



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)

площадь Науки, д. 1, г. Протвино,
Московская область, 142281

тел.: (4967) 71-36-23, факс: (4967) 74-28-24

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИЦ «Курчатовский
институт»-ИФВЭ, академик РАН

С.В. Иванов

14 марта 2022 г.



14.03.2022 № 700-708-13/341

15311-

На № 10/6214.1-255 от 10.02.2022

Отзыв на диссертацию (к.ф-м.н.) Г.Н. Баранова,
ИЯФ СО РАН

Отзыв ведущей организации — Института физики высоких
энергий НИЦ «Курчатовский институт» на диссертацию Бара-
нова Григория Николаевича на тему «Многополюсный ги-
бридный вигглер для генерации жёсткого интенсивного син-
хротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М», представ-
ленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В настоящее время в мире наблюдается устойчивый интерес к использованию синхротронного излучения (далее СИ) для исследования свойств веществ, материалов и объектов. Основные области применения — физика конденсированных сред, материаловедение, биология и медицина. Главным образом, в прикладных целях применяется СИ, испускаемое ультраквазистатическими электронами, поворачивающими в поперечном к направлению движения магнитное поле в электронных синхротронах. СИ обладает рядом уникальных свойств (узкая направленность, высокие поток и яркость, поляризация, когерентность, возможность перестройки длины волны и изменения размера источника), которые делают его мощным и востребованным исследовательским инструментом.

В настоящее время в мире действует около пятидесяти специализированных ускорительных комплексов — источников СИ (Япония, США, Европа, Китай). Источники СИ — это наиболее распространённый класс резонансных ускорителей электронов

релятивистских энергий.

В Российской Федерации реализуются два новых проекта современных источников СИ: установка ЦКП СКИФ (Новосибирск) и СИЛА (Москва/Протвино). В этом контексте особую значимость получают практические работы на действующих национальных установках с исследовательскими каналами СИ. Такую именно возможность предоставляет электрон-позитронный накопитель ВЭПП-4М, ныне работающий в ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

В 2014 году было принято решение улучшить экспериментальные возможности ВЭПП-4М как источника СИ путем заметного увеличения потока излучения в области жёстких гамма-квантов с энергиями 50–100 кэВ. Для этого было предложено заменить старый вигглер-излучатель на новый с увеличенным числом полюсов и большей индукцией магнитного поля на орбите пучка. Учитывая, что устройство должно было вписаться в габариты 150 см по длине и 50×50 см² в поперечном сечении, это оказалось достаточно сложной задачей.

В результате проведённой автором диссертации работы был разработан, изготовлен поставлен на ВЭПП-4М и введен в эксплуатацию уникальный гибридный вигглер, применяющий в своей конструкции как электро-, так и постоянные магниты. Установка этого вигглера позволила увеличить магнитное поле в зазоре, число полюсов. В результате увеличен поток СИ с энергией гамма-квантов вблизи 100 кэВ приблизительно в 30–40 раз.

Диссертационная работа посвящена обоснованию, расчётом и разработке конструкторско-технологических, габаритно-компоновочных и производственных решений многополюсного гибридного вигглера для генерации жёсткого интенсивного синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-4М.

*В свете изложенного **актуальность темы** обсуждаемой диссертации не вызывает сомнений.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Проведены магнитостатические и конструкторские расчёты гибридного вигглера. Достоверность расчётов подтверждена результатами магнитных измерений. Расчёто-теоретически и экспериментально рассмотрены различные аспекты влияния гибридного вигглера на пучок ВЭПП-4М, включая вопросы линейного и нелинейного бетатронного движения и поправок в радиационные интегралы оптики. Полученный опыт и разработанная методика может быть использована при создании вигглеров и ондуляторов для иных источников СИ.

В результате проделанной работы был создан уникальный гибридный вигглер, в котором магнитное поле генерируется комбинацией постоянных и электро-магнитов. Такая конструкция позволила поднять максимальное поле в зазоре и увеличить число полюсов. Это привело к существенному увеличению потока жестких гамма-квантов, востребованного целым рядом потребителей рентгеновского пучка на ВЭПП-4М.

Новый вигглер был установлен в прямолинейный промежуток на место старого устройства без переделки окружающих магнитной и вакуумной систем накопителя; не потребовалась и переделка головных частей (фронт-эндов), коллиматоров и другого оборудования каналов вывода СИ на экспериментальные станции. Все это позволило ввести новое устройство в эксплуатацию в короткие сроки и с минимальными затратами.

Новый гибридный вигглер позволил значительно увеличить эффективность и расширить экспериментальные возможности программы исследований на действующей установке ВЭПП-4М с применением СИ в области жёсткого рентгена вплоть до энергии гамма-квантов 100 кэВ и выше.

Оригинальные конструкторско-технологические решения, обоснованные и предложенные в диссертации, представляют самостоятельный методический и практический интерес. Полученный опыт может быть использован при создании вигглеров и других излучающих магнитных вставок для различных источников СИ.

Все перечисленные положения свидетельствуют о практической значимости результатов диссертации.

НОВИЗНА ПРЕДЛОЖЕНИЙ

Впервые разработан, создан и установлен на накопитель электронов источник СИ гибридный вигглер, в котором магнитное поле 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.

Многие конструкторско-технологические решения, изложенные в диссертации, обладают элементами научно-технической новизны. Она с необходимостью диктуеться:

1. самим предметом разработки — уникальной и сложной конструкцией гибридного вигглера, не имеющей прямых отечественных аналогов, и
2. отсутствием (или малым объемом) критической научно-технической информации, доступной в открытых источниках, по подобным зарубежным устройствам.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы насчитывает 125 стр., включая список литературы из 63 позиций. В работе приведено 78 иллюстраций и 22 таблицы.

Во введении содержится краткий обзор современного состояния дел и тенденций в области создания современных источников СИ третьего и четвёртого поколений. Таким образом, представлен контекст, в котором решались задачи диссертации. Сформулирована цель работы, обоснована актуальность и практическая значимость проблемы создания многополосного гибридного вигглера для генерации жёсткого интенсивного СИ на накопителе ВЭПП-4М.

Первая глава представляет подробное описание ускорительного комплекса ВЭПП-4М в целом, включая его магнитооптическую систему и систему диагностики пучка.

Во второй главе приводятся описание конструкции и результаты расчётов магнитного поля гибридного вигглера. Проведены двухмерный и трехмерный расчёты и оптимизация магнитного поля устройства.

Третья глава посвящена описанию системы магнитных измерений. Сюда включены описание электроники, рассмотрены системы каретки с датчиками Холла, датчика ЯМР, механического перемещения и позиционирования каретки. Рассмотрена процедура магнитных измерений, приведены их результаты. Обоснована и проведена оптимизация токов коррекции.

В четвертой главе проводится оценка влияния гибридного вигглера на пучок ВЭПП-4М. Предложена расчётная модель поля гибридного вигглера, представлена модель вигглера для расчётов линейной оптики, проведен анализ возмущений оптических функций, проанализировано влияние гибридного вигглера на радиационные параметры накопителя ВЭПП-4М.

Пятая глава посвящена экспериментальному изучению канонических вопросов

влияния гибридного вигглера на пучок электронов в ВЭПП-4М. Рассмотрено искажение замкнутой орбиты, вызываемое полем гибридного вигглера. Проведена оценка сдвига бетатронных частот и приведены результаты измерений зависимости частоты бетатронных колебаний от их амплитуды. Определено влияние гибридного вигглера на разброс по энергиям в пучке. Рассмотрено влияние гибридного вигглера на попеченный (горизонтальный) эмиттанс пучка в ВЭПП-4М.

В **шестой главе** обсуждаются новые экспериментальные возможности, предоставляемые гибридным вигглером. Приводится расчёт параметров излучения СИ; приводится физическое обоснование применения излучения вигглера для экспериментов на ВЭПП-4М. В этой главе рассмотрено повышение эффективности радиационных методов терапии рака; представлен рентген-флуоресцентный элементный анализ; проанализировано взаимодействие плазмы со стенками термоядерного реактора.

В **заключении** кратко перечислены основные результаты, полученные в диссертации и выносимые на защиту.

В приложениях приводится сводка формул для расчёта вигглера и аналитические оценки для радиационных интегралов.

Внутри глав поддерживается единый и достаточно лаконичный (но не в ущерб ясности и полноте информации) стиль изложения принятых конструкторско-технологических, габаритно-компоновочных, материаловедческих и производственных решений.

ЗАМЕЧАНИЯ И НЕДОСТАТКИ

1. Автору следовало бы придерживаться единой терминологии по тексту работы. Так в названии работы и почти всюду по тексту предмет разработки (устройство) имеется "вигглер". Однако на стр. 5, 7, 13, 18, 39, 119, 121 и 123 он же называется "змейка". Это вызывает определенные затруднения при первом чтении.

2. Разработка проводилась в интересах и использованием электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4М. Однако на стр. 5, 11, 12, 24 и 108 используется укороченное название установки ВЭПП-4. Читателю извне ИЯФ СО РАН приходится разбираться, не идет ли речь о другом ускорителе.

3. В правой части формулы (2.6) на стр. 37 пропущен размерный множитель e [в СИ] либо e/c [СГС] (скажем, как в формуле (A.12) на стр. 118). В формуле (2.5) на стр. 22 отсутствуют скобки [...] вокруг единицы измерения длины L [м].

4. Гармоническая зависимость магнитного поля вигглера от продольной координаты называется косинусной (стр. 62, 68), косинусоподобной (стр. 124), синусной (стр. 59, 62, 69), синусоподобной (стр. 64), хотя всюду речь идет об изменении $\propto \cos(k_w s)$. Желательно было бы избегать такого разнообразия терминов-синонимов в одной научной работе.

5. Иногда в работе встречаются неаккуратные формулировки. Так, на стр. 29 направление нормали к орбите названо "направлением радиуса кривизны" орбиты. В пояснениях к формуле (2.7) на стр. 37 расстояние s вдоль равновесной орбиты названо "траекторией пучка".

6. В списке литературы встречается неполное библиографическое описание в ссылках [4], [7], [30], [43] и [44].

Следует подчеркнуть, что перечисленные выше **замечания и недостатки не-принципиальны**. Они не относятся к оформлению, а не к сути работы и не умаляют положительные стороны диссертации.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тема выполненной диссертации актуальна и имеет четкую практическую направленность. В результате проведённой работы был разработан, изготовлен и поставлен, и введен в эксплуатацию 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 вблизи 100 кэВ приблизительно в 30–40 раз.

В работе обобщены результаты деятельности автора по созданию и внедрению указанного гибридного вигглера.

Новый гибридный вигглер позволил значительно увеличить эффективность и расширить экспериментальные возможности программы исследований с применением СИ в области жёсткого рентгена вплоть до энергии гамма-квантов 100 кэВ и выше на ВЭПП-4М. Цель, обозначенная во введении работы, была достигнута. Поэтому результаты диссертации достоверны. Они получили экспериментальное подтверждение при стендовых измерениях, на пучках электронов и СИ и уже используются на практике в действующей ускорительной установке.

Подход автора к решаемой задаче прагматичен и последователен. Расчётные, технические решения, инженерно-конструкторские подходы и рекомендации хорошо обоснованы.

Диссертация является добрым, последовательным и законченным научно-техническим трудом по физика пучков заряженных частиц и ускорительной техники. В диссертации решена задача разработки конструкторско-технологической документации, сопровождения производства, сборки и пуско-наладки уникального нестандартного электрофизического оборудования. Разработана аппаратура и методики проведения магнитных измерений и экспериментов на пучке.

Диссертация представляет несомненный практический интерес. Нет сомнения, что ее результаты будут в полной мере использованы в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) при реализации проекта СКИФ. Опыт разработки и внедрения оригинальных конструкторско-технологических, габаритно-компоновочных и производственных решений может быть рекомендован к использованию в НИЦ "Курчатовский институт" (г. Москва) в работах над проектами КИСИ–Курчатов и СИЛА, как и в других ускорительных центрах, эксплуатирующих источники СИ и ускорители заряженных частиц.

Основные результаты работы опубликованы ее автором в 7 печатных работах, из них 5 — статьи в рецензируемых журналах, 2 — статьи в сборниках трудов.

Работа прошла достаточную апробацию на научно-технических конференциях (3 доклада) по тематике ускорителей заряженных частиц и их применения.

Содержание диссертации полностью и точно отражено в её авторефере.

Материал диссертации интересен и убедителен с точки зрения положительной аттестации автора. Он полностью владеет предметом — методикой и техникой расчёта и конструкторско-технологического обеспечения разработки и создания современного электрофизического оборудования для актуального класса ускорителей заряженных частиц, служащих источником СИ.

Текст диссертации логично структурирован, тщательно оформлен и изложен лаконичным научным языком.

В целом, работа удовлетворяет требованиям ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации — Баранов Григорий Николаевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Диссертация была рассмотрена и одобрена на научно-техническом семинаре Инженерно-физического отдела НИЦ "Курчатовский институт" – ИФВЭ 11.03.2022.

Составители отзыва:

Доктор физико-математических наук,
начальник Инженерно-физического отдела

С.С. Козуб

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник

Л.М. Ткаченко

14 марта 2022 г.