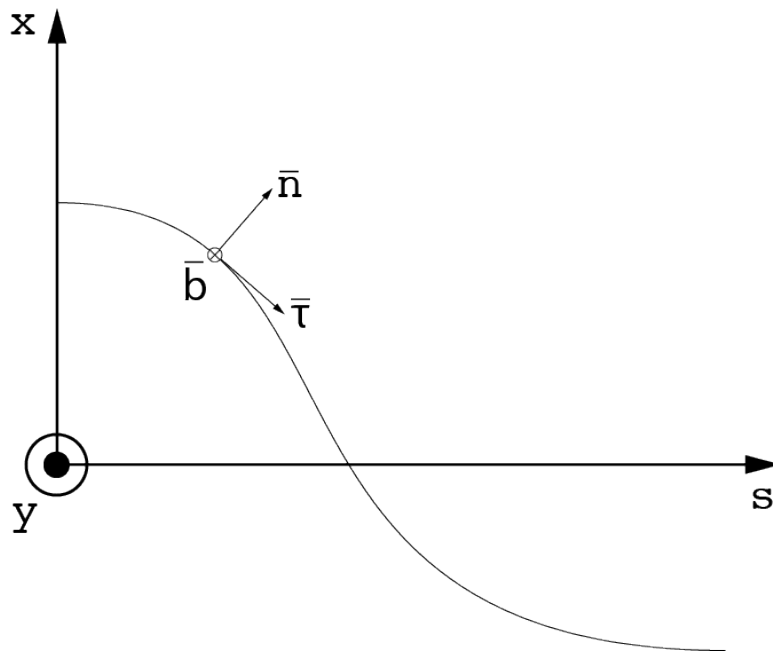


Рис. А.2. Сопутствующий базис.

Для удобства введём радиус вектор  $\bar{r}_0 = (x_0, 0, z_0)$ .

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= \frac{d\bar{r}}{ds} = (x'_0, 0, z'_0), \\ \bar{n} &= -\frac{1}{K} \frac{d^2\bar{r}_0}{ds^2} = (z'_0, 0, x'_0), \\ \bar{b} &= \bar{n} \times \bar{\tau} = (0, -1, 0).\end{aligned}\tag{A.16}$$

В таком случае можно записать компоненты сопутствующего базиса как:

$$\begin{aligned}\bar{a}_1 &= \bar{n} = \frac{d\bar{r}}{dx_1}, \\ \bar{a}_2 &= \frac{d\bar{r}}{ds} = (1 + Kx_1)\bar{\tau}, \\ \bar{a}_3 &= \bar{b} = \frac{d\bar{r}}{dy_1},\end{aligned}\tag{A.17}$$

где  $\bar{r} = \bar{r}_0 + x_1\bar{n} + y_1\bar{b}$ , а  $\{x_1, s, y_1\}$  — новые координаты. В таком случае, связь между старыми и новыми координатами, при условии, что  $\{x, y, z\} = \{x_0, 0, z_0\} + x_1\bar{n} + y_1\bar{b}$ :

$$\begin{aligned}x &= x_0 + x_1, \\ y &= -y_1, \\ z &= z_0 + x_1x'_0 \approx z_0.\end{aligned}\tag{A.18}$$

Всё это позволяет найти поля в новом базисе, которые будут следующими:

$$\begin{aligned}B^1 &= \bar{B}\bar{a}_1 = B_x z'_0 - B_z x'_0 = \\ &= -B_0 \left[ z'_0 \frac{k_x}{k_y} \operatorname{sh}(k_x(x_0 + x_1)) \operatorname{sh}(k_y y_1) \cos(k_w(z_0 + x_1 x'_0)) + \right. \\ &\quad \left. + x'_0 \frac{k_w}{k_y} \operatorname{sh}(k_x(x_0 + x_1)) \operatorname{sh}(k_y y_1) \sin(k_w(z_0 + x_1 x'_0)) \right], \\ B^2 &= \bar{B}\bar{a}_2 = (B_x x'_0 + B_z z'_0)(1 + Kx_1) = \\ &= -B_0(1 + Kx_1) \left[ x'_0 \frac{k_x}{k_y} \operatorname{sh}(k_x(x_0 + x_1)) \operatorname{sh}(k_y y_1) \cos(k_w(z_0 + x_1 x'_0)) - \right. \\ &\quad \left. - z'_0 \frac{k_w}{k_y} \operatorname{sh}(k_x(x_0 + x_1)) \operatorname{sh}(k_y y_1) \sin(k_w(z_0 + x_1 x'_0)) \right], \\ B^3 &= \bar{B}\bar{a}_3 = -B_y = B_0 \operatorname{ch}(k_x(x_0 + x_1)) \operatorname{ch}(k_y y_1) \cos(k_w(z_0 + x_1 x'_0)),\end{aligned}\tag{A.19}$$



а так же потенциал в новом базисе с учётом A.11:

$$\begin{aligned}
A^1 &= \bar{A}\bar{a}_1 = A_x z'_0 = z'_0 \frac{B_0}{k_w} \text{ch}(k_x(x_0 + x_1)) \text{ch}(k_y y_1) \sin(k_w(z_0 + x_1 x'_0)), \\
A^2 &= \bar{A}\bar{a}_2 = (A_x x'_0)(1 + Kx_1) = \\
&= (1 + Kx_1) x'_0 \frac{B_0}{k_w} \text{ch}(k_x(x_0 + x_1)) \text{ch}(k_y y_1) \sin(k_w(z_0 + x_1 x'_0)), \\
A^3 &= \bar{A}\bar{a}_3 = -A_y = \\
&= -\frac{k_x}{k_y} \frac{B_0}{k_w} \text{sh}(k_x(x_0 + x_1)) \text{sh}(k_y y_1) \sin(k_w(z_0 + x_1 x'_0)).
\end{aligned} \tag{A.20}$$

Для того чтобы найти вклад вигглера в нелинейную динамику пучка, в том числе зависимость частоты от амплитуды, необходимо записать Гамильтониан:

$$\begin{aligned}
H &= -\frac{e}{p_0 c} A_2 - (1 + K_0 x_1) [(1 + p_t)^2 - (p_x - \frac{e}{p_0 c} A_1)^2 - \\
&\quad - (p_y - \frac{e}{p_0 c} A_3)^2]^{\frac{1}{2}} + 1 + p_t \approx \\
&\approx -\frac{e}{p_0 c} A_2 - K_0 x_1 (1 + p_t) + \frac{(p_x - \frac{e}{p_0 c} A_1)^2}{1 + p_t} + \frac{(p_y - \frac{e}{p_0 c} A_3)^2}{1 + p_t}.
\end{aligned} \tag{A.21}$$

Подставив в A.21 выражения для потенциала A.20 и усреднив все по периоду змейки получим:

$$\begin{aligned}
\langle H \rangle_{\lambda_z} &= \frac{p_x^2 + p_y^2}{2(1 + p_t)} + \frac{K_0^2 \text{ch}(k_x x_0)}{2k_w^2} + x \frac{K_0^2 k_x \text{sh}(k_x x_0)}{2k_w^2} + \\
&+ (x^2 \frac{k_x^2}{k_y^2} + y^2) \frac{K_0^2 k_y^2 \text{ch}(k_x x_0)}{4k_w^2} + \frac{(x^3 \frac{k_x^2}{k_y^2} + 3xy^2) K_0^2 k_x k_y^2 \text{sh}(k_x x_0)}{12} + \\
&+ \frac{(x^4 \frac{k_x^4}{k_y^4} + 6x^2 y^2 \frac{k_x^2}{k_y^2} + y^4) K_0^2 k_y^4 \text{ch}(k_x x_0)}{48k_w^2},
\end{aligned} \tag{A.22}$$

для перехода к каноническим переменным действие – фаза, воспользуемся следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
u &= \sqrt{2J_{x,y} \beta_{x,y}} \cos(\mu_{x,y}), \\
p_{x,y} &= -\sqrt{\frac{2J_{x,y}}{\beta_{x,y}}} (\sin(\mu_{x,y}) + \alpha_{x,y} \cos(\mu_{x,y})),
\end{aligned} \tag{A.23}$$

где  $u$  — поперечная координата. Подставив A.23 в A.22 и усреднив по фазе воспользовавшись формулой  $\Delta\nu_{x,y} = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{\langle H \rangle_{\lambda_z, \mu_{x,y}}}{J_{x,y}} ds$  получим:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_y &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\lambda_w \bar{\gamma}_y}{2} + \frac{K_0^2 k_y^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y}{4k_w^2} + \right. \\ &+ J_x \frac{K_0^2 k_x^2 k_y^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y \bar{\beta}_x}{8k_w^2} + J_y \frac{K_0^2 k_y^4 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y^2}{16k_w^2} \left. \right), \\ \Delta\nu_x &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\lambda_w \bar{\gamma}_x}{2} + \frac{K_0^2 k_x^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_x}{4k_w^2} + \right. \\ &+ J_y \frac{K_0^2 k_x^2 k_y^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y \bar{\beta}_x}{8k_w^2} + J_x \frac{K_0^2 k_x^4 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_x^2}{16k_w^2} \left. \right), \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

где  $\gamma = (1 + \alpha^2)/\beta$  — параметр Твисса. В выражениях A.24, присутствуют кинематические члены, которыми можно пренебречь в силу достаточно больших бета-функций в вигглере, а так же члены отвечающие за сдвиг частоты вносимый одним периодом вигглера:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_y &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_0^2 k_y^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y}{4k_w^2} \right) \xrightarrow{k_x=0, k_w=k_y} \frac{1}{4k_w} \left( \frac{\bar{\beta}_y}{\rho_w^2} \right), \\ \Delta\nu_x &= \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_0^2 k_x^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_x}{4k_w^2} \right) \xrightarrow{k_x=0, k_w=k_y} 0. \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

Оставив в выражениях A.24 только члены при  $J$  получим:

$$\begin{aligned} \Delta\nu_x &= \alpha_{xx} J_x + \alpha_{xy} J_y, \\ \Delta\nu_y &= \alpha_{yy} J_y + \alpha_{xy} J_x, \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

где коэффициенты при  $J$  для одного периода вигглера равны:

$$\begin{aligned} \alpha_{yy} &= \frac{K_0^2 k_y^4 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y^2}{32\pi k_w^2}, \\ \alpha_{xx} &= \frac{K_0^2 k_x^4 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_x^2}{32\pi k_w^2}, \\ \alpha_{xy} &= \frac{K_0^2 k_x^2 k_y^2 \operatorname{ch}(k_x x_0) \lambda_w \bar{\beta}_y \bar{\beta}_x}{16\pi k_w^2}. \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Современные технологии изготовления позволяют делать достаточно однородное магнитное поле в поперечном направлении, что в свою очередь со-

ответствует случаю змейки с бесконечно длинными плоскопараллельными полюсами. В этой связи можно положить что  $k_x = 0$ . Тогда исходя из A.5,  $k_w = k_y$  и таким образом коэффициенты  $\alpha_{xx} = 0$  и  $\alpha_{xy} = 0$ , а  $\alpha_{yy}$  получает довольно изящную запись для одного периода:

$$\alpha_{yy} = \frac{k_w}{4} \left( \frac{\bar{\beta}_y}{\rho_w} \right)^2 \quad (\text{A.28})$$

## Приложение Б

### Радиационные интегралы

Интересующие нас радиационные интегралы записываются следующим образом :

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \oint \left( \frac{\eta}{\rho} \right) ds, \\
 I_2 &= \oint \left( \frac{1}{|\rho|^2} \right) ds, \\
 I_3 &= \oint \left( \frac{1}{|\rho|^3} \right) ds, \\
 I_4 &= \oint \frac{\eta}{\rho^3} (1 \pm 2\rho^2 k) ds, \\
 I_5 &= \oint \left( \frac{H}{|\rho|^3} \right) ds,
 \end{aligned} \tag{Б.1}$$

где  $\eta$  — дисперсионная функция,  $\rho$  — радиус кривизны траектории,  $k$  — фокусирующая сила на азимуте и  $H(s) = \beta\eta'^2 + 2\alpha\eta\eta' + \gamma\eta^2$ .

Для вывода радиационных интегралов положим, что поле на равновесной орбите вигглера косинусоподобно и не меняется в поперечном направлении (что соответствует случаю вигглера с бесконечно широкими полюсами). Тогда поле на равновесной орбите, кривизну и дисперсионную функцию в вигглере можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 B_y(s) &= B_0 \cos(k_w s), \\
 h(s) &= \frac{B_0}{B\rho} \cos(k_w s) = \frac{1}{\rho_0} \cos(k_w s), \\
 \eta(s) &= -\frac{1}{\rho_0 k_w^2} \cos(k_w s) + \eta_0,
 \end{aligned} \tag{Б.2}$$

$\rho_0$  — кривизна траектории.

Кроме этого понадобятся функции Твисса которые в общем виде запи-

сываются как:

$$\begin{aligned}\beta(s) &= \beta_0 - 2\alpha_0 s + \gamma_0 s^2, \\ \alpha(s) &= \alpha_0 - \gamma_0 s, \\ \gamma(s) &= \gamma_0.\end{aligned}\tag{Б.3}$$

Радиационные интегралы вносимые вигглером:

$$I_{2w} = \frac{N_w \pi}{\rho_w^2 k_w}, \quad I_{3w} = \frac{8N_w}{3\rho_w^3 k_w},\tag{Б.4}$$

$$I_{4w} = -\frac{3N_w \pi}{4\rho_w^4 k_w^3}, \quad I_{5w} \approx \frac{8N_w \pi \bar{\beta}_x}{15\rho_w^5 k_w^3} + \frac{8N_w \bar{\eta}_x}{3\rho_w^3 k_w}.$$

Тогда энергетический разброс и эмиттанс определяется формулами:

$$\begin{aligned}(\sigma_E)^2 &= C_q \gamma^2 \frac{I_3}{2I_2 + I_4}, \\ \epsilon &= \frac{C_q \gamma^2 I_5}{J I_2},\end{aligned}\tag{Б.5}$$

где  $C_q = 3.84 \cdot 10^{-13} \text{м}$  и  $J = \frac{1}{1 - I_4/I_2}$ .

Изменение энергетического разброса вносимого вигглером можно записать как:

$$\frac{\sigma_{Ew}^2}{\sigma_E^2} = \frac{1 + \frac{I_{3w}}{I_3}}{1 + \frac{2I_{2w} + I_{4w}}{2I_2 + I_4}}.\tag{Б.6}$$

Влияние на эмиттанс можно посчитать через радиационные интегралы пользуясь формулой:

$$\frac{\epsilon_w}{\epsilon_0} = \frac{1 + I_{5w}/I_5}{1 + \frac{I_{2w} - I_{4w}}{I_2 - I_4}}.\tag{Б.7}$$

Потери энергии за оборот ( $U_0$ ) - позволяют правильно подобрать параметры ВЧ резонаторов и задаются формулой:

$$U_0 = \frac{C_\gamma}{2\pi} E^4 I_2,\tag{Б.8}$$

где  $C_\gamma = 8.84 \cdot 10^{-5} \text{м}/\text{GeV}^3$ .