



Баранов Григорий Николаевич

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

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ — доктор физико-математических наук  
Левичев Евгений Борисович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОСТРОМИН — доктор физико-математических наук,  
Сергей Международная межправительственная ор-  
Александрович ганизация Объединенный институт ядер-  
ных исследований, помощник директора  
по реализации крупных инфраструктурных  
проектов

ПРУУЭЛ — кандидат физико-математических наук,  
Эдуард Федеральное государственное бюджетное  
Рейнович учреждение науки Институт гидродинами-  
ки им. М.А. Лаврентьева Сибирского отде-  
ления Российской академии наук, замести-  
тель директора по научной работе

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Институт физики высоких  
энергий имени А.А. Логунова Националь-  
ного исследовательского центра «Курчатов-  
ский институт»

Защита состоится «15» апреля 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссер-  
тационного совета *24.1.162.02* на базе ИЯФ СО РАН, расположенном по адресу:  
*630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО РАН и на сайте:  
<https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «28» февраля 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



Багрянский Петр Андреевич

## Общая характеристика работы

### **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 оптимизирован-

ные ускорители с малым эмиттансом, широко применяющие излучение специальных генераторов — вигглеров и ондуляторов. Источники СИ четвертого, самого современного, поколения предполагают использование пучка электронов с ультрамалым эмиттансом  $\sim 100$  пм и обладают высочайшей яркостью. В Новосибирске в настоящее время создается источник СИ четвертого поколения СКИФ с энергией 3 ГэВ и натуральным горизонтальным эмиттансом 73 пм [2].

Несмотря на распространённость современных источников СИ третьего и четвертого 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 — первая многополюсная сверхпроводящая змейка была сделана в ИЯФ СО РАН и применена на ВЭПП-3 [9].

Поскольку яркость ВЭПП-4М невелика, здесь возможны только некоторые 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  $\sim 20$  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 срав-

нению 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  $\sim 50\text{--}100$  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 гибридный вигглер для получения жёсткого спектра рентгеновского излучения впервые 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.**

На накопитель электронов впервые установлен гибридный вигглер, в котором магнитное поле создаётся комбинацией токовых обмоток и постоянных магнитов. Постоянные магниты, перераспределяя поток индукции магнитного поля, создаваемый 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:**

- Проведены двухмерный и трехмерный расчёты и оптимизация магнитного поля гибридного многополюсного вигглера. Дано 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 всём 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 также мощности, генерируемой вигглером. Преимущество нового устройства для генерации жёсткого 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 статей в рецензируемых журналах [10; 15–18], 2 статьи опубликованы в сборниках трудов конференций [19; 20].

### **Личный вклад автора.**

Автор принимал активное участие на всех этапах расчёта и создания гибридного вигглера, его 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 объём диссертации.**

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



## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** даётся краткое описание комплекса ВЭПП-4, его параметры и особенности работы в разных режимах.

Дано подробное описание магнитной структуры ВЭПП-4М, которая имеет форму рейстрека и состоит из двух зеркально симметричных полуколец, разделённых двумя длинными промежутками — экспериментальным (где расположен универсальный магнитный детектор КЕДР [21]) и техническим (где размещаются ускоряющие резонаторы и система инжекции).

Особое внимание уделяется системам, которые связаны с проведением экспериментальных исследований, описываемых в пятой главе. Описываются электростатические датчики положения центра тяжести пучка (пикап-электроды), использовавшиеся при измерении влияния нового вигглера на линейную и нелинейную оптику ВЭПП-4М. Также описывается ФЭУ, использовавшийся для пооборотной регистрации пучков малой интенсивности, ПЗС-камера для измерения поперечных размеров пучка, диссектор [22], который применялся для определения продольного размера.

**Во второй главе** обсуждается конструкция гибридного вигглера (рисунок 1), приводятся результаты расчётов, находятся токи корректирующих обмоток, требуемые для зануления первого и второго интегралов поля. Кратко описывается процесс изготовления нового гибридного вигглера и обосновываются основные технологические решения, применённые при разработке.

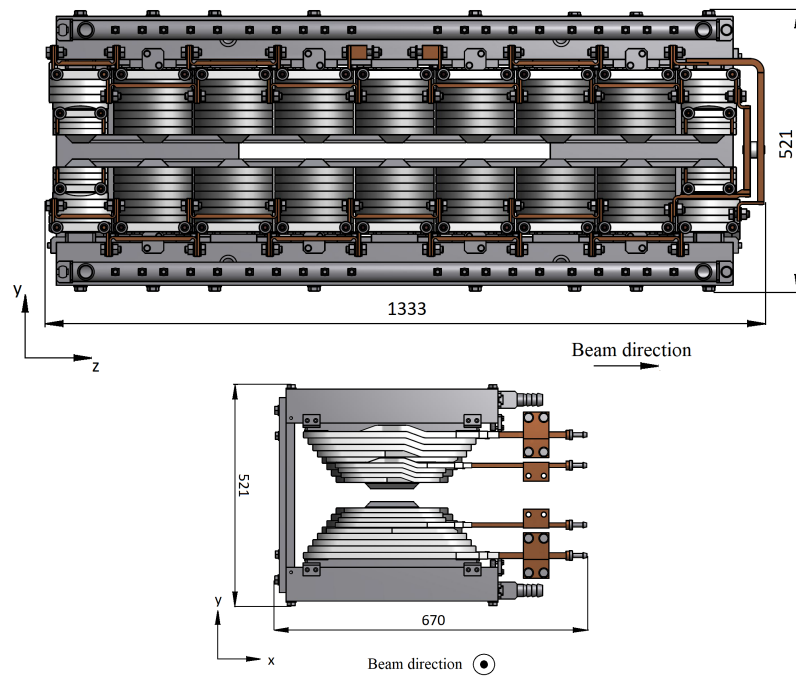


Рис. 1. Общий вид гибридного многополюсного вигглера для ВЭПП-4М. Вверху — вид сбоку, внизу — с торца.

Комбинация электромагнитов и постоянных магнитов в одной конструкции (идея [П.Д. Воблого]) даёт наилучшие результаты по жёсткости и интенсивности СИ при существующих ограничениях. При этом сильные постоянные магниты не создают поле непосредственно на орбите, а перераспределяют поток магнитной индукции, создаваемый токовыми обмотками электромагнита таким образом, чтобы амплитуда поля в зазоре устройства увеличилась.

**В третьей главе** описаны аппаратура и методика измерения магнитного поля вигглера. Приводятся результаты измерений продольного и поперечного распределений поля при различных условиях. Измеренный профиль вертикальной составляющей поля вигглера в медианной плоскости при максимальном токе в катушках показан на рисунке 2. 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, приведёнными в Главе 2) до 1.905 Тл [15].

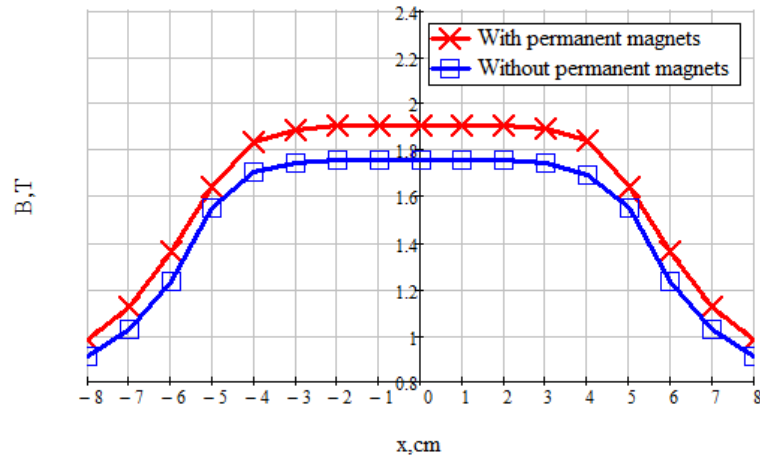


Рис. 2. Поперечное распределение вертикальной компоненты поля в центральном сечении полюса вигглера со снятыми (синяя кривая) и поставленными (красная крива) постоянными магнитами.

Экспериментально определяются токи обмоток коррекций, необходимые для того, чтобы вигглер не вносил искажения в орбиту пучка ВЭПП-4М.

**В четвертой главе** описывается исследование влияния гибридного вигглера на движение частиц в ВЭПП-4М. Рассматриваются такие аспекты, как влияние поля вигглера на линейную оптику, сдвиг бетатронной частоты и его компенсация магнитной системой ВЭПП-4М, изменение радиационных параметров пучка (энергетический разброс, эмиттанс и т.п.), нелинейное движение частиц (зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды). Приведены простые оценочные формулы, полученные для модели косинусного поля вигглера. Аналитические оценки сравниваются с численным моделированием.

Моделирование влияния гибридного вигглера на радиационные параметры ВЭПП-4М проводилось для кусочно-постоянного представления поля, описанного в этой главе. Расчёты проводились на энергии 1.9 ГэВ. Результаты приведены в таблице 2. 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 2. 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
$I_1(m)$	6.12	6.12	6.12
$I_2(m^{-1})$	0.198	0.252	0.236
$I_3(m^{-2})$	0.0073	0.0213	0.0165
$I_4(m^{-1})$	-0.027	-0.027	-0.027
$I_5(m^{-1})$	0.001	0.003	0.0026
$U_0(\text{КэВ})$	36.3	47	42
$\epsilon(\text{нм} \cdot \text{rad})$	24	54	51
$\frac{\sigma}{E} \cdot 10^4$	3.2	4.4	4.3

В пятой главе приводится методика и результаты экспериментального исследования поведения пучка в ВЭПП-4М в присутствии гибридного вигглера.

Описывается эксперимент по измерению искажения замкнутой орбиты, которое вносит вигглер в случае выключенных источников питания коррекции. Представлены экспериментальные данные по измерению сдвига бетатронной частоты, вносимого вигглером. На рисунке 3 показан измеренный сдвиг вертикальной бетатронной частоты (точки) в зависимости от амплитуды поля в вигглере.

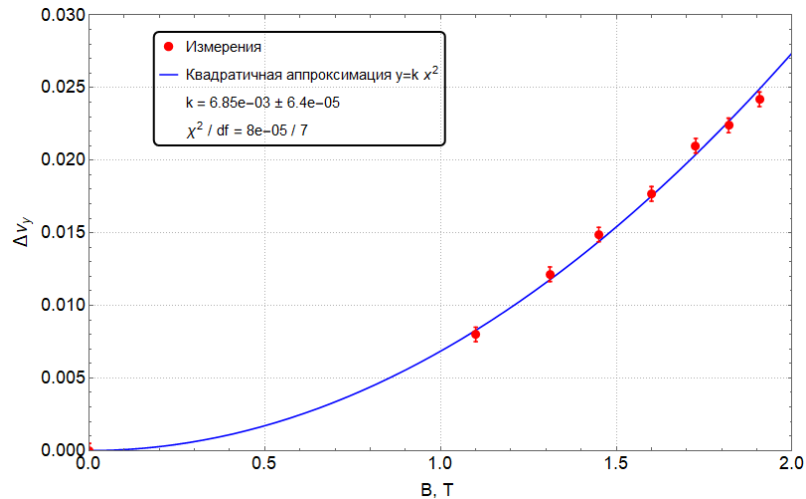


Рис. 3. Сдвиг вертикальной бетатронной частоты в вигглере.

Описываются режимы, используемые для измерений нелинейного влияния вигглера. Измеренная зависимость частоты от амплитуды бетатронных колебаний показана на рисунках 4 и 5.

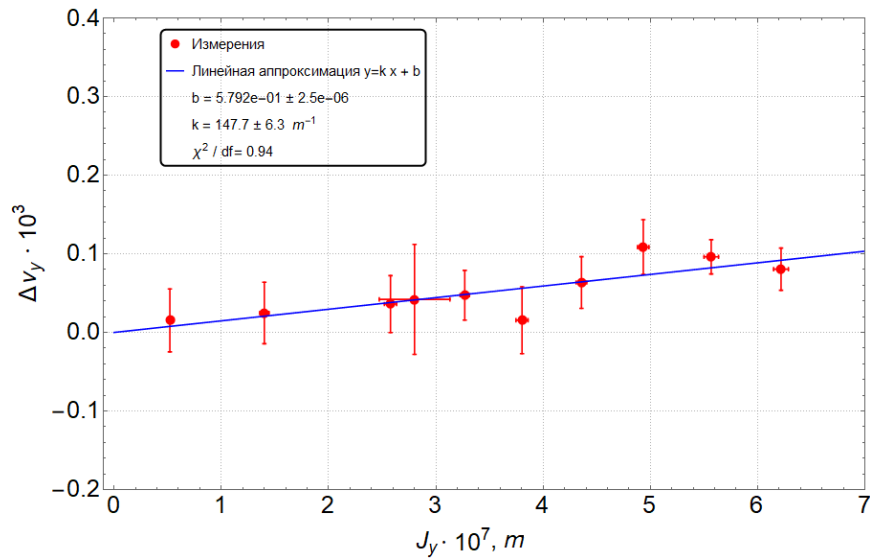


Рис. 4. Зависимость вертикальной частоты от  $J_y$  в структуре без октуполей. Режим «В4-Ок».

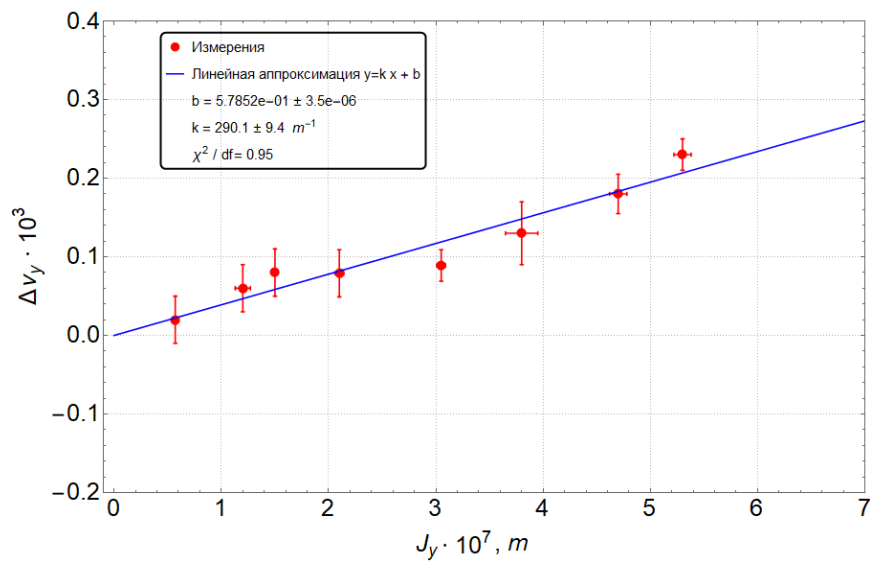


Рис. 5. Зависимость вертикальной частоты от  $J_y$  в структуре без октуполей и с включённым гибридным вигглером. Режим «В4+ГВ-Ок».

Сравнение зависимостей частоты от амплитуды (рисунки 4 и 5) позволяет определить собственный вклад нелинейного поля гибридного вигглера в зависимость частоты вертикальных бетатронных колебаний от амплитуды (выраженной в величинах действия). 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 в Главе 4.

Кроме того, в этой главе описывается влияние гибридного вигглера на энергетический разброс и эмиттанса пучка. Результаты исследования приведены в таблице 3:

Таблица 3. Измеренные энергетический разброс, горизонтальный размер и эмиттанс пучка

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

Сравнения полученных результатов с аналитической оценкой и моделированием с использованием измеренного поля вигглера показывает хорошее согласие.

**В шестой главе** оценивается изменение «потребительских» характеристик излучения из нового вигглера по сравнению со старым (мощность, спектральный поток). График плотности потока СИ в зависимости от энергии фотонов, рассчитанный программой SPECTRA, показан на рисунке 6. Оценка производилась для энергии электронов 4.5 ГэВ, максимальном поле вигглера и токе пучка 20 мА.

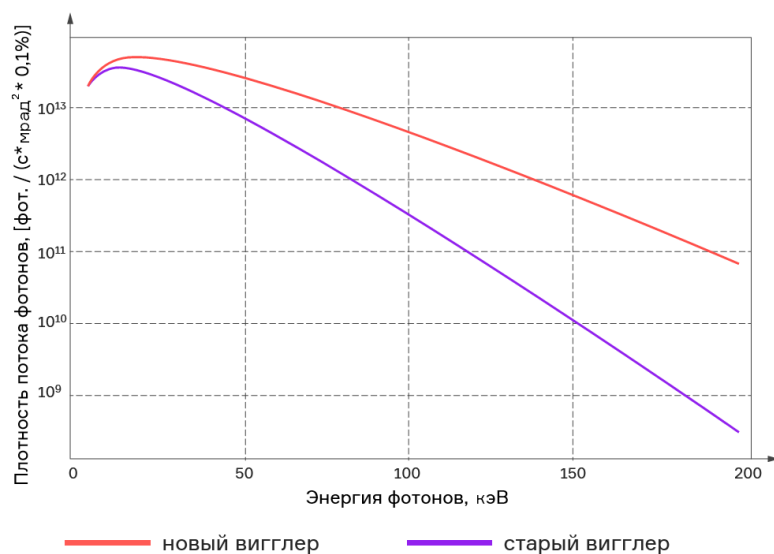


Рис. 6. Плотность потока фотонов из нового и старого вигглера.

Для сравнения на том же рисунке 6 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.

На примере нескольких экспериментов с синхротронным излучением показано преимущество гибридного вигглера.

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 терапией, при этом дозы облучения составляли от 1 Гр до 160 Гр. Это даёт повышение эффективности методов радиационной терапии рака [23; 24].

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 (рентгенофлуоресцентный элементный анализ) 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 [10; 25]. 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.

На станции рассеяния синхротронного излучения «Плазма» ВЭПП-4М введение в эксплуатацию нового гибридного вигглера позволило увеличить толщину образцов с 200 мкм до 450 мкм [26]. 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 длительно-

сти импульсного нагрева за время нагрева около 200 мкм. То есть с увеличенной толщиной задняя сторона образца во время импульсного нагрева остаётся холодной, что соответствует реальной ситуации.

**В Заключение** приводятся основные результаты работы, которые состоят в следующем:

- 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 моделировать все основные эффекты, вносимые вигглером в динамику пучка ВЭПП-4М.
- Теоретически рассмотрены основные аспекты влияния гибридного вигглера на пучок электронов в накопителе. Исследования включали измерение возмущения 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. По-оборотные 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%.

- 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.

## Цитированная литература

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. — Apr. — Vol. 38, no. 9. — P. 773–797. — 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 [et al.] // *Synchrotron Radiation News*. — 2006. — Vol. 19, no. 3. — P. 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 [et al.] // *Proceedings of RuPAC*. — 2006.
5. DAFNE-Light INFN-LNF Synchrotron Radiation Facility / A. Balerna [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. — 2010. — June. — Vol. 1234, no. 1. — ISSN 0094-243X. — DOI: [10.1063/1.3463191](https://doi.org/10.1063/1.3463191).
6. *Chuang Z.* BEPC II: construction and commissioning // *Chinese Physics C*. — 2009. — June. — Vol. 33. — P. 60–64. — DOI: [10.1088/1674-1137/33/S2/016](https://doi.org/10.1088/1674-1137/33/S2/016).
7. OPERATION AND PLANS ON THE ACCELERATOR COMPLEX IN KURCHATOV CENTER OF SYNCHROTRON RADIATION / V. Korchuganov [et al.] // *Proceedings of RuPAC XIX*. — 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. First results of the work with a superconducting "snake" at the VEPP-3 storage ring / A. Artamonov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods. — 1980. — Vol. 177, no. 1. — P. 239–246. — ISSN 0029-554X. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90556-X](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90556-X).
10. The SRXFA Station on the VEPP-4M Storage Ring / A. A. Legkodymov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2019. — Vol. 83, no. 2. — P. 112–115.
11. Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н. Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // Успехи физических наук. — 1977. — Т. 122, № 7. — С. 369–418. — DOI: [10.3367/UFNr.0122.197707a.0369](https://doi.org/10.3367/UFNr.0122.197707a.0369).
12. Short-period equipotential-bus electromagnetic undulator for a far infrared free-electron laser / Y. Jeong [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1998. — Vol. 407, no. 1–3. — P. 396–400.
13. *Halbach K.* Some concepts to improve the performance of dc electromagnetic wigglers // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. — 1986. — Vol. 250, no. 1/2. — P. 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. — Vol. 246, no. 1–3. — P. 77–81.
15. Design and Magnetic Measurements of a Hybrid Wiggler for SR Research Program at VEPP-4 / P. Vobly [et al.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2018. — Vol. 28, no. 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 [et al.] // Journal of Surface Investigation. — 2020. — Vol. 14, no. 1. — P. 150–154.
17. Hybrid Nine-Pole Wiggler as a Source of "Hard" X-ray Radiation at the VEPP-4 Accelerator Complex / G. Baranov [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2020. — Vol. 14. — P. 1290–1293. — DOI: [10.1134/S1027451020060269](https://doi.org/10.1134/S1027451020060269).

18. Beam optics and dynamics in electron storage rings with ultralow emittance / G. Baranov [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2016. — Vol. 13, no. 7. — P. 884–889. — DOI: [10.1134/S1547477116070086](https://doi.org/10.1134/S1547477116070086).
19. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 / P. Piminov [et al.] // Physics Procedia. — 2016. — Vol. 84. — P. 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 / G. Baranov [et al.] // Physics Procedia. — 2016. — Vol. 84. — P. 126–130. — ISSN 18753884. — DOI: [10.1016/j.phpro.2016.11.022](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.022).
21. The KEDR detector / V. Anashin [et al.] // Physics of Particles and Nuclei. — 2013. — July. — Vol. 44. — DOI: [10.1134/S1063779613040035](https://doi.org/10.1134/S1063779613040035).
22. The upgraded optical diagnostic of the VEPP-4M collider / O. Meshkov [et al.] // Proceedings of EPAC. — 2004. — Jan.
23. Selective Cytotoxicity of Manganese Nanoparticles against Human Glioblastoma Cells / I. Razumov [et al.] // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. — 2017. — Vol. 163, no. 4. — P. 1–5. — DOI: [10.1007/s10517-017-3849-0](https://doi.org/10.1007/s10517-017-3849-0).
24. Cytopathic Effects of X-ray Irradiation and MnO Nanoparticles on Human Glioblastoma (U87) / K. Kuper [et al.] // Physics Procedia. — 2016. — Vol. 84. — P. 252–255. — DOI: [10.1016/j.phpro.2016.11.043](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.043).
25. *Zolotarev K. V., Legkodymov A. A.* The code for processing of the SRXRF spectra // AIP Conference Proceedings. — 2020. — Vol. 2299, no. 1. — P. 070009. — DOI: [10.1063/5.0030556](https://doi.org/10.1063/5.0030556).
26. Dynamic observation of X-ray Laue diffraction on single-crystal tungsten during pulsed heat load / A. Arakcheev [et al.] // Journal of Synchrotron Radiation. — 2019. — Vol. 26. — P. 1644–1649. — DOI: [10.1107/S1600577519007306](https://doi.org/10.1107/S1600577519007306).

Баранов Григорий Николаевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук на тему:

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

Подписано в печать 17.02.2022 г.

Формат 60 × 90 1/16. Объем 1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4.

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

*630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11*