

На правах рукописи



Мальцева Юлия Игоревна

**ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ПОТЕРЬ ПУЧКА  
НА ОСНОВЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5**

1.3.18 —

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2021

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

**БЕРКАЕВ** – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.  
Дмитрий Евгеньевич

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

**ЛУБСАНДОРЖИЕВ** – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник.  
Баярто  
Константинович

**РЫКАЛИН** – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино, главный научный сотрудник.  
Владимир Иванович

**ВЕДУЩАЯ** – Международная межправительственная организация «Объединённый институт ядерных исследований», г. Дубна.  
ОРГАНИЗАЦИЯ

Защита состоится 19 октября 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 при Федеральном государственном бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН и на сайте [https://www.inp.nsk.su/images/Maltseva\\_disser.pdf](https://www.inp.nsk.su/images/Maltseva_disser.pdf).

Автореферат разослан 11 августа 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



П.А. Багрянский

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Начиная с 2015 г. Инжекционный комплекс (ИК) ВЭПП-5 [1–3] введен в эксплуатацию и обеспечивает высокоэнергетическими пучками электронов и позитронов два действующих коллайдера ИЯФ СО РАН. Коллайдеры ВЭПП-2000 [4] и ВЭПП-4М [5] представляют собою уникальные установки для проведения экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками высоких энергий.

Получая и накапливая пучки с энергией до 500 МэВ и интенсивностью до  $10^{11}$  частиц, ИК ВЭПП-5 доставляет пучки по транспортным каналам К-500 [6] до потребителей. Типичная величина потерь интенсивности пучка в процессе его транспортировки до потребителей может достигать 50 %, поэтому продолжается активная работа по улучшению производительности и стабильности ИК ВЭПП-5. Таким образом, от надежности функционирования комплекса напрямую зависит эффективность работы коллайдеров ИЯФ СО РАН.

Диагностика потерь пучка важна на всех этапах работы ускорителя заряженных частиц, начиная от его запуска и наладки и заканчивая оптимизацией потерь в режиме реального времени в процессе штатной работы установки. Для регистрации потерь используют датчики потерь пучка, которые размещают с внешней стороны вакуумной камеры в тех местах, где потери наиболее вероятны.

При пролете пучка заряженных частиц по ускорителю амплитуда колебаний некоторых частиц может стать столь значительной, что приведет к их потере на стенке вакуумной камеры. В случае пучков релятивистских электронов либо позитронов, попадая на металлическую стенку вакуумной камеры, они генерируют электромагнитный ливень. Датчик регистрирует частицы ливня и тем самым определяет место потери пучка и количество потерянных частиц.

Во время запуска и наладки ускорителя система диагностики потерь позволяет минимизировать потери пучка либо полностью от них избавиться. В штатном режиме работы ускорителя, помимо оптимизации типичных потерь пучка, она позволяет регистрировать потери по причине аварийного выхода из строя какой-либо системы ускорителя (магнитной, вакуумной, высокочастотной и т. д.). В таком случае, система диагностики потерь работает как дозиметрическая система для контроля уровня радиации в режиме онлайн и может производить сброс пучка по аварийному сигналу в случае величин потерь, потенциально опасных для элементов ускорителя и рабочего персонала.

В отсутствие выделенной системы диагностики потерь пучка, проводка пучка по ускорителю на ИК ВЭПП-5 осуществлялась по иным системам диагностики пучка (люминофорным экранам, датчикам положения пучка, датчику тока, цилиндру Фарадея и пр.). При этом на первичную проводку

пучка при помощи диагностических устройств, как правило, уходило много пучкового времени. Часть устройств, такие как люминофорные экраны, цилиндр Фарадея, разрушают пучок и при этом требуется существенное время на приведение их в рабочее положение. Настройка комплекса также усложнена тем, что система диагностики пучка состоит из локальных датчиков, которые имеются в небольшом количестве, таким образом, между двумя датчиками располагается большое количество магнитных элементов, которые могут требовать настройки. Датчики положения пучка при первичной настройке ускорителя, для которой характерна большая величина потерь, являются ненадежным инструментом, т. к. под воздействием большой дозы радиации могут выдавать ложную информацию.

Поэтому для минимизации потерь в процессе наладки и штатной работы ИК ВЭПП-5 возникла необходимость разработать и внедрить систему диагностики потерь пучка. В качестве такой системы было предложено использовать распределенные датчики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне. Такая система позволила ускорить настройку комплекса и повысить эффективность его работы на потребителей.

Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами ливня. Черенковское излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется при помощи фотодетектора. Время прихода светового импульса на фотодетектор дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц.

Последние два десятилетия метод диагностики потерь пучка заряженных частиц на основе черенковского излучения в оптоволокне широко используется на крупных электронных ускорителях по всему миру. Толчком для развития данной методики послужило развитие оптоволоконной техники и начало массового производства оптоволокон.

Впервые использование оптоволоконна в качестве датчика потерь пучка с быстрым откликом было осуществлено на установке KEK-PS в 2000 г. [7; 8]. После чего, начиная с 2002 г., многие ускорительные центры начали внедрять данную методику в качестве штатной системы диагностики потерь пучка: DESY на DELTA, FLASH [9; 10], CERN – CLIC Test Facility 3 [11], RIKEN – Spring-8 X-FEL [12], SLAC – LCLS-II [13], FERMI – ELETTRA [14], ANSTO – ASP [15], Институт Кокрофта – ALICE [16] и другие. Однако для каждого конкретного ускорителя система диагностики потерь пучка разрабатывается с учетом требований к точности обнаружения потерь и зависит от параметров ускорителя.

**Целью** данной работы является разработка оптоволоконного датчика потерь пучка и ввод его в эксплуатацию на однопролетных и кольцевых участках ИК ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН. При этом разработка системы диагностики потерь пучка предполагает исчерпывающее исследование

основных процессов, лежащих в основе принципа работы датчика, для дальнейшего использования аналогичных датчиков потерь пучка на других электронных установках. По результатам диссертационной работы планируется использовать аналогичную систему диагностики потерь пучка в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ», г. Новосибирск.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Исследовать физические процессы, лежащие в основе принципа работы оптоволоконного датчика потерь пучка, чтобы определить особенности распространения черенковского излучения в оптоволоконке.
2. Провести моделирование взаимодействия пучка заряженных частиц со стенкой вакуумной камеры ускорителя и процесса генерации и распространения оптических фотонов в оптоволоконке с точки зрения эффективности регистрации черенковского излучения при различных параметрах ускорителя.
3. Исследовать работу различных типов оптоволоконка с точки зрения наименьшей дисперсии излучения, оптимального числа собираемых фотонов и допустимого срока эксплуатации в условиях радиации, чтобы выбрать наиболее подходящий тип и длину отрезка оптоволоконка для достижения требуемого пространственного разрешения датчика потерь пучка.
4. Исследовать работу различных типов фотодетекторов и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с точки зрения их оптимальных временных характеристик, чтобы выбрать наиболее подходящие типы для регистрации световых сигналов, приходящих с оптоволоконка, и для достижения требуемого пространственного разрешения датчика потерь пучка.
5. Создать программное обеспечение для обработки сигналов с оптоволоконного датчика потерь пучка, которое позволяет оператору ускорительного комплекса в режиме реального времени отслеживать распределение потерь пучка вдоль выбранного участка ускорителя.
6. Ввести систему диагностики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволоконке в эксплуатацию с учетом предъявляемых требований к точности локализации потерь, а также с учетом параметров и особенностей ускорителя.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые выполнено детальное исследование характеристик потерь пучка электронов в ускорителях заряженных частиц на энергию до 500 МэВ и способов их регистрации при помощи оптоволоконного

датчика потерь на основе черенковского излучения. Были произведены измерения дисперсии и интенсивности сигналов датчика потерь для разных типов оптоволокон. Экспериментально показаны возможные способы улучшения пространственного разрешения датчика.

2. Впервые на основе численного моделирования выполнена калибровка оптоволоконного датчика потерь. Абсолютная величина количества теряемых частиц учитывает эффект затухания света в оптоволокне, и нормирована на коэффициент усиления фотодетектора и первоначальный ток пучка до его потерь.
3. Предложен способ, позволяющий с помощью комбинации из четырех датчиков, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, определить место потери пучка в поперечной плоскости относительно направления движения пучка.
4. Впервые выполнено исследование временных и амплитудных характеристик датчика потерь пучка на основе пластикового оптоволокна. Благодаря выбору оптимальных элементов датчика пространственное разрешение составило менее 1 м, а его пороговая чувствительность  $\sim 1$  пКл. Из эксперимента посчитана радиационная стойкость пластикового оптоволокна в условиях эксплуатации на электронных ускорителях.
5. Разработанная система диагностики потерь пучка была введена в эксплуатацию на ИК ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН. Данная система впервые сделала возможным в режиме реального времени контролировать распределение потерь пучка вдоль выбранного участка ускорителя и эффективнее настраивать прохождение пучков до потребителей.

#### **Научная и практическая значимость:**

Введение в эксплуатацию системы диагностики потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне позволило реализовать контроль распределения потерь пучка в режиме реального времени в процессе наладки и штатной работы ИК ВЭПП-5. Начиная с 2019 года данная система диагностики потерь стабильно работает в числе штатной диагностики пучка на ИК ВЭПП-5.

Наработанные методы моделирования потерь пучка в ускорителях заряженных частиц и способов их регистрации при помощи оптоволоконного датчика потерь на основе черенковского излучения позволяют производить подбор компонентов датчика с оптимальными временными и амплитудными характеристиками.

Полученные в рамках диссертационной работы результаты исследования имеют большое значение для создания аналогичных систем диагностики потерь пучка на современных ускорительных комплексах, коллайдерах и источниках синхротронного излучения.

Оптоволоконная система диагностики потерь пучка будет использована в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» и на линейных участках действующего коллайдера ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Проведено моделирование и расчеты параметров оптоволоконного датчика потерь пучка, в результате которых были сделаны выводы об условиях применимости датчика, о его пространственном разрешении и калибровке сигнала для электронных ускорителей.
2. Экспериментально продемонстрированы особенности работы различных типов оптоволоконна, фотодетекторов и АЦП. В результате исследования был выбран наиболее подходящий тип и длина отрезка оптоволоконна, а также тип фотодетектора и АЦП с оптимальными временными характеристиками для достижения требуемого пространственного разрешения датчика для ИК ВЭПП-5.
3. Создано и успешно испытано в экспериментах необходимое для работы оптоволоконного датчика потерь пучка программное обеспечение. Оно интегрировано в общую систему автоматизации ИК ВЭПП-5, реализует все необходимые режимы работы прибора и обрабатывает сигнал, предоставляя информацию о местах потери пучка и о количестве потерянных частиц.
4. Впервые успешно испытан и введен в эксплуатацию оптоволоконный датчик потерь пучка с оптимизированными параметрам в составе каналов выпуска электронов и позитронов, а также циклического накопителя на ИК ВЭПП-5.

**Апробация работы.** Основные результаты работы по теме диссертации были представлены на XXIV Всероссийской Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (RUPAC-2014, Обнинск, Россия), на научной сессии Отделения физических наук РАН «К 110-летию со дня рождения П.А. Черенкова» (Москва, Россия, 2014), на 6-й Международной Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (IPAC-2015, Ричмонд, США), на XXVI Всероссийской Конференции по Ускорителям Заряженных Частиц (RUPAC-2018, Протвино, Россия), на XIII Международном научном семинаре памяти профессора В.П. Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» (Алушта, Россия, 2019), на 8-й Международной Конференции по Диагностика Пучков Заряженных Частиц (IBIC-2019, Мальмё, Швеция).

**Личный вклад.** Все основные результаты по теме исследования получены автором лично. Автор принимал активное участие в постановке задачи, участвовал в проведении экспериментов, проводил обработку и анализ экспериментальных данных, проводил расчеты и численное моделирование, написал программное обеспечение, а также участвовал в

подготовке публикаций. Вклад автора явился определяющим для реализации оптоволоконного датчика потерь пучка на ИК ВЭПП-5.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 статей, среди них 4 статьи в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в трудах международных конференций, 2 статьи в трудах всероссийских конференций.

**В изданиях, входящих в перечень ВАК:**

1. *Мальцева Ю.И. и др.* Распределенный датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне // *Усп. физ. наук.* — 2015. — Т. 185, No 5. — С. 553–556.
2. *Мальцева Ю.И., Астрелина К.В.* Сравнение численной модели оптоволоконного датчика потерь пучка с экспериментальными данными // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, No 4. — С. 633–637.
3. *Мальцева Ю.И., Андрианов А.В.* Методы улучшения пространственного разрешения распределенного датчика потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, No 4. — С. 638–644.
4. *Мальцева Ю.И., Астрелина К.В.* Оптимизация параметров оптоволоконного датчика потерь пучка для Инжекционного комплекса ВЭПП-5 // *Письма в ЭЧАЯ.* — 2020. — Т. 17, No 4. — С. 645–648.

**В сборниках трудов конференций:**

1. *Maltseva Yu.I. et al.* Distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in optical fiber // *6th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2015 - Proceedings.* — 2015. — Pp. 1004–1006.
2. *Maltseva Yu.I., Prisekin V.G., Frolov A.R.* Beam loss measurements using the Cherenkov effect in optical fiber for the BINP e-e+ Injection Complex // *8th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2019 - Proceedings.* — 2019. — Pp. 233–237.
3. *Maltseva Yu.I. et al.* Distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in optical fiber // *XXIV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2014.* — 2014. — Pp. 374–376.
4. *Maltseva Yu.I., Prisekin V.G.* Optical fiber based beam loss monitor for the BINP e-e+ Injection Complex // *XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2018.* — 2018. — Pp. 486–488.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 122 страницы и включает: 54 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 90 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель,



ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена выбору системы диагностики потерь пучка для ИК ВЭПП-5. Приводится обзор наиболее подходящих типов датчиков потерь пучка. Перечисляются требования, предъявляемые к датчику потерь пучка на ИК ВЭПП-5.

Описывается принцип работы выбранного оптоволоконного датчика потерь пучка. Датчик размещается с внешней стороны вакуумной камеры ускорителя и регистрирует черенковское излучение, генерируемое в оптическом волокне вторичными заряженными частицами, которые образуются при взаимодействии теряемого пучка с веществом стенки вакуумной камеры и окружающих элементов ускорителя. Черенковское излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется при помощи фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Сигнал с ФЭУ оцифровывается при помощи АЦП. Время прихода светового импульса дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц. Световой импульс можно регистрировать с обоих торцов оптоволокну. Схема датчика представлена на рисунке 1. Приводится исторический обзор использования оптоволокну в качестве датчика потерь пучка.

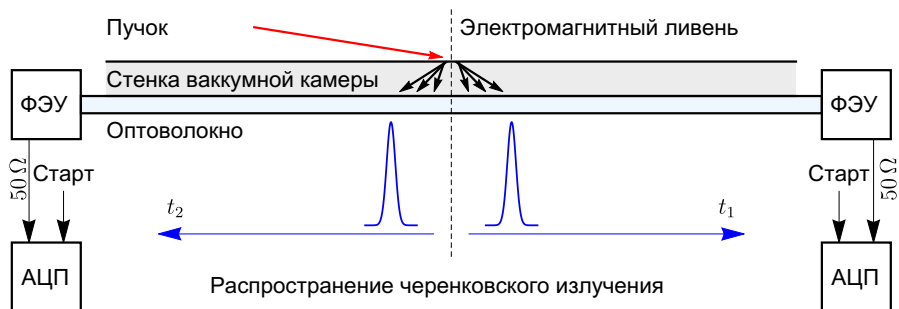


Рис. 1 — Схема оптоволоконного датчика потерь пучка. Запуск АЦП осуществляется внешним синхроимпульсом, привязанным к моменту инжекции/выпуска пучка

Во **второй главе** приводится анализ физических процессов, лежащих в основе работы датчика и влияющих на его способность определять место потери пучка в ускорителе и количество потерянных частиц. К таким процессам относятся взаимодействие теряемых электронов пучка с веществом стенки вакуумной камеры, генерируемое в оптоволокну черенковское излучение и механизм передачи излучения по оптоволокну.

Подробно описывается устройство оптоволокну, рассматриваются существующие типы оптоволокон и физические процессы, влияющие на

качество передачи светового импульса. Для исследования влияния параметров оптоволокну на распространение излучения и на световыход, используется лучевая теория распространения света. Особое внимание уделено передаче черенковского излучения по оптоволокну с учетом особенностей его генерации и спектра излучения. Механизм распространения излучения рассматривается на примере многомодового оптоволокну со ступенчатым профилем показателя преломления.

**Третья глава** посвящена результатам численного моделирования процесса регистрации потерь пучка при помощи датчика потерь для структуры ИК ВЭПП-5. Результаты моделирования различных сценариев потерь пучка с параметрами, максимально близко подобранными к параметрам ИК ВЭПП-5, позволяют определить, какими характеристиками должен обладать датчик, в каком месте его следует разместить и каким способом регистрировать сигнал.

Поскольку практически невозможно измерить точную эффективность любого датчика потерь пучка за счет неопределенности места потери и наличия углового разброса электромагнитного ливня, численное моделирование необходимо для абсолютной калибровки сигнала с точки зрения отношения величины сигнала к количеству потерянных частиц. Численное моделирование выполнено при помощи программы FLUKA на основе метода Монте-Карло.

Приведены угловое, энергетическое и поперечное распределения электронной компоненты электромагнитного ливня при падении пучка на стенку вакуумной камеры. Также показано распространение черенковского излучения по оптоволокну в зависимости от угла падения пучка на стенку вакуумной камеры и диаметра оптоволокну. Показаны временная структура светового импульса и влияние дисперсии в оптоволокну на длительности светового импульса на выходе из оптоволокну.

В результате моделирования физических процессов, положенных в основу принципа работы оптоволоконного датчика потерь пучка, были определены условия применимости датчика, процессы, существенным образом влияющие на его пространственное разрешение, и были рассчитаны коэффициенты для калибровки сигнала датчика.

**Четвертая глава** посвящена выбору оптимальных элементов датчика и способов регистрации потерь. Приводятся результаты экспериментального исследования разных типов оптоволокон, ФЭУ и АЦП с точки зрения оптимального пространственного разрешения датчика, его калибровки, простоты и надежности использования.

Были протестированы четыре типа оптоволокну, различающихся по материалу сердцевины, профилю показателя преломления и количеству передаваемых мод излучения. Для каждого из них было измерено значение дисперсии. Измеренная дисперсия света наряду с расчетной величиной дисперсии для каждого типа оптоволокну приведена в таблице 1.

Таблица 1 — Основные параметры исследуемых оптоволокон и полученные значения дисперсии

Название	Broadcom, HFBR-RUS	Thorlabs, FG550UEC	Fiberware, G 400/560A	Fiberware, SM 400/125PI
Тип	Многомодовое	Многомодовое	Многомодовое	Одномодовое
Профиль	Ступенчатый	Ступенчатый	Градиентный	Ступенчатый
Материал	Пластик	Кварц	Кварц	Кварц
Расчетная дисперсия, нс/м	0.27	0.15	0.1	$\leq 0.1$
Измеренная дисперсия, нс/м	$0.24 \pm 0.02$	$0.17 \pm 0.01$	$0.16 \pm 0.02$	$0.17 \pm 0.03$

Установлено, оптимальным типом оптоволокна с точки зрения пространственного разрешения, затухания, радиационной стойкости и механической прочности является кварцевое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром сердцевины 550 мкм. С точки зрения стоимости самый лучший вариант – пластиковое оптоволокно. В зависимости от бюджета оба эти варианта являются оптимальными. Для пластикового оптоволокна оптимальная длина составляет примерно 30 м, для многомодового кварцевого – 40 м.

На примере пластикового оптоволокна было изучено влияние ионизирующего излучения на качество передачи светового импульса. Был определен срок его эксплуатации при типичной мощности дозы на ИК ВЭПП-5, порядка 100 Гр/год, который составил около пяти лет, при этом уровень оптического сигнала падает не более, чем на треть.

Показано, что регистрируя световой сигнала с торца оптоволокна, расположенного в направлении, противоположном направлению движения пучка, пространственное разрешение датчика лучше в 3–5 раз по сравнению с противоположным торцом. Полученные в эксперименте распределения потерь электронного пучка при регистрации с двух торцов кварцевого многомодового оптоволокна представлены на рисунке 2.

Приводится экспериментальное сравнение разных типов фотодетекторов, наиболее оптимальных для датчика потерь. Показано, что одним из наиболее подходящих типов является ФЭУ на микроканальных пластинах, который обладает минимальными временными характеристиками. Его временной вклад в результирующую длительность импульса с датчика потерь составляет 3.5 нс.

Также было проведено сравнение оцифровки сигнала при помощи АЦП с разными временными характеристиками. И показано, что для оцифровки сигнала потерь пучка достаточно использовать АЦП с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации 500 Мвыб/с.

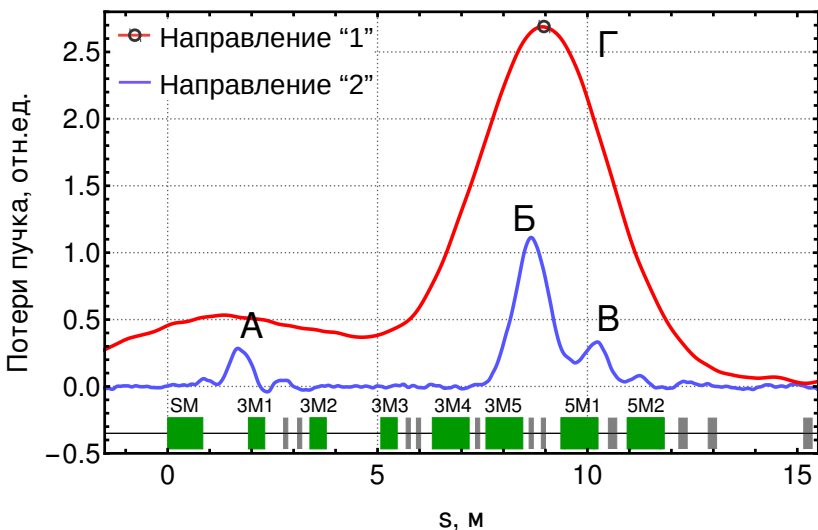


Рис. 2 — Потери пучка электронов, полученные с двух торцов кварцевого многомодового оптоволокна: красным — с торца, расположенного в направлении «1» (в направлении движения пучка), синим — в направлении «2» (в противоположном направлении)

Показано, что комбинация из четырех датчиков, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, позволяет определять места потерь пучка в поперечной плоскости относительно его направления движения. На рисунке 3а приведены сигналы потерь, полученные при помощи такой комбинации. Используя операции суммирования/вычитания четырех сигналов, можно определить азимутальное место потерь. Как изображено на рисунке 3б, местоположение потери определено в правом нижнем квадранте. Локализация мест потерь с точностью до квадранта является достаточной при первичной проводке пучка.

Кроме того, в рамках задачи оптимального способа регистрации потерь пучка рассмотрена эффективность ввода излучения из оптоволокна в ФЭУ при помощи оптического коллиматора.

Проведенная в данной главе экспериментальная оценка порога чувствительности датчика показала, что он способен регистрировать потери пучка  $\sim 1$  пКл. Такая пороговая чувствительность с запасом удовлетворяет требованию к использованию датчика на ИК ВЭПП-5 и в дальнейшем позволит использовать аналогичный датчик для строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» и регистрировать потери на уровне 3 % от заряда сгустка в односгустковом режиме работы комплекса.

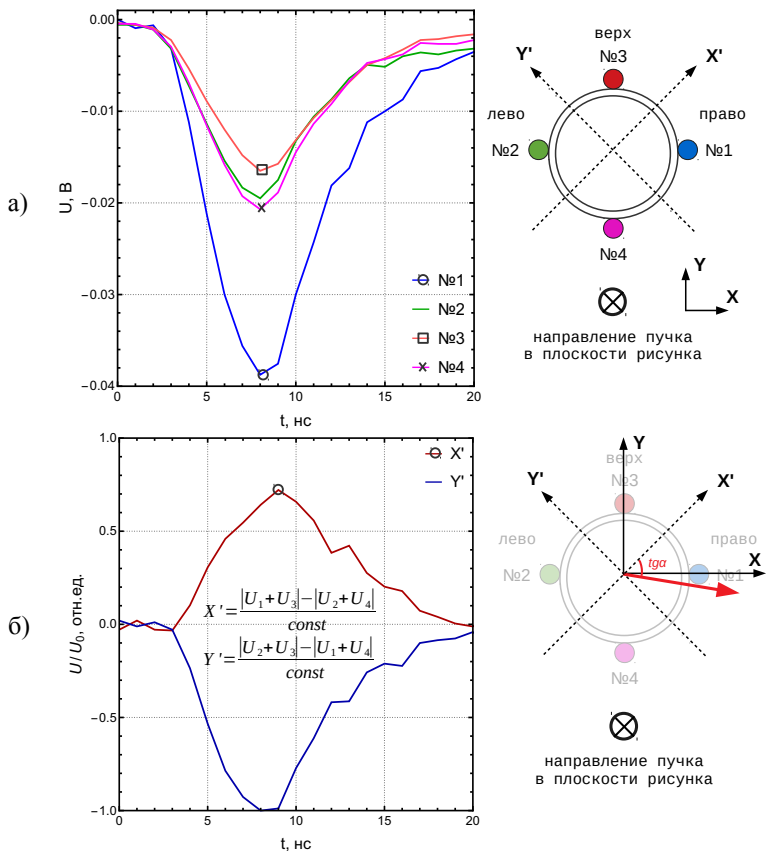


Рис. 3 — а) Сигналы с четырех датчиков при потере пучка электронов путем его отклонения вправо и схема азимутального расположения оптоволокон на поверхности вакуумной камеры; б) Обгибающие сигналов с четырех датчиков и схематичное изображение места потери пучка

В **пятой главе** описываются особенности практического применения оптоволоконного датчика потерь на ускорителе ИК ВЭПП-5. Демонстрируется успешная работа оптимизированного датчика, рассчитанного на работу в составе каналов выпуска электронов и позитронов, а также циклического накопителя. Приводится описание программного обеспечения, которое интегрировано в общую систему автоматизации всего ускорительного комплекса и позволяет контролировать потери пучка в ускорителе в режиме реального времени.

Для контроля потерь пучка и их минимизации при его проводке до потребителей приоритетной задачей была установка системы датчиков потерь в каналах выпуска электронов и позитронов. Настройка проводки

пучка по этим каналам является нетривиальной, поскольку транспортировка пучков осуществляется сразу в вертикальной и горизонтальной плоскостях. На рисунке 4 показаны схема расположения датчиков потерь пучка в каналах транспортировки ИК ВЭПП-5 и все элементы системы диагностики.

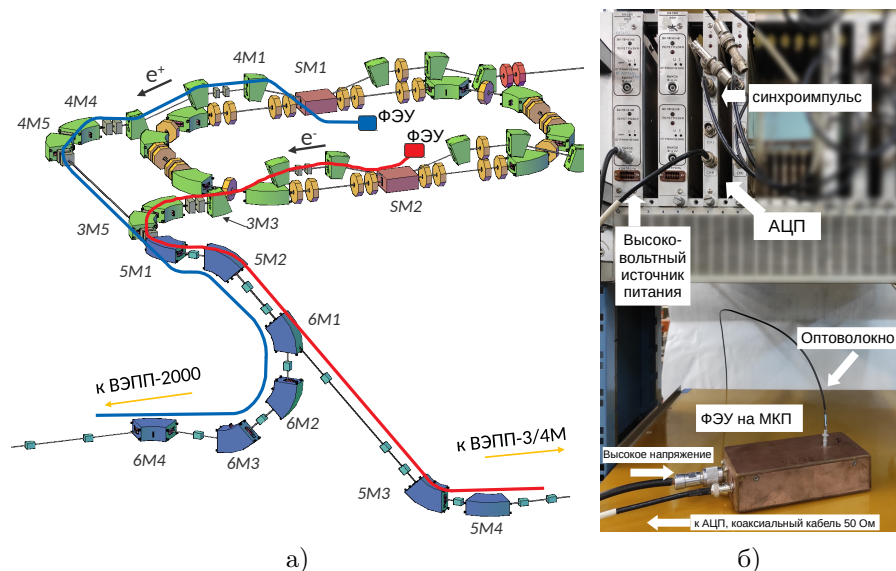


Рис. 4 — а) Схема расположения датчиков потерь пучка в каналах транспортировки ИК ВЭПП-5, б) Элементы системы диагностики потерь

Для обработки сигналов с датчиков написана клиентская программа, которая позволяет оператору в режиме реального времени контролировать потери пучка вдоль структуры, производя при этом подстройку транспортировки пучка до потребителей. Программа синхронизована с текущим режимом комплекса (сорт частиц/потребитель) и позволяет управлять напряжением питания, подаваемым на ФЭУ.

На рисунке 5 показано основное окно программы, в котором отображается информация о местах потерь пучка вдоль каналов выпуска и о количестве теряемых частиц, соответствующему каждому месту потерь.

Пространственное разрешение датчика составило, как и требовалось, менее 1 м. Расчетное значение теряемых частиц, вычисленное при помощи численного моделирования процессов генерации сигнала и калибровки ФЭУ, по порядку величины получилось верным. Поскольку для каждого события расчетные значения количества теряемых частиц учитывают эффект затухания света в оптоволокне, зависимость коэффициента усиления

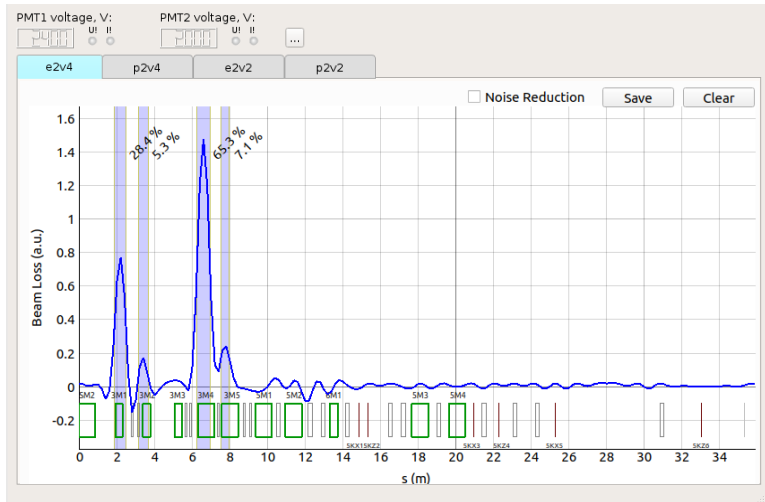


Рис. 5 — Основное окно программы системы диагностики потерь пучка в каналах выпуска ИК ВЭПП-5

ФЭУ от напряжения питания и нормированы на накопленный ток пучка, они сопоставимы между собой.

Было также произведено сравнение количества теряемых частиц, полученных при помощи датчика потерь, со значениями, полученными на основе информации с датчиков положения пучка (пикапов). Получено, что точность расчетных значений потерь пучка при помощи датчика потерь по порядку величины схожа с точностью имеющихся на данный момент пикапов. При этом датчик потерь за счет своей распределенной конструкции дает подробную информацию о местоположении потерь.

Приводятся результаты использования датчика потерь в накопителе-охладителе ИК ВЭПП-5. Показано, что датчик способен регистрировать потери пучка на нескольких оборотах после инжекции и может быть использован как инструмент для его запуска и наладки.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Был разработан оптоволоконный датчик потерь пучка и введен в эксплуатацию на однопролетных и кольцевых участках ИК ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН.
2. В результате численного моделирования и расчетов физических процессов, положенных в основу принципа работы оптоволоконного датчика потерь пучка, были определены условия применимости датчика, процессы, существенным образом влияющие на его пространственное разрешение, и были рассчитаны коэффициенты для

- калибровки сигнала с датчика. Расчетная абсолютная величина потерь пучка получилась верной по порядку величины.
3. Были экспериментально изучены свойства различных типов оптоволокон. Установлено, оптимальным типом оптоволокна с точки зрения пространственного разрешения, затухания, радиационной стойкости и механической прочности является кварцевое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметром сердцевины 550 мкм. Оптимальная длина отрезка оптоволокна составляет примерно 40 м.
  4. Экспериментально показано, что среди фотодетекторов одним из наиболее подходящих типов является ФЭУ на микроканальных пластинах, который обладает минимальными временными характеристиками. Временной вклад в результирующую длительность импульса с датчика потерь составляет 3,5 нс. Для оцифровки сигнала достаточно использовать АЦП с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации 500 Мвыб/с.
  5. Было установлено, что регистрируя световой сигнала с торца оптоволокна, расположенного в направлении, противоположном направлению движения пучка, пространственное разрешение датчика потерь пучка лучше в 3–5 раз по сравнению с противоположным торцом. Оптимизация параметров элементов датчика и способа регистрации сигнала позволила получить пространственное разрешения датчика не хуже 1 м.
  6. Было продемонстрировано, что комбинация из четырех датчиков, равноудаленных друг от друга по периметру вакуумной камеры, позволяет не только повысить чувствительность системы диагностики потерь, но и определить место потери пучка в поперечной плоскости относительно его направления движения с точностью не хуже квадранта.
  7. Проведенная в данной главе экспериментальная оценка порога чувствительности датчика на основе ФЭУ на микроканальных пластинах показала, что он способен регистрировать потери пучка  $\sim 1$  пКл. Такая пороговая чувствительность с запасом удовлетворяет требованию к использованию датчика на ИК ВЭПП-5.
  8. В рамках представленного проекта было создано программное обеспечение для обработки сигналов с датчика в каналах выпуска электронов и позитронов ИК ВЭПП-5, которое интегрировано в общую систему автоматизации всего ускорительного комплекса. Данное программное обеспечение позволяет оператору ускорительного комплекса в режиме реального времени отслеживать распределение потерь пучка вдоль выбранного участка ускорителя и с хорошей эффективностью настраивать прохождение пучков по каналам К-500 до потребителей.



9. Представленные в данной работе результаты исследования подходят для дальнейшего применения аналогичных датчиков потерь пучка на других электрон-позитронных установках. По результатам диссертационной работы планируется использовать оптоволоконную систему диагностики потерь пучка, оптимизированную для работы в однопролетных участках строящегося источника синхротронного излучения нового поколения ЦКП «СКИФ» в г. Новосибирск и на линейных участках действующего коллайдера ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН.

## Литература

1. *Астрелина К. и др.* Инжекционный комплекс ВЭПП-5: статус и перспективы // *Письма в ЭЧАЯ*. — 2020. — Т. 17, № 4. — С. 367–373.
2. *Berkaev D. et al.* VEPP-5 Injection Complex: Two Colliders Operation Experience // *8th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2017 - Proceedings*. — 2017. — Pp. 2982–2984.
3. *Maltseva Yu.I. et al.* VEPP-5 Injection Complex performance improvement for two collider operation // *XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2018 - Proceedings*. — 2018. — Pp. 39–43.
4. *Shatunov P. et al.* High Luminosity at VEPP-2000 Collider with New Injector // *8th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2017 - Proceedings*. — 2017. — Pp. 2989–2991.
5. *Piminov P. et al.* Status of the Electron-Positron Collider VEPP-4 // *8th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2017 - Proceedings*. — 2017. — Pp. 2985–2988.
6. *Zemlyansky I.M. et al.* Commissioning of e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> Transfer Line from BINP Injection Complex to VEPP-2000 Facility // *XXV Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2016 - Proceedings*. — 2016. — Pp. 213–215.
7. *Kawakubo T. et al.* Fast-response beam loss monitor // *15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV 2000 - Proceedings*. — 2000. — Pp. 299–307.
8. *Kawakubo T., Sanami T., Ishida T.* High speed beam loss monitor and its deterioration by radiation // *9th European Particle Accelerator Conference, EPAC 2004 - Proceedings*. — 2000. — Pp. 2649–2651.
9. *Schmidt G. et al.* Optical Fibre Beam Loss Monitors for Storage Rings at DELTA // *8th European Particle Accelerator Conference, EPAC 2002 - Proceedings*. — 2002. — P. 1969–1971.

10. *Wulf F., Korfer M.* Local Beam Loss and Beam Profile Monitoring with Optical Fibers // *9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC 2009 - Proceedings.* — 2009. — P. 411–417.
11. *Nebot Del Busto E. et al.* Position Resolution of Optical Fibre-Based Beam Loss Monitors Using Long Electron Pulses // *4th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2015 - Proceedings.* — 2015. — P. 580–584.
12. *Marechal X.-M., Asano Y., T. Itoga.* Design, development, and operation of a fiber-based Cherenkov beam loss monitor at the SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2012. — Vol. 673. — P. 32–45.
13. *Fisher Alan S. et al.* Beam-Loss Detection for LCLS-II // *8th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2019 - Proceedings.* — 2019. — P. 229–232.
14. *Frohlich L. et al.* Instrumentation for machine protection at FERMI@Elettra // *10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, DIPAC 2011 - Proceedings.* — 2011. — P. 286–288.
15. *Giansiracusa Paul J. et al.* A distributed beam loss monitor for the Australian Synchrotron // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2019. — Vol. 919. — P. 98–104.
16. *Intermite A., Putignano M., Wolski A.* Cherenkov Fibre Optic Beam Loss Monitor at ALICE // *2nd International Particle Accelerator Conference, IPAC 2011 - Proceedings.* — 2011. — P. 1383–1385.

Мальцева Юлия Игоревна

ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ПОТЕРЬ ПУЧКА НА  
ОСНОВЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ  
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 01.07.2021 г.

Подписано в печать 02.07.2021 г.

Формат бумаги 60 × 90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 5

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

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