

На правах рукописи

Гаврилов Сергей Александрович

**Системы, приборы и методы диагностики пучков
для линейных ускорителей ионов**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

Официальные оппоненты:

Корчуганов Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований, заместитель руководителя Научного комплекса по перспективным ускорительным технологиям.

Мешков Олег Игоревич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, научно-исследовательский сектор 1-31, заведующий сектором.

Павлов Юрий Сергеевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук, лаборатория радиационных технологий, заведующий лабораторией.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

В настоящее время пучки ускоренных заряженных частиц находят всё более широкое применение, как в фундаментальных, так и в прикладных научных задачах, что приводит к сооружению новых и модернизации действующих многофункциональных исследовательских ускорительных комплексов. При этом во время настройки и эксплуатации ускорителей заряженных частиц решающую роль играют системы контроля и диагностики пучков, позволяющие обеспечить работу ускорителей с требуемыми параметрами.

Как показывает мировая практика, устройства и системы диагностики, разрабатываемые и устанавливаемые в крупных ускорительных комплексах, обычно разделены на две большие группы:

1. Отдельное узкоспециализированное оборудование для редких сложных измерений, используемое зачастую в единственном экземпляре на ускорителе, которое разрабатывается индивидуально под параметры конкретной машины, в том числе с привлечением исследовательских групп других ускорительных центров, специализирующихся в этой области.
2. Оборудование базовой системы диагностики основных параметров пучка, которое, как правило, поставляется в виде готовых устройств или систем вместе с необходимой электроникой, системами автоматизированного управления и специализированным программным обеспечением для проведения типовых измерений. Основными поставщиками данного оборудования за рубежом являются такие коммерческие компании, как Bergoz (Франция), Pantechnik (Франция), NTG (Германия), ITS (Южная Корея), Andesun (Китай), D-Pace (Канада) и другие фирмы, организованные действующими или бывшими сотрудниками тех или иных ускорительных центров для коммерциализации имеющихся у них разработок. А в случае необходимости, поставка дополнительной электроники осуществляется такими крупными технологическими компаниями, как National Instrument (США), Dimtel (США), CAEN (Италия), Instrumentation Technologies (Словения), Advantech (Тайвань) и пр.

В России, на данный момент, полностью отсутствуют коммерчески доступные устройства диагностики пучков ускоренных заряженных частиц, при этом количество проектов по разработке и сооружению ускорителей постоянно увеличивается, а немногие действующие группы специалистов по диагностике пучка заняты в процессах обновления систем существующих машин для реализации задач по их дальнейшему развитию. Сложившаяся ситуация означает, что сооружение новых отечественных ускорительных комплексов фактически подразумевает либо покупку подобного оборудования у зарубежных производителей, либо индивидуальную разработку для каждого отдельного проекта, что может требовать нескольких лет дополнительного времени, так как в приборах диагностики пучка, как правило, задействован широкий набор разнообразных и зачастую взаимосвязанных физических процессов, требующих детального анализа, особенно в случае интенсивных пучков современных ускорителей, когда эксплуатация отдельных устройств диагностики ведется в режиме работы, близком к критическому, при котором наступает либо существенное искажение регистрируемого сигнала, либо разрушение детектирующей части датчика.

Таким образом, исследования и разработки приборов и методов контроля и диагностики пучков ускоренных заряженных частиц для ускорительных комплексов с последующим созданием опытных образцов не только универсальных устройств, предназначенных для широкого круга пользователей, но и специализированных приборов, позволяющих, в частности, обеспечить эффективную настройку и эксплуатацию сооружаемых в данный момент ускорительных комплексов, являются актуальной задачей физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

Цель работы

Настоящая диссертация посвящена созданию приборно-методической базы систем диагностики пучков для сооружаемых и проектируемых линейных резонансных ускорителей ионов, для чего решаются три взаимосвязанных задачи:

1. Разработка обобщенных физико-технических принципов построения систем диагностики пучков в линейных ускорителях ионов для обоснования выбора состава систем и конфигурации отдельных диагностических приборов.

2. Разработка и изготовление универсальных конфигураций оборудования базовой диагностики пучков в линейных ускорителях ионов для аппаратного обеспечения сооружаемых и проектируемых установок.
3. Экспериментальные исследования параметров пучков на линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах. Разработка и реализация методик сбора и обработки диагностических данных.

Научная новизна

В ходе проведенных научно-исследовательских работ в рамках данной диссертации были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан и экспериментально верифицирован для проведения вычислительных физических экспериментов комплекс трехмерных мультифизических моделей оборудования диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
2. Разработана и реализована комплексная система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей, включая атомарные пучки, в широком диапазоне интенсивностей и энергий.
3. Разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка.
4. Для измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов, разработан и реализован метод повышения фазового разрешения измерений до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии, а также реализован метод расширения рабочего фазового диапазона измерений до полного периода следования анализируемых сгустков.

Практическая значимость работы

Достигнутые результаты работы использованы для модернизации системы диагностики пучков в ускорительном комплексе на основе сверхточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН, благодаря чему была обеспечена настройка пучков с параметрами необходимыми как для достижения целей научной программы ИЯИ РАН, так и для выполнения обязательств в рамках соглашений с другими организациями.

В том числе, в основе материалов диссертации лежат результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в ИЯИ РАН по договорам с РФЯЦ-ВНИИЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ», ОИЯИ, а также с зарубежными ускорительными центрами CERN (Швейцария), FAIR-GSI (Германия), ESS (Швеция), MYRRHA (Бельгия), FRIB MSU (США) на разработку, изготовление и поставку систем и отдельных устройств диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, действующих или сооружаемых в этих организациях.

Личный вклад автора

Все результаты диссертации получены автором лично, в частности:

- на основе детального анализа многочисленных взаимосвязанных физических процессов разработана физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов,
- разработана концепция системы диагностики и неразрушающей системы аварийного контроля потерь пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA,
- разработаны численные физические модели и конфигурации устройств базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, на основе которых обеспечено изготовление высокотехнологичного физического оборудования,
- разработаны численные физические модели и конфигурации устройств специализированной диагностики пучков для исследовательских стендов облучения, в том числе для пучков, выведенных на воздух,
- предложена и реализована методика разработки короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка,
- разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка,
- разработан и реализован метод повышения фазовой разрешающей способности, а также реализован метод расширения рабочего фазового диапазона измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов,

либо в соавторстве, в случае которого вклад автора как главного разработчика используемого диагностического оборудования и непосредственного руководителя проводимых работ был определяющим, а именно:

- на основе результатов вычислительных экспериментов, а также конструкторских и технологических решений автора изготовлены, собраны и настроены системы и отдельные приборы диагностики ионных пучков с высокими эксплуатационными характеристиками,
- проведены экспериментальные исследования параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах с использованием разработанного автором оборудования диагностики,
- на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН обеспечено проведение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов с заданными параметрами в широком диапазоне интенсивностей и энергий.

В 2021 г. за цикл работ «Разработка и создание нового класса устройств диагностики структуры сгустков пучка в линейных ускорителях ионов» автор вместе с А.В. Фещенко (ИЯИ РАН) и В.А. Гайдашом (ИЯИ РАН) был удостоен премии имени В.И. Векслера — научной награды, присуждаемой Российской академией наук за выдающиеся работы в области физики ускорителей.

Положения, выносимые на защиту

1. Физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов.
2. Концепция системы диагностики и результаты разработки и изготовления неразрушающей системы быстрого аварийного контроля потерь пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA.
3. Комплекс трехмерных мультифизических моделей оборудования диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
4. Результаты разработки, изготовления и настройки систем и приборов базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
5. Система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей.
6. Система диагностики пучков протонов, выведенных на воздух, для исследовательских стендов.

7. Методика разработки короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка.
8. Метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе электростатических ёмкостных датчиков положения пучка.
9. Метод повышения фазового разрешения и экспериментальная реализация метода расширения рабочего фазового диапазона измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов.
10. Результаты экспериментальных исследований, настройки и оптимизации параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах.

Степень достоверности

Все представленные в работе результаты получены или подтверждены в ходе экспериментальных исследований на действующих отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов с последующим публичным обсуждением в профессиональном международном диагностическом сообществе и использованы как для практической разработки нового оборудования диагностики пучка, так и для настройки параметров пучков в существующих ускорителях.

Методология и методы исследования

Методология представленных автором исследований включает в себя:

1. Первичный качественный анализ взаимосвязанных физических процессов, выявление ключевых эффектов, аналитические расчеты и оценки.
2. Разработка моделей и проведение вычислительных физических экспериментов с использованием методов трехмерного мультифизического моделирования в программных системах «COMSOL Multiphysics» и «ANSYS».
3. Разработка конструкторских и технологических решений на основе итеративного трехмерного автоматизированного проектирования в программной системе «Solidworks».
4. Изготовление и лабораторные испытания опытного образца.

5. Доработка опытного образца, коррекция параметров электроники.
6. Испытания изготовленного оборудования, измерения и настройка параметров пучка на действующем линейном ускорителе ионов.
7. Сбор и обработка экспериментальных данных с использованием программной среды разработки LabVIEW.

Связь с научными программами

Отдельные части данной работы выполнены в рамках следующих программ:

1. Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы.
2. Научная программа Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».
3. Программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Апробация работы и публикации

Всего по теме диссертации опубликована 41 работа. Основные результаты диссертации изложены в 16 публикациях [1–16] в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе в 15 публикациях, индексируемых в международной базе цитирования Web of Science (Core Collection), а также в 25 работах [17 — 41], опубликованных в трудах международных конференций, индексируемых в международной базе цитирования Scopus:

1. Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2014, 2016, 2018, 2021).
2. International Beam Instrumentation Conference (IBIC 2017, 2018, 2024).
3. Linear Accelerator Conference (LINAC 2016).
4. International Particle Accelerator Conference (IPAC 2018).

Подготовка публикаций проводилась совместно с соавторами. Содержание диссертации и положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, содержащего 148 наименований, включая 41 работу автора.

Общий объем диссертации: 350 страниц, включая 283 рисунка и 16 таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** излагаются актуальность и степень разработанности темы исследования; цель, научная новизна и практическая значимость работы; описывается личный вклад автора и перечисляются положения, выносимые на защиту; отражается степень достоверности, методология и методы проведенного исследования, а также указываются данные о связи с государственными научными программами, апробации работы и публикациях основных результатов диссертации.

В **Главе 1** сформулированы задачи и потребности в диагностике пучков в зависимости от типа, назначения и характеристик линейных ускорителей ионов, даны определения и типичные значения основных измеряемых параметров пучков, проведен анализ методов и средств диагностики и показан типичный выбор диагностических устройств, приведены описания их физических принципов работы и основных технических характеристик, особенности и примеры практической реализации, а также указаны опытно-аналитические обоснования их применимости для различных типов пучков, что в совокупности формирует согласованную физико-техническую концепцию построения систем базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов с целью проведения следующих типов измерений:

1. Измерения тока: индукционный датчик тока и цилиндр Фарадея.
2. Разрушающие измерения поперечного профиля: двухпроводочный сканер, многопроводочный профилометр, люминесцентный экран.
3. Неразрушающие измерения поперечного профиля: ионизационный монитор поперечного сечения пучка, профилометр на основе свечения остаточного газа.
4. Измерения поперечного эмиттанта: электростатический, диафрагмированный, щелевой измерители эмиттанта.
5. Измерения продольной микроструктуры: измеритель формы сгустков.

6. Измерения положения и фазы: ёмкостные и полосковые датчики положения.
7. Измерения потерь: газовые ионизационные и пропорциональные камеры.

Представленная физико-техническая концепция была, в частности, использована для составления концепции системы диагностики пучка [9] сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications) [11] — компактного источника нейтронов для фундаментальных исследований, промышленных приложений и образовательных задач, разрабатываемого на основе ускорителя с проектными параметрами: энергия 13 МэВ, импульсный ток 100 мА, длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 100 Гц.

Одной из основных проблем для диагностики пучка в данном ускорителе является значительная импульсная и средняя мощность пучка в совокупности с относительно низкой энергией, что существенно ограничивает выбор возможных диагностических приборов и методов. В связи с этим, было рекомендовано построение системы диагностики на основе устройств, использующих неразрушающие способы измерений. Индукционные датчики тока и полосковые датчики положения пучка для измерений положения, фазы и энергии пучка могут быть стационарно установлены вдоль ускорителя в количестве, достаточном для контроля прохождения пучка вдоль всей ускоряющей структуры.

На выходе ускорителя регистрация положения и поперечного сечения пучка может быть проведена с помощью ионизационного монитора поперечного сечения. Для измерений профиля пучка на входе и выходе RFQ наиболее предпочтительными устройствами являются проволочные сканеры, обеспечивающие прецизионные измерения, результаты которых могут быть использованы как для настроечных процедур, так и для моделирования динамики пучка в ускорителе с помощью различных транспортных кодов.

С учетом значительной импульсной и средней мощности пучка представляется нецелесообразным использование цилиндров Фарадея, совмещающих функции поглотителя и измерителя тока высокоинтенсивного пучка в каналах транспортировки пучков средних и высоких энергий. Для корректных измерений в таких цилиндрах должно

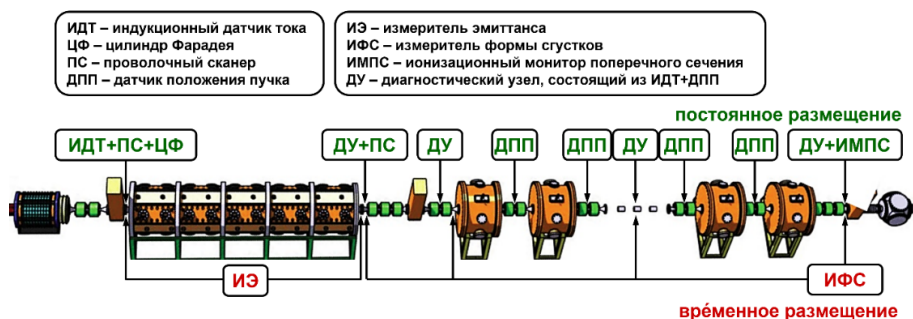


Рисунок 1.1.1 — Схема предложенного расположения оборудования системы диагностики пучка вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA

использоваться большое количество технологических решений, существенно увеличивающих их стоимость по сравнению с простой охлаждаемой ловушкой, рассчитанной на ту же мощность теплосъема. При этом охлаждаемый ЦФ может использоваться в качестве ловушки пучка номинальной интенсивности в канале транспортировки пучка низких энергий для предварительной настройки пучка перед ускорением в RFQ.

В случае конфигурации канала, не позволяющей разместить несколько отдельных диагностических устройств, предлагается разработка единого компактного диагностического бокса, включающего в себя ИДТ, охлаждаемый ЦФ и проволочный сканер.

Измеритель эмиттанса и измеритель формы сгустков часто изготавливаются в единичных экземплярах и передвигаются вдоль ускорителя в составе отдельного диагностического стенда на протяжении всего процесса настройки новых секций. В качестве ловушки пучка для такого стенда может использоваться стационарный охлаждаемый ЦФ, конструкция которого существенно упрощена благодаря размещению системы охлаждения вне вакуума ионопровода.

Схема предложенного размещения оборудования диагностики пучка вдоль линейного ускорителя протонов проекта DARIA приведена на рисунке 1.1.1.

В **Главе 2** описаны результаты работ в рамках нескольких договоров на поставку диагностических устройств и систем для линейных ускорителей ионов, как отечественных, так и зарубежных ускорительных центров, по которым были проведены разработка, изготовление и настройка оригинального оборудования базовой системы диагности-

ки пучков для линейных ускорителей ионов на основе разработанной физико-технической концепции. Из всего многообразия существующего оборудования диагностики параметров пучка было предложено использовать устройства, практическая реализация которых возможна с учетом имеющегося или гарантированно достижимого уровня отечественных технологий.

1. Измерители тока пучка:

- индукционные датчики тока (ИДТ) (Рисунок 2.1.1),
- охлаждаемые и неохлаждаемые цилиндры Фарадея (ЦФ) (Рисунок 2.1.2).



Рисунок 2.1.1 – Разработанные трехмерные модели ИДТ с апertурами 60 мм и 33 мм, фотография изготовленного ИДТ с апertурой 60 мм в руках автора и фотография комплекта изготовленных ИДТ для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Всего было разработано 4 конфигурации индукционных датчиков тока с различными рабочими параметрами для: ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ, ЛУ DARIA, ЛУ ИЯИ РАН и тестовых источников ионов в НИЯУ МИФИ. Разработанные ИДТ отличаются сердечниками из MnZn-ферритов без диэлектрического покрытия с высокой начальной магнитной проницаемостью $\sim 1 \cdot 10^4 \pm 25\%$, обмоткой из медного провода в радиационно стойкой и вакуумно-совместимой полиимидной изоляции, многослойной электромагнитной защитой, снижающей влияния импульсных и статических магнитных полей, а также внешних наводок на промышленной частоте 50 Гц в среднем на два порядка, и унифицированной технологией изготовления вакуумной камеры, позволяющей на этапе разработки конструкторской документации масштабировать всю сборку под конкретные требования на присоединительные апертурные фланцы датчика. С целью абсолютной самокалибровки датчика в конструкции ИДТ предусмотрен дополнительный виток для подачи калибровочного тока известной величины от отдельного источника тока, размещенного в предусилительной электронике.

Разработанные ИДТ в совокупности обладают следующими параметрами:

- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: $0.01 \div 150$ мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: $0.1 \div 200$ мкс;
- минимальная длительность фронта импульса: 0.05 мкс;
- спад вершины импульса: $< 0.02 \%$ / мкс;
- четыре переключаемых диапазона коэффициента усиления: 0.1, 1, 10, 100.

Конфигурации компактных охлаждаемых ЦФ [10] выполнены на основе медных электродов, профилированных для двукратного увеличения площади взаимодействия электрода с пучком с целью снижения поверхностной плотности мощности тепловыделения. Непрямое охлаждение основано на использовании диска из нитрида алюминия с высокой теплопроводностью ~ 170 Вт/(м*К), изолирующего сигнальный электрод от охлаждаемой сборки из двух медных пластин с запрессованной и пропаянной между ними цельнотянутой медной трубкой, по которой прокачивается вода из основной системы охлаждения ускорителя. Для подавления вторичной электронной эмиссии предусмотрен кольцевой электрод из нержавеющей стали под фиксированным

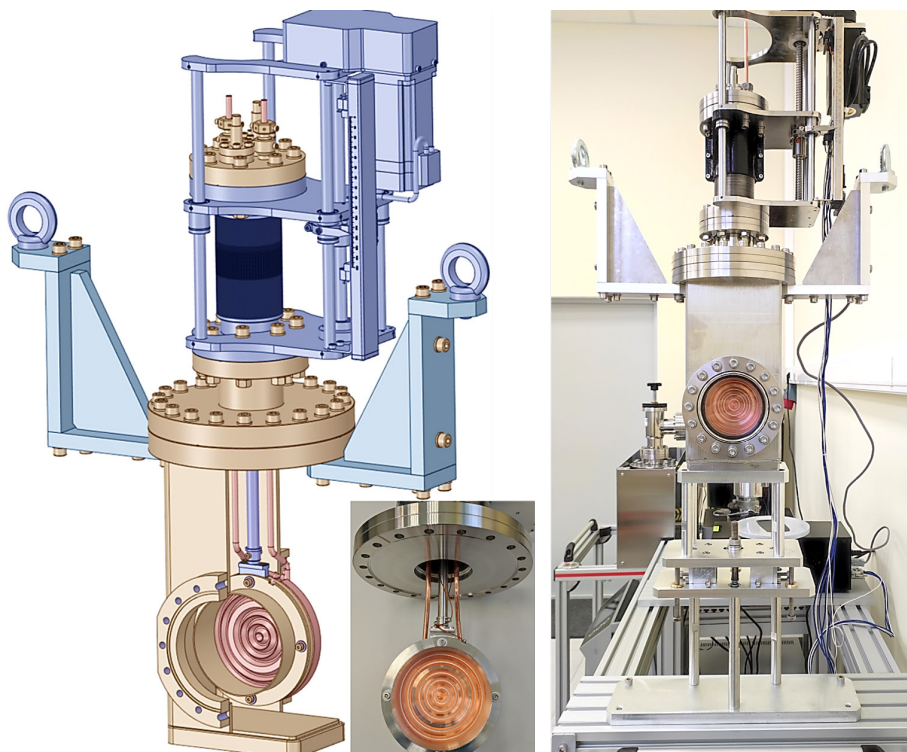


Рисунок 2.1.2 – Трехмерная модель и фотография охлаждаемого ЦФ для ЛУ DARIA

потенциалом смещения до -5 кВ. Отношение продольного размера детектирующей сборки к рабочей апертуре $\sim 1/2$, что обеспечивает эффективное подавление вторичной электронной эмиссии при относительно компактных продольных размерах.

Разработанные ЦФ в совокупности обладают следующими параметрами:

- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: $0.01 \div 150$ мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: $0.1 \div 200$ мкс;
- минимальная длительность фронта импульса: 0.05 мкс;
- четыре переключаемых диапазона коэффициента усиления: $0.1, 1, 10, 100$;
- максимальная энергия: < 45 МэВ (ограничена толщиной электрода ЦФ);

- максимальная импульсная плотность мощности при облучении на частоте 1 Гц: $200 \cdot E_{\text{пучка}} [\text{МэВ}] \text{ Вт/мм}^2$ (ограничена локальным импульсным перегревом входной поверхности электрода ЦФ);
- максимальная средняя мощность пучка: $<1 \text{ кВт}$ (ограничена расчетной средней мощностью теплосъема системы охлаждения ЦФ);
- максимальное напряжение смещения для регистрации импульсного тока пучка 100 мА (при энергии 60 кэВ) без учета эффекта компенсации пространственного заряда: -3 кВ .

2. Измерители поперечного профиля пучка:

- двухпроводочные сканеры (ПС) (Рисунок 2.2.1),
- многопроводочные профилометры (МПП) (Рисунок 2.2.2),
- ионизационные мониторы поперечного сечения (ИМПС) (Рисунок 2.2.3),
- флуоресцентные мониторы (ФЛУМ) (Рисунок 2.2.4).

Двухпроводочные сканеры изготавливались в виде двух взаимно перпендикулярных проволочек из позолоченного вольфрама диаметром 100 мкм, закрепленных на вилке в зажимах с пружинной системой натяжения. Вилка фиксируется на штоке компактного моторизованного прецизионного ввода движения с шаговым двигателем. Для работы как с током электронов вторичной эмиссии, так и с током первичных поглощаемых частиц пучка предусмотрена подача на проволочки потенциала до $\pm 100 \text{ В}$.

Разработанные сканеры в совокупности обладают следующими рабочими характеристиками, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать (по приведенной авторской методике), на основе допустимых импульсных и средних тепловых нагрузок на сигнальные проволочки:

- пространственное разрешение: не хуже 0.1 мм;
- рабочая амплитуда импульса тока: $0.01 \div 50 \text{ мА}$;
- рабочая длительность импульса тока: $0.5 \div 200 \text{ мкс}$;
- рабочая частота следования импульсов тока пучка: $1 \div 50 \text{ Гц}$.

Для универсального использования многопроводочных профилометров были выбраны конфигурации в виде «сетки» с переменным шагом проволочек диаметром 100 мкм из позолоченного вольфрама, размещенных на промышленно изготовленных печатных платах из керамических высоковакуумных ламинатов. Типичный шаг

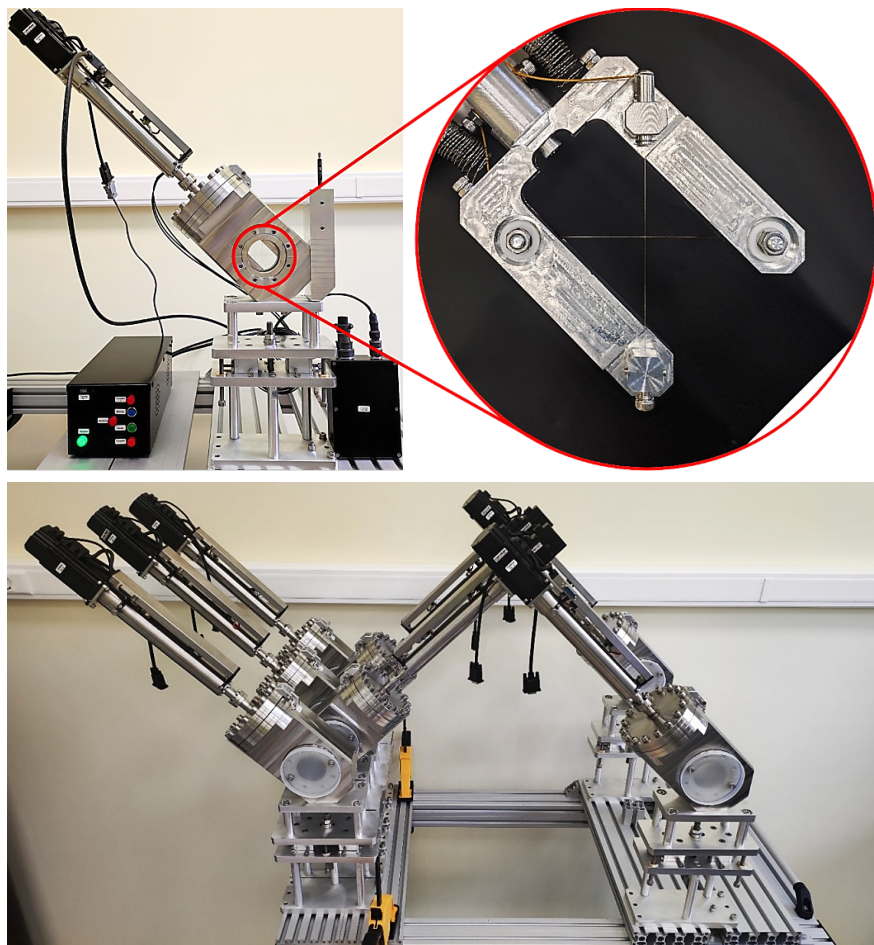


Рисунок 2.2.1 — Фотография проволочного сканера в сборе с юстировочной подставкой, площадкой под геометки, контроллером шагового двигателя и предварительным усилителем и фотография комплекта изготовленных проволочных сканеров в сборе с юстировочными подставками для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ

проволочек в центральной области составляет 1 мм, по краям — 2÷4 мм в зависимости от ожидаемых размеров пучка, таким образом обеспечивается необходимое разрешение в рабочем диапазоне размеров пучка при относительно большой общей апертуре датчика. Для уменьшения «кросс-токов» электронов вторичной эмиссии используются

отрицательные потенциалы смещения до -300 В на сигнальных проводочках в совокупности с положительными потенциалами на дополнительных проводочных или полосковых электродах.

Разработанные многопроводочные профилометры в совокупности обладают следующими рабочими характеристиками, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать (по приведенной авторской методике), на основе допустимых импульсных и средних тепловых нагрузок на сигнальные проводочки:

- пространственное разрешение: не хуже 1 мм;
- рабочая амплитуда импульса тока: $0.01 \div 50$ мА;
- рабочая длительность импульса тока: $0.5 \div 200$ мкс;
- рабочая частота следования импульсов: $1 \div 50$ Гц.

Представленные ионизационные мониторы поперечного сечения (ИМПС) [1] на базе электронно-оптических преобразователей с микроканальными пластинами и стандартных камер машинного зрения отличаются высокой информативностью [8, 12] и полной прозрачностью измерений благодаря работе на основе эффекта ионизации пучком остаточного газа в ионопроводе ускорителя. ИМПС обладают широким диапазоном измерений по току пучка за счет использования ионной

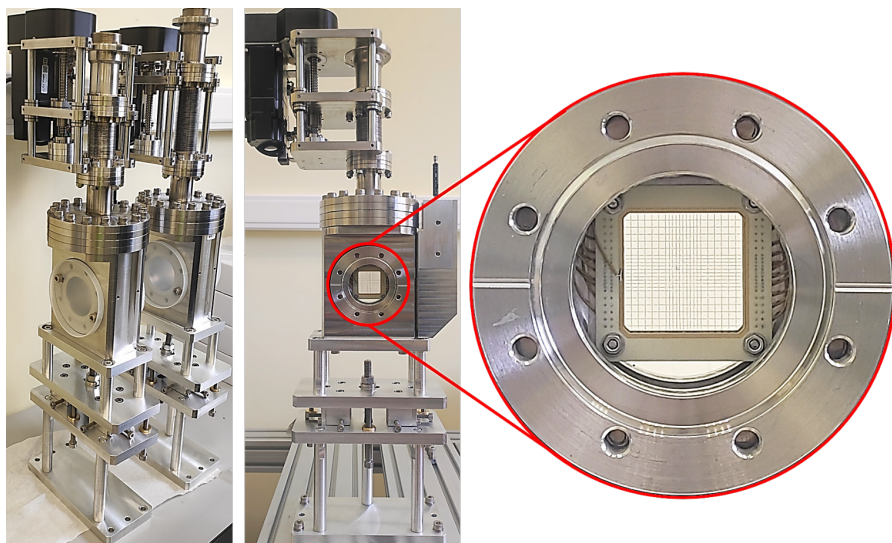


Рисунок 2.2.2 – Комплект многопроводочных профилометров для ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ в сборе с вакуумным вводом движения и подставкой для юстировки

компоненты ионизации, которая меньше, чем электронная компонента, подвержена влиянию пространственного заряда пучка, а также универсальны с точки зрения типа частиц и работают в широком диапазоне энергий. Высокое быстродействие ИМПС, не уступающее люминесцентным экранам, и отсутствие необходимости передачи движения в вакуум ионопровода делают данный прибор удобным многопараметрическим детектором для неразрушающей диагностики в режиме реального времени поперечных параметров пучков в линейных ускорителях ионов.

Разработанные ИМПС обладают следующими рабочими характеристиками:

- пространственное разрешение: не хуже 1 мм;
- рабочая амплитуда импульса тока: $0.01 \div 100$ мА;
- рабочая длительность импульса тока: $0.1 \div 200$ мкс;
- рабочая частота следования импульсов: $1 \div 100$ Гц;
- рабочая энергия пучка: >10 МэВ/нуклон;

Разработка и изготовление флуоресцентных мониторов [14] осуществлялись для проверки возможности использования относительно простого, дешевого и компактного способа диагностики на основе

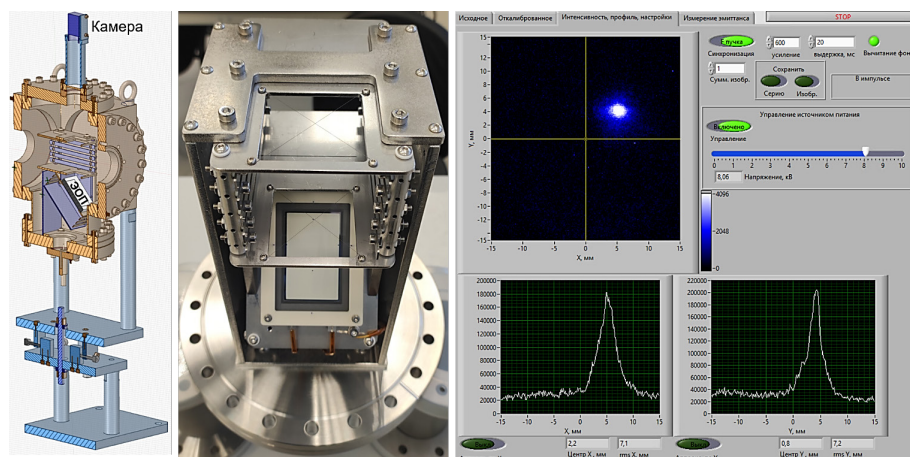


Рисунок 2.2.3 — Трехмерная модель ИМПС, фотография внутренней детектирующей сборки и рабочее окно программы с результатом измерений двумерного поперечного сечения пучка протонов энергией 305 МэВ на ЛУ ИЯИ РАН, давление остаточного газа в ионопроводе $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ мбар

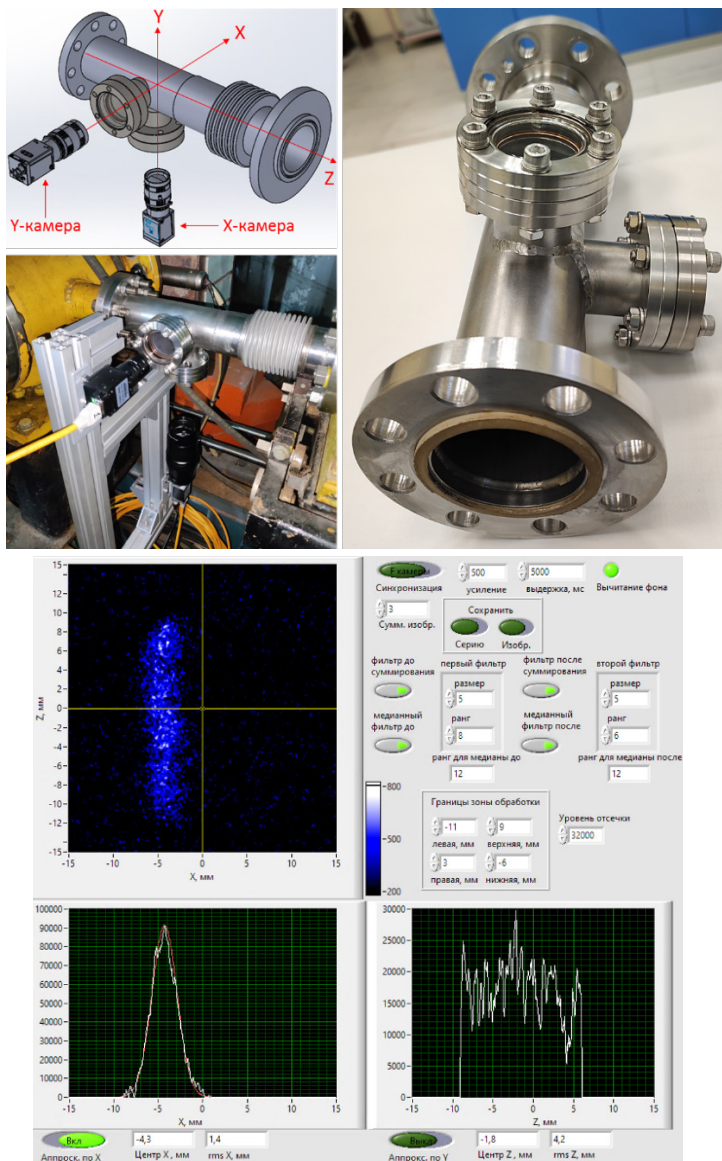


Рисунок 2.2.4 — Трехмерная модель ФЛУМ, фотографии ФЛУМ, установленного на низкоэнергетическом канале инжекции ЛУ ИЯИ РАН, и рабочее окно программы с измеренным поперечным профилем пучка протонов энергией 400 кэВ и средним током 650 нА (на частоте 50 Гц), рабочее давление остаточного газа в ионопроводе $\sim 10^{-6}$ мбар

стандартных камер машинного зрения, без использования напуска газа и усилителей изображения в типичных условиях низкоэнергетического канала транспортировки линейного ускорителя ионов. Принципиальным отличием флуоресцентных мониторов от любых других устройств диагностики поперечного профиля является возможность проведения непрерывных, полностью невозмущающих измерений, при которых, в том числе не меняется степень компенсации пространственного заряда высокоинтенсивного низкоэнергетического пучка [4, 6], что критически важно для сохранения правильной динамики пучка как вдоль канала инжекции в ЛУ, так и на входе в RFQ. Для минимизации паразитных переотражений внутренние поверхности вакуумной камеры и патрубков с вакуумными окнами были покрыты тонким матовым токопроводящим слоем графита. Видеокамеры для подавления внешней засветки оборачивались черной матовой фольгой, а также закрывались свинцовым колпаком для снижения радиационных повреждений от рентгеновского фона инжектора.

Разработанные флуоресцентные мониторы на основе стандартных камер машинного зрения обладают следующими рабочими характеристиками:

- пространственное разрешение: не хуже 0.2 мм;
- интегральный режим работы (1 кадр за 10–20 с);
- рабочая амплитуда среднего тока > 1 мкА,
- рабочее давление остаточного газа в ионопроводе: $> 10^{-7}$ мбар.

3. Измерители поперечного эмиттанта пучка:

- диафрагмированные и щелевые измерители (Рисунок 2.3.1).

Разработка и изготовление диафрагмированных измерителей эмиттанта производились с использованием ЭОП на основе МКП с люминесцентным экраном, изображение с которого регистрируется видеокамерой, и диафрагмированной маски, итоговый вариант которой был изготовлен из медной пластины толщиной 0.5 мм с механически выполненными отверстиями диаметром 100 мкм, расположенными с шагом 1 мм. Расстояние между маской и ЭОП можно менять с дискретным шагом 10 мм, что даёт возможность при необходимости увеличивать измерительный диапазон для работы с сильно расходящимися пучками.

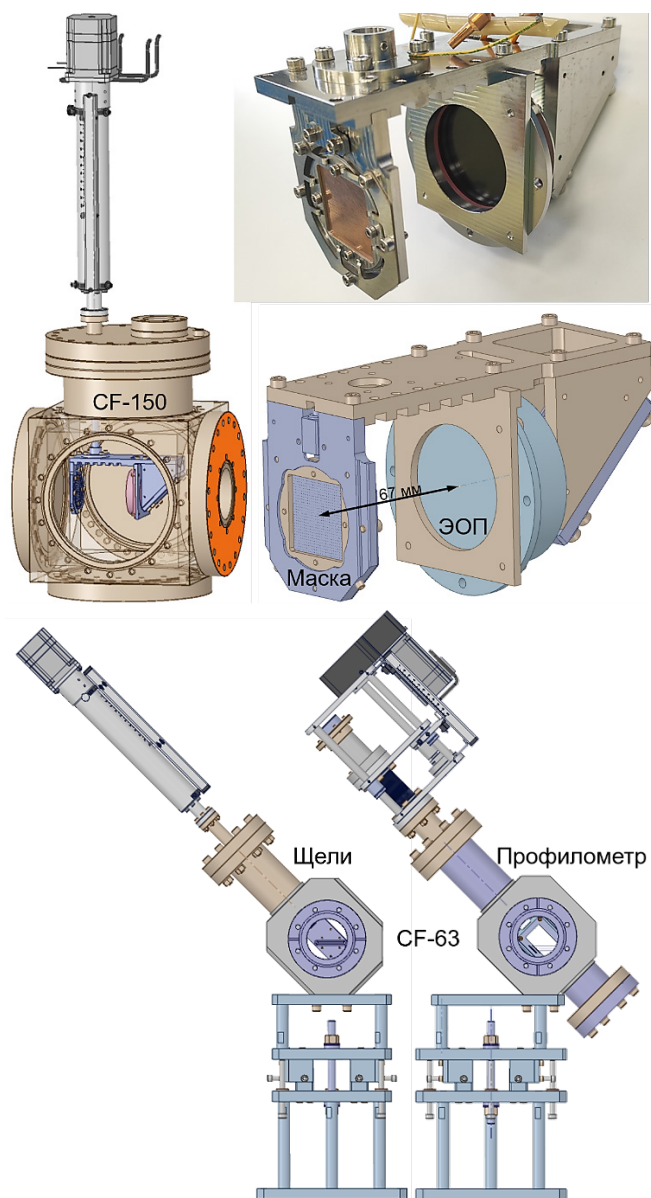


Рисунок 2.3.1 — Трехмерные модели и фотография детектирующей сборки диафрагмированного измерителя эмиттанса (слева), трехмерные модели узлов щелей и многопроволочного профилометра щелевого измерителя эмиттанса

Щелевые измерители эмиттанса выполнены на основе щелей, образуемых юстируемыми шторками, и многопроволочного профилометра типа «арфа», вводимых в ионопровод под углом 45° к горизонтальной оси.

Разработанные измерители эмиттанса в совокупности обладают следующими параметрами, комбинации которых необходимо предварительно численно оценивать на основе допустимых импульсных и редных тепловых нагрузок на диафрагмированную маску, шторки щелевого узла и проволочки профилометра:

- пространственное разрешение: не хуже 1 мм для маски и 0.1 мм для щелей;
- угловое разрешение: переменное, с наилучшим значением для диафрагмированного измерителя ~ 1 мрад и для щелевого ~ 0.6 мрад;
- рабочая амплитуда импульса тока: $0.1 \div 50$ мА;
- рабочая длительность импульса тока: $0.1 \div 100$ мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 Гц (наладочный режим).

4. Измерители положения и фазы:

- короткозамкнутые полосковые датчики положения пучка (Рисунок 2.4.1).

Для создания конструкций датчиков положения и фазы была выбрана конфигурация короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка (ДПП), и предложена методика для их последовательной разработки [16], объединяющая этапы трехмерного моделирования, оптимизации конструкции, изготовления опытного образца и калибровки в стендовых испытаниях:

- 1) На первом этапе выполняется детальный электромагнитный анализ с расчётом передаточного импеданса при разных геометрических параметрах.
- 2) Далее на основе полученных результатов проводится оптимизация размеров электродов, а также выполняется согласование полосковой линии с сигнальным разъёмом для обеспечения минимальных отражений сигнала в рабочем диапазоне частот.
- 3) В соответствии с полученными геометрическими параметрами изготавливается опытный образец.
- 4) Далее проводятся стендовые испытания изготовленного образца. В частности, на векторном анализаторе цепей измеряются

S-параметры и передаточный импеданс, а также измеряется линейность отклика, чувствительность и разрешение.

- 5) По результатам стендовых испытаний происходит доработка конструкции опытного образца и/или оптимизация сборки отдельных узлов датчика.

Разработанная методика проектирования, оптимизации и экспериментальной калибровки короткозамкнутого полоскового датчика положения может быть использована при создании подобных устройств диагностики для широкого класса линейных ускорителей ионов с различными параметрами пучков.

Изготовленный полосковый датчик положения пучка был установлен (рисунок 2.4.2 (а)) и испытан на пучке ЛУ ИЯИ РАН. На рисунке 2.4.2 (б) показан сигнал ДПП (канал 2) от сгустков пучка, следующих с частотой 198.2 МГц, по отношению к опорному ВЧ-сигналу ускоряющего резонатора 991 МГц (канал 3). На рисунке 2.4.2 (в) показаны типичные сигналы ДПП, полученные при прохождении сгустков протонов длительностью ~ 170 пс, энергией ~ 156.6 МэВ и импульсным током пучка ~ 7 мА при длительности импульса тока ~ 150 мкс.

По каналам 1 и 2 передаются широкополосные сигналы горизонтальных портов ДПП, по каналам 3 и 4 передаются сигналы вертикальных портов ДПП, прошедшие через предварительный малошумящий усилитель 3й гармоника частоты следования сгустков (594.6 МГц).



Рисунок 2.4.1 — Образцы разработанных полосковых короткозамкнутых ДПП

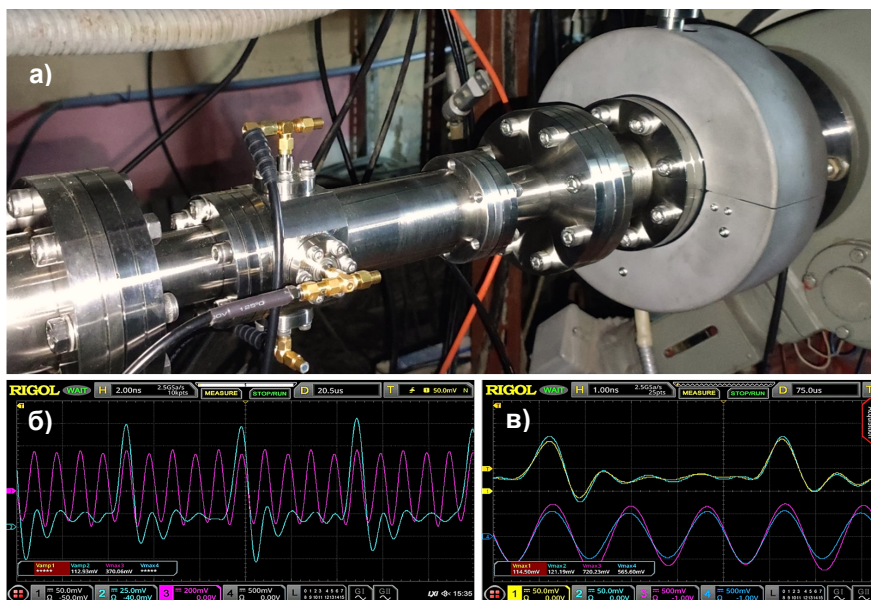


Рисунок 2.4.2 – ДПП рядом с ИДТ и сигналы ДПП от ступков пучка ЛУ ИЯИ РАН

Также были проведены времяпролётные измерения средней энергии ступков с точностью $\sim 1\%$ при включении/выключении ускоряющего резонатора, которые показали возможность использования разработанных ДПП для подобного типа диагностики, а в случае применения соответствующих методик I/Q-демодуляции сигнала, и для фазометрических процедур настройки ВЧ резонаторов.

Разработанные короткозамкнутые полосковые датчики положения пучка обладают следующими рабочими параметрами:

- пространственное разрешение: ~ 100 мкм для 1 мА импульсного тока пучка;
- область линейности: $> 50\%$ апертуры;
- чувствительность: широкополосная > 15 мВ/мА; спектральная с МШУ > 100 мВ/мА;
- рабочий диапазон частот следования ступков: $50 \div 1000$ МГц.

5. Измерители продольной микроструктуры пучка:

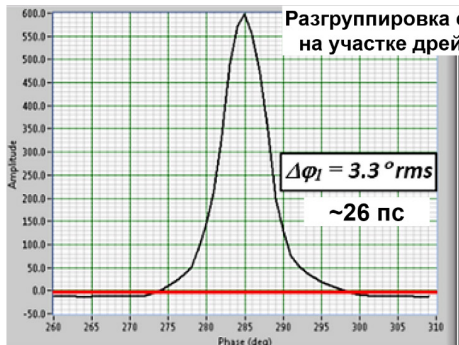
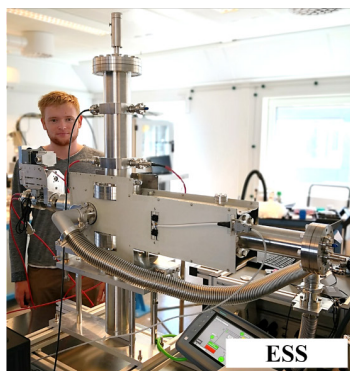
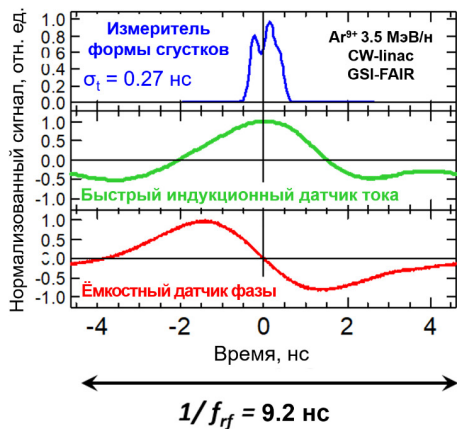
- измеритель формы сгустков (фазовый анализатор) (рисунок 2.5.1).

Измеритель формы сгустков (ИФС, устоявшееся англоязычное название: BSM (bunch shape monitor)), работающий на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов, предназначен для измерения продольного распределения заряда в сгустках пучка ускоренных заряженных частиц и играет ключевую роль на этапах настройки параметров ускоряющих структур и оптимизации продольной динамики пучка в линейных ускорителях ионов резонансного типа, позволяя проводить уникальную диагностику микроструктуры пучка вне зависимости от энергии и типа ускоряемых ионов.

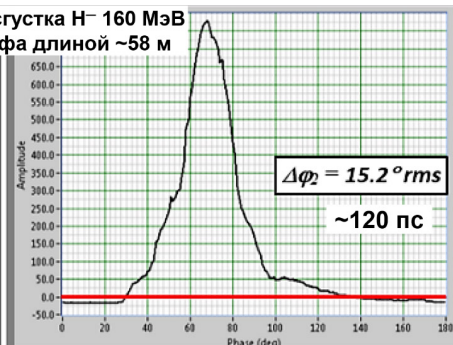
В частности, в рамках работ автора по данному направлению подобные измерители были разработаны и изготовлены для таких ускорителей многзарядных ионов, как UNILAC и CW-linac GSI-FAIR (Германия), FRIB MSU (США), линейного ускорителя отрицательных ионов водорода LINAC4 CERN (Швейцария), а также для линейных ускорителей протонов комплексов GSI-FAIR (Германия), ESS (Швеция) и MYRRHA (Бельгия).

Индивидуальная разработка под особенности каждого ускорителя и постоянное усовершенствование измерительных возможностей делают прибор востребованным не только на существующих, но и на сооружаемых ускорителях, например, проекты измерителя формы сгустков были разработаны для комплекса электрон-ионного коллайдера DERICA ОИЯИ и нескольких линейных ускорителей ионов РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В последние годы в связи с повышением требований к точности измерений и эксплуатационным характеристикам диагностического оборудования для современных ускорителей автором были внесены изменения в базовую конфигурацию и конструкцию измерителей [3]. Применение более сложного ВЧ дефлектора с симметричными полями, а также дополнительной квадрупольной линзы для коррекции траекторий вторичных электронов позволило улучшить фазовое разрешение прибора до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии, лучшее экспериментально измеренное значение которой равно 4 ± 2 пс, что соответствует $\sim 0.5^\circ$ для частот следования сгустков ~ 350 МГц. Использование специальной многослойной защиты от внешних магнитных полей позволило практически



Выход из LINAC4 CERN



Вход в PS-бустер CERN

Рисунок 2.5.1 — Разработанные модификации ИФС и примеры измерений формы сгустков пучков на различных линейных ускорителях ионов

исключить их влияние на рабочие характеристики приборов и расширить зону возможной установки измерителей на ускорителях. Внешение дополнительного элемента: регулируемой поворотной шторки после дефлектора — позволило впервые на практике расширить диапазон измерений по фазам до полного периода следования анализируемых сгустков, что необходимо для диагностики продольного ореола, а также в ряде случаев в процессе наладки ускорителей, когда сгусток должным образом еще не сформирован.

Испытания измерителя в обновленной конфигурации проводились на разных зарубежных линейных ускорителях протонов и отрицательных ионов водорода, а также многозарядных ионов, типичные результаты показаны на рисунке 2.5.1.

Разработанные измерители формы сгустков в совокупности обладают следующими рабочими характеристиками:

- рабочая энергия пучка ионов: $0.5 \div 1000$ МэВ/нуклон;
- амплитуда, длительность и частота следования импульсов тока пучка:
- в пределах допустимого нагрева мишени;
- рабочая частота измерителя: $80 \div 352$ МГц;
- фазовое разрешение: не хуже 0.5° ;
- диапазон измерений по фазам: 360° ;
- скорость измерений: 1 фазовая точка за один импульс тока пучка.

В процессе исследований для каждого типа устройств были проработаны следующие аспекты:

- предлагаемые варианты реализации устройства,
- конструктивные особенности,
- расчетно-модельные оценки рабочих характеристик,
- параметры электроники,
- итоговые эксплуатационные параметры,

а также проведены лабораторные и/или пучковые испытания с измерениями параметров пучков на действующих линейных ускорителях ионов, в ходе которых были подтверждены не только базовые методики измерений, но и апробированы новые методы, включая верификацию разработанных мультифизичных моделей устройств.

Результатом выполненных работ стали разработанные автором оригинальные конфигурации оборудования диагностики пучков, которые

предназначены для широкого круга ускорителей и в совокупности фактически перекрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов по типу частиц (от протонов и отрицательных ионов водорода до многозарядных тяжелых ионов), энергиям (от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями ~ 1 ГэВ) и интенсивности, позволяя проводить необходимые диагностические измерения и на сильноточных пучках для нейтронных источников, комплексов для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, и на пучках низкой интенсивности, например, для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры.

В **Главе 3** описаны процессы разработки, изготовления и настройки оригинальных систем диагностики ионных пучков для стендов облучения на примере установок Ускорительного центра нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода.

В частности, для стенда протонного облучения (СПО) [5] и комплекса протонной терапии (КПТ), где пучки протонов выводятся на воздух, разработаны и реализованы системы диагностики интенсивности, положения и профиля пучка с использованием люминесцентных экранов (ЛЭ) (Рисунок 3.1.1) и мультянодных газовых счётчиков (МГС) [7] (Рисунок 3.1.2) в широком диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^{13} протонов в импульсе.

В ходе работ были построены численные физические модели процессов электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации в газах, а также показана возможность предварительного расчета коэффициентов усиления счётчиков в ионизационном и пропорциональном режимах работы для составления требований к электронике.

Отдельные проблемы, выявленные во время эксплуатации на выведенных пучках протонов, были устранены при разработке приборов с обновленной конфигурацией, позволяющей осуществлять диагностику в полном диапазоне токовых и пространственных характеристик пучка ЛУ ИЯИ РАН, в том числе для настройки и контроля

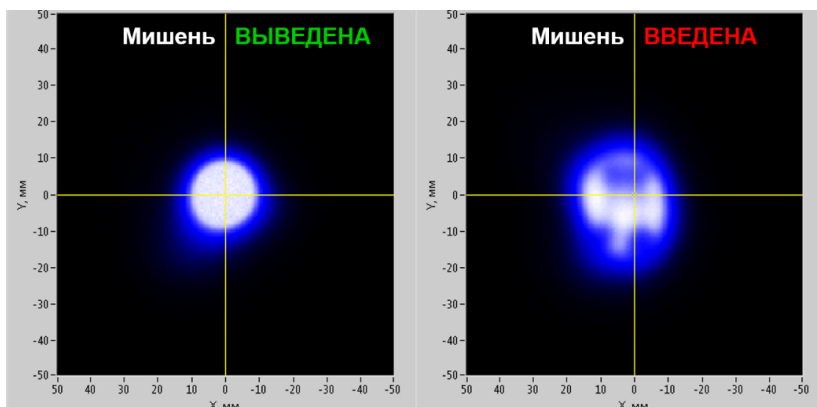


Рисунок 3.1.1 — Примеры наблюдаемых поперечных сечений пучка протонов на люминесцентном экране СПО при выведенной и введенной облучаемой мишени

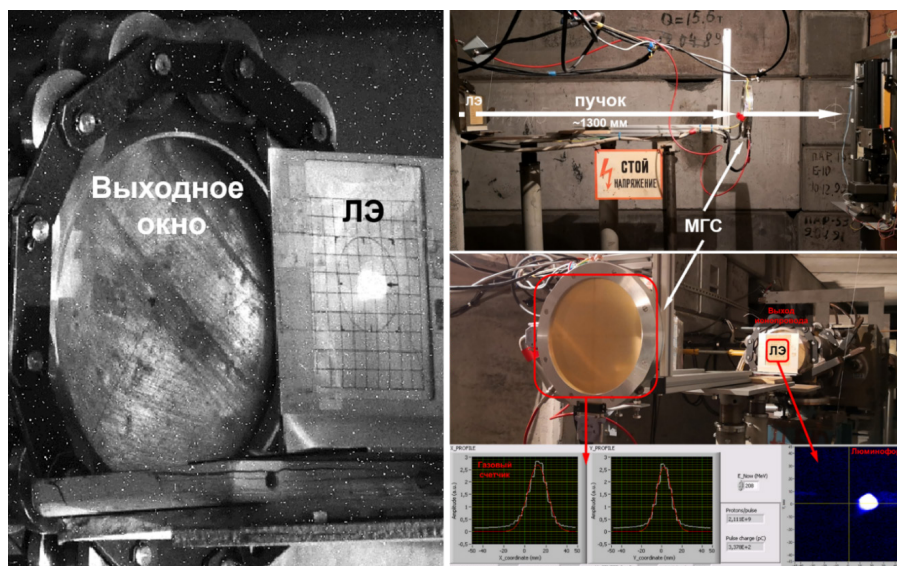


Рисунок 3.1.2 — МГС и люминесцентный экран, установленные на выводе пучка в комплекс протонной терапии ИЯИ РАН

пучков, используемых в исследованиях как конвенциональных, так и флэш-режимов протонной терапии онкологических заболеваний.

Итоговая конфигурация МГС (рисунок 3.1.3) состоит из печатных плат на основе фольгированного стеклотекстолита FR4 толщиной

~0.5 мм с иммерсионным золочением. Одна пластина с одинаковыми сплошными квадратными электродами с обеих сторон установлена в середине металлического корпуса и подключена к высоковольтному разъему. Другие две пластины имеют 25 сигнальных полосков шириной 3.9 мм с шагом между ними 0.1 мм. Также имеются два дополнительных полоска по краям активной области с нулевым потенциалом для улучшения однородности электрического поля в активном объеме. Эти пластины в сочетании с внешними прижимными накладками и витоновыми уплотнительными кольцами обеспечивают герметичность всего устройства. Также в корпусе сделаны два резьбовых отверстия для продувания объема счётчика сухим азотом N_2 .

Таким образом, общий объем счетчика разделен на две сегментированные ионизационные камеры с рабочим зазором 8 мм, измеряющие ток пучка и профили X, Y в режиме ионизации с рабочим напряжением ~8 кВ. Ток пучка получается путем программного суммирования сигналов каждого полоска. Отказ от пропорционального режима работы и переход к ионизационному режиму как для измерений тока, так и для измерений профиля пучка, позволили уменьшить эффекты деградации электродов счётчика при работе с пучками большой интенсивности, увеличив тем самым общий динамический диапазон детектора.

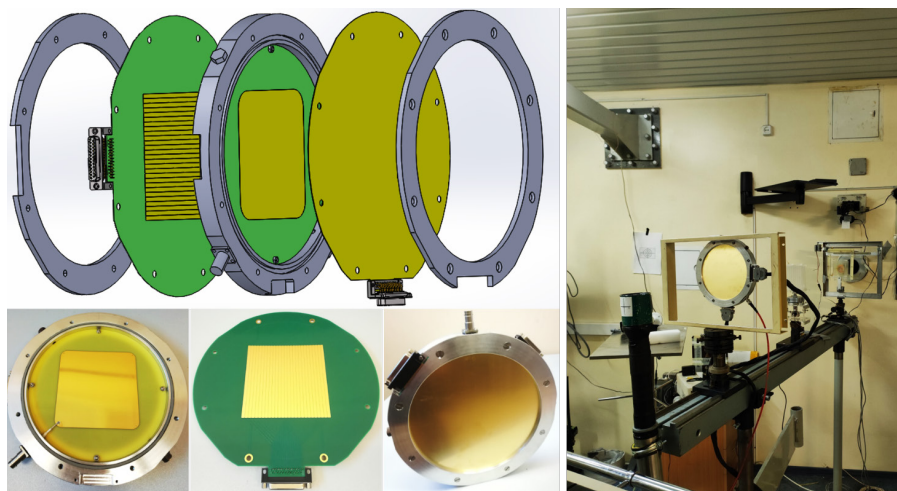


Рисунок 3.1.3 — Трехмерная модель и фотография мультианодного газового счетчика, установленного на выходе пучка в процедурной КПТ

По своему физическому устройству МГС является абсолютным измерителем, так как его работа основана на известной и достоверно рассчитываемой величине ионизационных потерь протонов в воздухе, позволяющей предсказать количество образующихся электронов первичной ионизации для одного протона. Результаты проведенного мультифизического моделирования позволили построить калибровочную зависимость измеряемого сигнала от энергии пучка, при этом разовые контрольные калибровки выполнялись на основе ИДТ для разных энергий пучка.

Мультианодные газовые счётчики для диагностики пучков протонов, выведенных на воздух, обладают в совокупности следующими рабочими параметрами:

- пространственное разрешение: 4 мм;
- рабочая импульсная интенсивность пучка: $10^7 \div 10^{13}$ протонов в импульсе для измерений профиля, $10^6 \div 10^{10}$ протонов в импульсе для измерений импульсной интенсивности пучка;
- рабочая длительность импульса тока: $5 \div 200$ мкс;
- рабочая частота следования импульсов: 1 Гц (для интенсивностей $>10^{10}$ протонов в импульсе), до 50 Гц ($<10^{10}$ протонов в импульсе).

Также в ходе развития стенда облучения (Рисунок 3.1.4) на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН был разработан комплекс устройств диагностики ключевых параметров пучка [13] для исследований по взаимодействию ускоренных пучков заряженных частиц с веществом.

Отличительной чертой разработанной системы диагностики является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях, включая смесь зарядовых состояний, а также атомарные пучки H^0 , во всём диапазоне энергий (20÷209 МэВ) и интенсивностей ($10^6 \div 10^{12}$ частиц в импульсе) пучков, подаваемых на стенд. Индукционный датчик тока и многопроволочный профилометр, установленные на входе в стенд, позволяют измерять ток и профили пучка частиц.

На выходе стенда установлены цилиндры Фарадея, в которых для повышения точности и надёжности проводимых измерений реализован как набор классических методик для оптимизации их работы, так и нестандартные решения, например, датчики ореола пучка, позволяющие контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым

Стенд облучения на выходе линейного ускорителя ионов H^+ / H^- ИЯИ РАН

Система диагностики пучка:

- ИДТ – индукционный датчик тока с ферритовым сердечником
- МПП – многопроволочный профилометр (21*21, шаг 1 и 2 мм)
- МЛП – многоламельный профилометр (17*17, шаг 2 мм)
- ЦФ – цилиндр Фарадея с 4-секционным датчиком ореола пучка

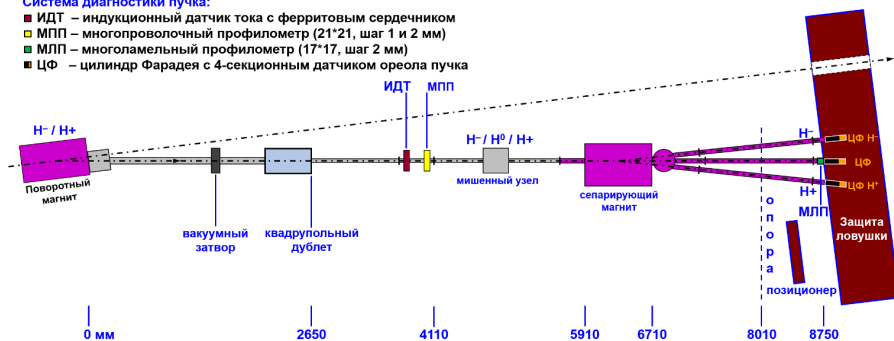


Рисунок 3.1.4 — Конфигурации стенда облучения ИЯИ РАН

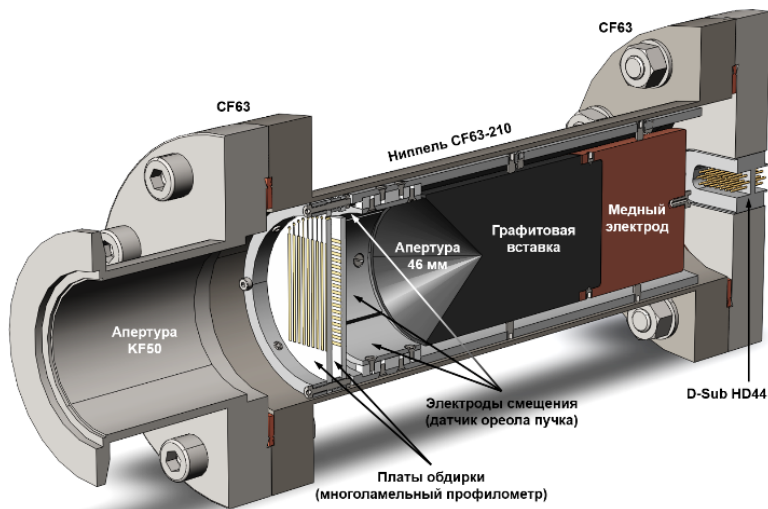


Рисунок 3.1.5 — ЦФ для произвольного зарядового состояния частиц с датчиком ореола пучка и многоламельным профилометром

гарантировать корректность токовых измерений на длинных пролетных базах стенда без использования дополнительных профилометров. Также на входе одного из цилиндров установлен многоламельный профилометр (МЛП) (Рисунок 3.1.5) на основе печатных плат из керамического ламината, выполняющий функцию перезарядной мишени для возможности регистрации тока многозарядного пучка, образующегося на стенде в некоторых режимах облучения. Пучок смешанных зарядовых состояний полностью обдирается в пластинах профилометра до протонов,

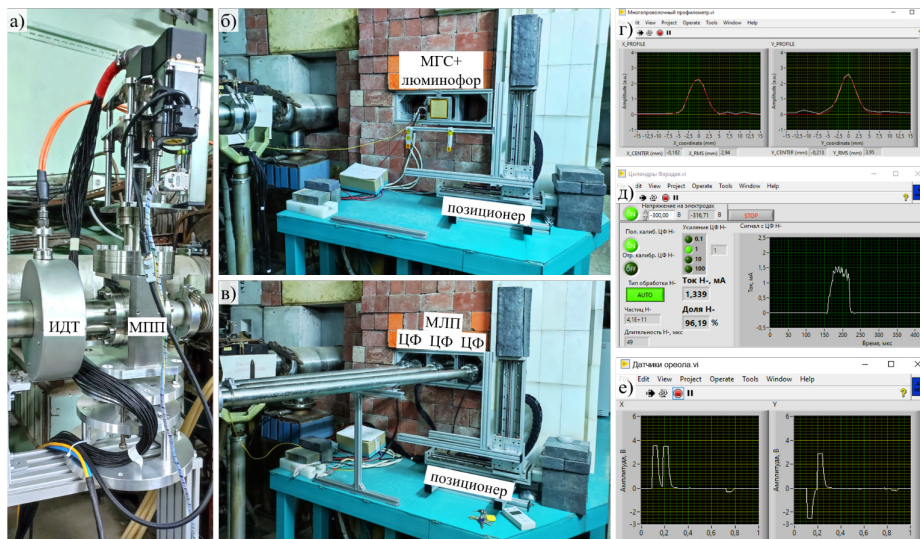


Рисунок 3.1.6 — Фотографии элементов СДП, установленных на стенде облучения: а) сборка ИДТ+МПП; б) сборка МГС + люминесцентный экран для пучков, выведенных на воздух; в) система из трех ЦФ с датчиками ореола + МЛП; г), д), е) Примеры измеренных параметров пучка Н— энергией 143 МэВ: поперечные профили, импульсный ток, наличие ореола пучка

создающих сигнальный ток ЦФ, при этом сам профилометр позволяет регистрировать профиль многозарядного пучка.

Результатом выполненных работ стало приборно-методическое обеспечение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов в широком диапазоне интенсивностей и энергий (Рисунок 3.1.6).

Разработанная система диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей, включая атомарные пучки, обладает следующими рабочими параметрами:

- рабочая импульсная интенсивность пучка: $10^7 \div 10^{13}$ ионов в импульсе;
- рабочая длительность импульса тока: $0.3 \div 200$ мкс;
- рабочая энергия пучка: $20 \div 225$ МэВ;
- пространственное разрешение измерений профиля: $1 \div 2$ мм.

В **Главе 4** описаны некоторые оригинальные системы и методы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, связанные с опытом автора в проводке высокоинтенсивных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки Ускорительного центра ИЯИ РАН. Представленные результаты могут быть использованы при разработке и создании систем диагностики для других сильноточных линейных ускорителей ионов различного назначения, в том числе для создания компактных нейтронных источников.

В частности, предложен, разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка [2].

Известно, что отклик таких датчиков возникает только на гармониках частоты следования сгустков пучка, поэтому измерения для сгруппированных пучков, обладающих микроструктурой, выполняются с использованием высокочастотных методов. Однако в случае разгруппированного пучка традиционный подход к использованию ёмкостных датчиков не работает, и задача измерения квазистационарного заряда в течение всего макроимпульса для неразрушающего контроля положения пучка в протяженных каналах транспортировки является серьезной диагностической проблемой.

Например, в ускорительном комплексе ИЯИ РАН ускоренный пучок транспортируется на расстояние около 400 м к исследовательским установкам и из-за разброса по импульсам ($\Delta p/p \approx \pm 3.5 \cdot 10^{-3}$) полностью теряет свою микроструктуру ($T_{\text{Bunch}} \approx 200 \text{ ns}$, $f_{\text{RF}} = 198.2 \text{ МГц}$).

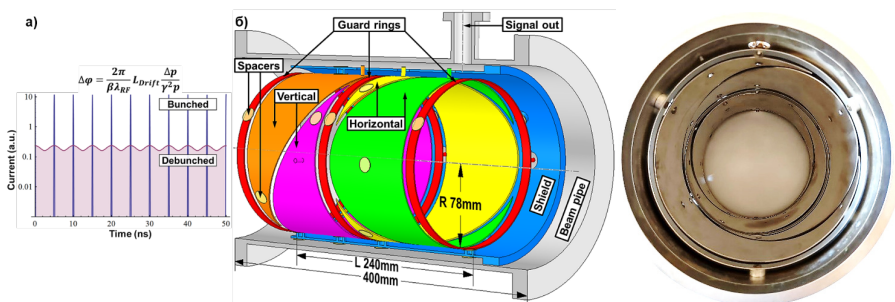


Рисунок 4.1.1 — а) Расчетная оценка разгруппировки пучка в процессе дрейфа до исследовательских установок ИЯИ РАН. б) Трехмерная модель и фотография электростатического разрезного датчика положения пучка

Кроме того, по историческим причинам апертура каналов транспортировки в исследовательском комплексе составляет ~ 180 мм, а полный размер пучка может достигать 100 мм. Таким образом, возникает задача диагностики положения широких разгруппированных пучков в пределах большой апертуры ионопровода. Для решения этой задачи был предложен и реализован метод диагностики на основе линейно-разрезных датчиков положения пучка (Р-ДПП), называемых также электростатическими пикапами (Рисунок 4.1.1).

Показано, что классические ёмкостные электростатические датчики с линейным разрезом (Р-ДПП) (Рисунок 4.1.1) могут служить в качестве многоцелевых средств диагностики разгруппированных пучков протонов, обеспечивая неразрушающие измерения положения и тока в широком диапазоне интенсивностей пучка.

Исследования, проведенные для пучка протонов в ИЯИ РАН, показывают, что при типичных параметрах пучка такие датчики позволяют измерять положение центра масс пучка с разрешением ~ 0.1 мм, что соответствует примерно 0.1% их апертуры. Поскольку отношение сигнал/шум ограничено общей ёмкостью детектора, необходимо использовать предварительный усилитель заряда, подключенный к датчику коротким кабелем. При этом калибровка датчика может быть выполнена с помощью кабеля произвольной длины, так как выходной сигнал такого усилителя не зависит от общей ёмкости детектора.

Возможность измерений тока пучка (Рисунок 4.1.2) подтверждается и количественно описывается с помощью трехмерного моделирования. Разрешающая способность измерений тока определяется шумами электроники и составляет ~ 50 мкА. Относительная погрешность измерений тока составляет менее 3% и определяется в основном нелинейностями измеряемого сигнала из-за положения и размера пучка.

Разработанная система диагностики разгруппированных пучков протонов на основе ёмкостных разрезных датчиков положения пучка обладает следующими рабочими параметрами:

- пространственное разрешение: < 130 мкм в апертуре 130 мм для тока 10 мА,
- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: $0.05 \div 50$ мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: $10 \div 200$ мкс;
- спад вершины импульса: < 0.05 %/мкс.

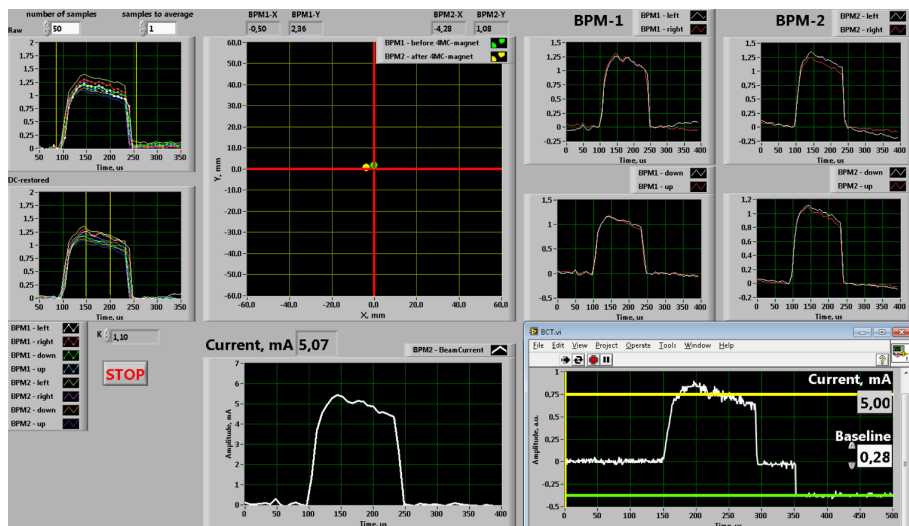


Рисунок 4.1.2 — Окно с результатами измерений положения, а также амплитуды и длительности тока пучка протонов энергией 267 МэВ, 5 мА, 150 мкс (по основанию), 50 Гц с помощью двух Р-ДПП и ИДТ

Для линейного ускорителя проекта DARIA была предложена, разработана и изготовлена так называемая система «Δ ИДТ» [15] (рисунок 4.2.4) для контроля разности измеряемых токов пучка при прохождении двух последовательно установленных индукционных датчиков тока, которая может быть использована для контроля потерь пучка с целью быстрой аварийной защиты сильноточного ускорителя.

Индукционные датчики традиционно обеспечивают эффективную диагностику амплитуды и длительности тока пучка в ускорителях. Однако использование дополнительной предусилительной и обрабатывающей электроники позволяет расширить их функциональные возможности. В частности, контроль разности токов реализован на основе сравнения интегрального заряда каждого импульса тока пучка, что повышает точность измерений в случае работы с импульсами тока сложной формы.

При работе сильноточных ускорителей необходимо учитывать, что даже одиночный сфокусированный импульс тока пучка, особенно в случае пучков с относительно низкой энергией ~5–50 МэВ, может вызвать разрушение целостности каких-либо элементов ускорительного тракта,

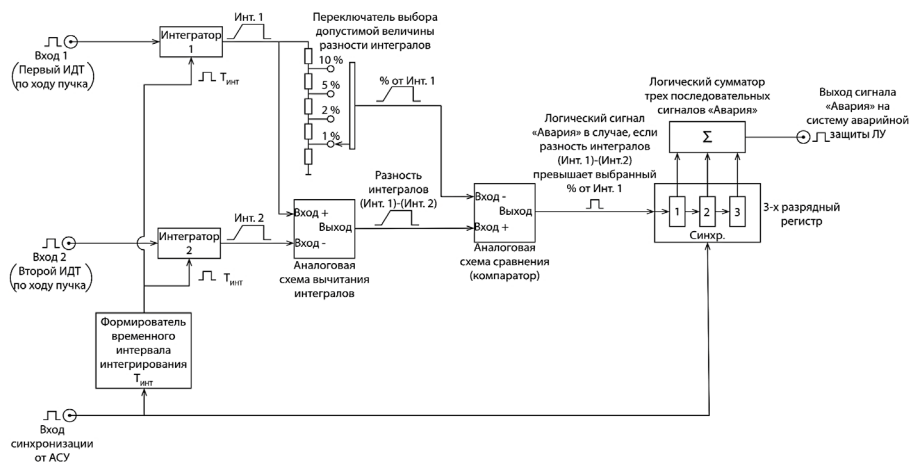


Рисунок 4.1.3 – Функциональная схема блока контроля разности токов «ΔИДТ»

в том числе и вакуумной стенки ионопровода, если воздействие оказывается точечным. При попадании такого пучка на стенку по касательной также могут происходить нагрев и последующая механическая деформация. Кроме того, в случае возникновения потерь пучка в объеме высокочастотного ускоряющего резонатора, может снижаться его электрическая прочность с потенциальным развитием мультипакторного разряда и возникновением электрических пробоев. Отдельно следует учесть, что при энергиях протонов свыше ~ 10 МэВ потери пучка приводят к паразитной непредусмотренной активации элементов ускорительного тракта. Поэтому пользователю системы предоставлено на выбор несколько дискретных значений измеряемой разницы сигналов ИДТ: от 1% для номинального режима работы до 10% в случае перестройки рабочего режима ускорителя и проведения настроечных процедур. Для предотвращения ложных срабатываний системы от различных помех формирование итогового аварийного сигнала происходит после трех последовательных срабатываний схемы сравнения на частоте следования анализируемых импульсов тока пучка.

Пример представленной системы «Δ ИДТ» успешно используется на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН в качестве одной из основных быстрых аварийных блокировок.

В частности, подобные пары индукционных датчиков были разработаны и установлены автором на выходе пучка из линейного ускорителя

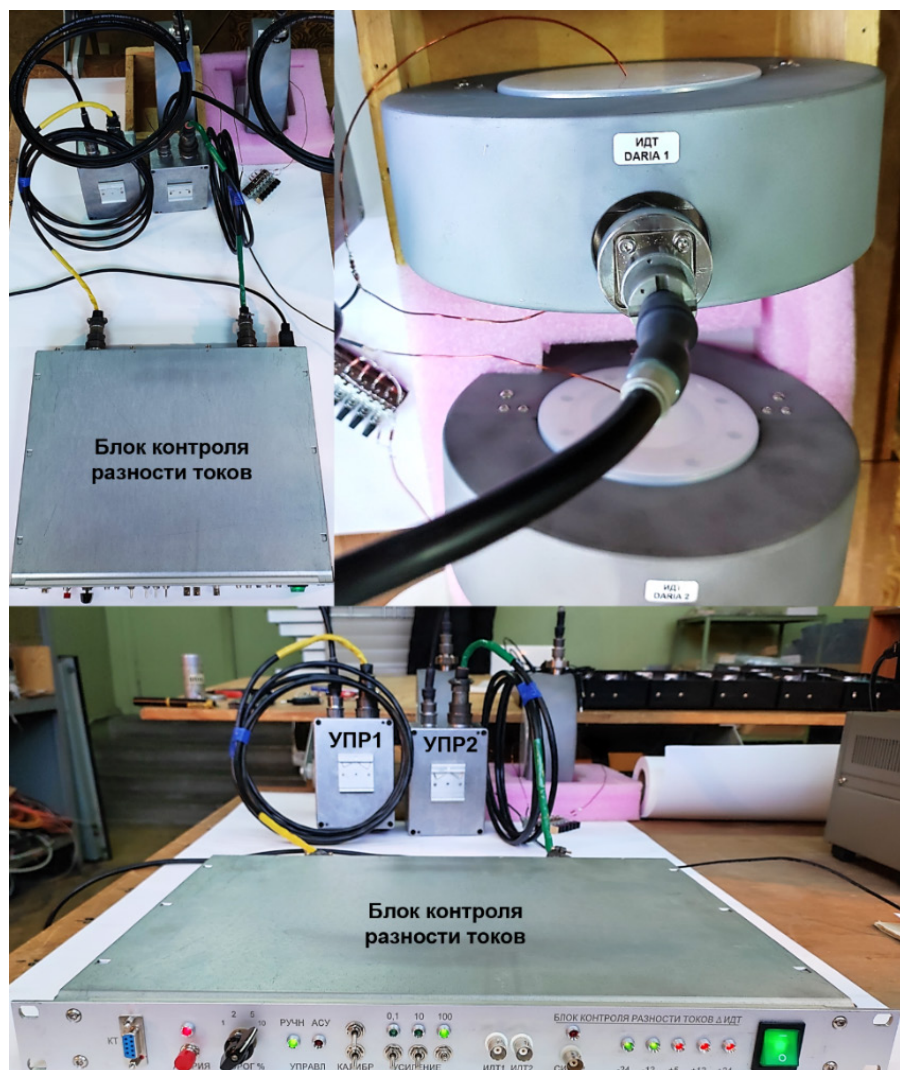


Рисунок 4.1.4 — Фотографии изготовленных ИДТ, предварительных усилителей и блока контроля разности токов, объединенных в систему диагностики пучка « Δ ИДТ»

и входах пучков в нейтронные источники для контроля интегральных потерь пучка в протяженных каналах транспортировки ускорительного центра.

Разработанная система аварийного контроля потерь пучка « Δ ИДТ» на основе индукционных датчиков тока (Рисунок 4.1.4). обладает следующими параметрами:

- дискретный контроль разницы токов пучка: 1, 2, 5, 10 %;
- диапазон измеряемой амплитуды импульсов тока: $0.1 \div 150$ мА;
- диапазон измеряемой длительности импульса тока: $1 \div 200$ мкс;
- минимальная длительность фронта импульса: 0.25 мкс;
- спад вершины импульса: < 0.02 % / мкс;
- четыре переключаемых диапазона коэффициента усиления: 0.1, 1, 10, 100.

В **Заключении** приводятся основные результаты исследования и выводы по итогам проведенных работ, а также выражаются благодарности тем, кто оказывал помощь и содействие в реализации целей и задач диссертации.

Основные результаты и выводы

В диссертации изложены результаты работ по созданию приборно-методической базы систем диагностики пучков для действующих, сооружаемых и проектируемых отечественных и зарубежных линейных резонансных ускорителей ионов и стендов облучения на их основе:

1. На основе детального анализа многочисленных взаимосвязанных физических процессов разработана физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов.
2. На основе разработанной общей физико-технической концепции создана концепция системы диагностики, а также разработана и изготовлена неразрушающая система быстрого аварийного контроля потерь пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA.
3. Разработан и экспериментально верифицирован для проведения вычислительных физических экспериментов комплекс трехмерных мультифизических моделей оборудования диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.
4. Разработаны, изготовлены и настроены различные системы и приборы базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов отечественных и зарубежных ускорительных комплексов.

Из всего многообразия существующих устройств диагностики параметров пучка для разработки были выбраны приборы, практическая реализация которых возможна с учетом имеющегося или гарантированно достижимого уровня отечественных технологий, а именно:

Измерители тока пучка:

- индукционные датчики тока на основе ферритовых сердечников,
- охлаждаемые и неохлаждаемые цилиндры Фарадея.

Измерители поперечного профиля пучка:

- двухпроводочные сканеры и многопроводочные профилометры,
- ионизационные мониторы поперечного сечения,
- флуоресцентные мониторы.

Измерители поперечного эмиттанса пучка:

- диафрагмированные и щелевые измерители.

Измерители положения и фазы:

- короткозамкнутые полосковые датчики положения.

Измерители продольной микроструктуры пучка:

- измеритель формы сгустков (фазовый анализатор).

5. Разработана и реализована комплексная система диагностики пучка ионов водорода смешанных зарядностей, включая атомарные пучки, на основе многоламельных профилометров и цилиндров Фарадея с контрольными датчиками ореола для использования на исследовательских стендах.
6. Разработана и реализована комплексная система диагностики пучков протонов, выведенных на воздух, на основе люминесцентных экранов и многоанодных газовых счетчиков для стендов протонного облучения и протонной терапии.
7. Предложена и реализована методика разработки короткозамкнутых полосковых датчиков положения пучка, объединяющая этапы трехмерного численного моделирования, оптимизации конструкции, изготовления опытного образца и калибровки в стендовых испытаниях.
8. Предложен и реализован метод неразрушающей диагностики положения и тока разгруппированных пучков протонов на основе электростатических ёмкостных линейно-разрезных датчиков положения пучка с использованием предварительных усилителей заряда для диагностики пучков в протяженных каналах транспортировки крупных ускорительных комплексов.

9. Для измерителей продольной формы сгустков, работающих на основе поперечной высокочастотной модуляции вторичных низкоэнергетических электронов, разработан и реализован метод повышения фазового разрешения измерений до уровня, ограниченного дисперсией времени вылета электронов вторичной эмиссии, а также реализован метод расширения рабочего фазового диапазона измерений до полного периода следования анализируемых сгустков.
10. По итогам проведенных исследований представлена совокупность результатов экспериментальных измерений, настройки и оптимизации параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах.

Основные результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы при проектировании линейных резонансных ускорителей ионов различного предназначения для выбора состава и структуры систем диагностики пучков, так как разработанные автором оригинальные конфигурации оборудования диагностики предназначены для широкого круга ускорителей и в совокупности фактически перекрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов по типу частиц (от протонов и отрицательных ионов водорода до многозарядных тяжелых ионов), энергиям (от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями ~ 1 ГэВ) и интенсивности, позволяя проводить необходимые измерения и на сильнооточных пучках для нейтронных источников, комплексов для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, и на пучках низкой интенсивности, например, для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры, включая пучки смешанных зарядностей и пучки, выведенные на воздух.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Two-dimensional non-destructive diagnostics for accelerators by Beam Cross section Monitor // Journal of instrumentation, 2014 JINST 9 P01011, 2014. DOI: [10.1088/1748-0221/9/01/P01011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/01/P01011)
2. **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Electrostatic pick-ups for debunched beams // Journal of instrumentation, 2014 JINST 9 T1007, 2014. DOI: [10.1088/1748-0221/9/10/T10007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/T10007)
3. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Chermoshentsev D. Bunch Shape Monitors for modern ion linacs // Journal of instrumentation, 2017 JINST 12 P12014, 2017. DOI: [10.1088/1748-0221/12/12/P12014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/P12014)
4. Belov A.S., Chermoshentsev D.A., **Gavrilov S.A.**, Frolov O.T., Nechaeva L.P., Nikulin E.S. and Zubets V.N. High responsivity secondary ion energy analyzer // Journal of instrumentation, 2018 JINST 13 T05001, 2018. (Автору принадлежат результаты разработки и анализа численной физической модели детектора). DOI: [10.1088/1748-0221/13/05/T05001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/T05001)
5. **Gavrilov S.A.**, Latysheva L.N., Lebedev S. G., Sobolevsky N. M. and Feschenko A. V. Stand for studying the effect of proton irradiation on integrated circuits: estimation of particle fluxes, activation and dose rate // Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques, Vol. 12, № 5, pp. 1041–1046, 2018. DOI: [10.1134/S1027451018050257](https://doi.org/10.1134/S1027451018050257)
6. Belov A.S., Chermoshentsev D.A., **Gavrilov S.A.**, Frolov O.T., Nechaeva L.P., Nikulin E.S. and Zubets V.N. A secondary ion energy analyzer for measuring the degree of compensation of the ion beam space charge // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 62, № 5, pp. 609–614, 2019. (Автору принадлежат результаты разработки и анализа численной физической модели детектора). DOI: [10.1134/S002044121905004X](https://doi.org/10.1134/S002044121905004X)
7. Melnikov A., **Gavrilov S.** Operation experience of ionization-proportional chamber for low-current beam measurements at INR RAS proton linac // Journal of instrumentation, 2020 JINST 15 P09005, 2020. DOI: [10.1088/1748-0221/15/09/P09005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/P09005)
8. Titov A.I., Bragin S.E., Volodkevich O.M., **Gavrilov S.A.** Beam transverse phase space tomography at the high-intensity linear accelerator of hydrogen ions // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 66, № 1, pp. 1–18, 2023. (Автору принадлежат результаты разработки и настройки оборудования диагностики пучков, использованного в проведенных исследованиях.) DOI: [10.1134/S0020441222060185](https://doi.org/10.1134/S0020441222060185)
9. **Gavrilov S.A.**, Titov A.I. A concept of a beam instrumentation system for the high-intensity DARIA proton linac // Journal of surface investiga-

- tion: x-ray, synchrotron and neutron techniques, Vol. 17, № 4, pp. 782–791, 2023. DOI: [10.1134/S1027451023040055](https://doi.org/10.1134/S1027451023040055)
10. **Гаврилов С.А.**, Калинин Ю.Ж., Титов А.И. Широкоапертурный цилиндр Фарадея для высокоинтенсивного линейного ускорителя протонов проекта DARIA // Сибирский физический журнал, Т. 18, №4, с. 55–61, 2023. DOI: [10.25205/2541-9447-2023-18-4-54-61](https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-4-54-61)
 11. Kulevoy T.V., Kopachev G.N., Sitnikov A.L., Semennikov A.I., Skachkov V.I., Kilmetova I.V., Kuibeda R.P., Kozlov A.V., Khabibullina E.R., Malishev A.A., Andreev S.N., Grebeshkov A.O., Grigoriev S.V., Kovalenko N.A., Bulavin M.V., Mukhin K.A., Moskvina E.V., Pavlov K.A., Grigoryeva N.A., Skalyga V.A., Izotov I.V., Goikhman A.Yu., Kravtsov E.A. and **Gavrilov S.A.** The DARIA compact neutron source project // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 1, pp. S16–S26, 2024. (Автору принадлежит раздел 2.3.4 «Beam diagnostics», описывающий концепцию и отдельные устройства системы диагностики пучка.) DOI: [10.1134/S0020441224701239](https://doi.org/10.1134/S0020441224701239)
 12. Titov A.I., **Gavrilov S.A.**, Polonik I. I. Multipurpose software for acquisition and processing of optical signals from beam profile monitors at the INR linac // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 1, pp. S70–S76, 2024. (Автору принадлежат результаты разработки и настройки оборудования диагностики пучков, использованного в проведенных исследованиях.) DOI: [10.1134/S0020441224701343](https://doi.org/10.1134/S0020441224701343)
 13. **Gavrilov S.A.**, Gaidash V.A., Titov A.I. Beam diagnostics for the irradiation facility at the hydrogen ion linac of the Institute for Nuclear Research // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S161–S166, 2024. DOI: [10.1134/S0020441224701744](https://doi.org/10.1134/S0020441224701744)
 14. **Gavrilov S.A.**, Kalinin Yu.G., Polonik I.I., Titov A.I. A beam-induced fluorescence monitor at the low-energy beam transport line of the proton linac at the Institute for Nuclear Research // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S167–S173, 2024. DOI: [10.1134/S0020441224701756](https://doi.org/10.1134/S0020441224701756)
 15. **Gavrilov S.A.**, Gaidash V.A., Titov A.I. An emergency beam loss monitoring system based on beam current transformers for the linear accelerator of the DARIA project // Journal of surface investigation: x-ray, synchrotron and neutron techniques, Vol. 18, № 6, pp. 1623–1628, 2024. DOI: [10.1134/S1027451024701623](https://doi.org/10.1134/S1027451024701623)
 16. Amosova V., **Gavrilov S.** Features of simulation, design and development of stripline beam position monitors for ion linear accelerators // Journal of instrumentation, 2025 JINST 15 P09005, 2025. DOI: [10.1088/1748-0221/20/06/P06028](https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/06/P06028)

В трудах международных конференций:

17. **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Electrostatic pick-ups for debunched beams at INR linac // Proceedings of RuPAC14, pp. 420–422, 2014.
18. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Reinhardt-Nickoulin P. INR RAS instrumentation for bunch shape and beam cross-section monitoring // Proceedings of RuPAC16, pp. 204–206, 2016.
19. **Gavrilov S.**, Gaydash V., Gorbunov V., Kalinin Y., Kiselev Y., Reinhardt-Nickoulin P., Vasilyev I. Beam diagnostics and instrumentation upgrade for multipurpose research complex of INR RAS // Proceedings of RuPAC16, pp. 667–669, 2016.
20. Aseev V., Bragin S., **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Volodkevich O. Beam simulation and measurements at beam line to RADEX experimental area of INR linac // Proceedings of RuPAC16, pp. 250–252, 2016.
21. Chermoshentsev D., Feschenko A., **Gavrilov S.** Electrodynamic characteristics of RF-deflector for bunch shape monitor // Proceedings of RuPAC16, pp. 659–661, 2016.
22. Churaev M., **Gavrilov S.** Thermal loads of wire-based beam instrumentation at ion linacs // Proceedings of RuPAC16, pp. 670–672, 2016.
23. Feschenko A., **Gavrilov S.** Methods for bunch shape monitor phase resolution improvement // Proceedings of LINAC16, pp. 408–410, 2016.
24. **Gavrilov S.**, Feschenko A. Design and development of Bunch shape monitor for FRIB MSU // Proceedings of IBIC17, pp. 179–181, 2017.
25. **Gavrilov S.**, Feschenko A. Bunch shape monitors for modern ion linacs // Proceedings of IBIC17, pp. 176–178, 2017.
26. **Gavrilov S.**, Reinhardt-Nickoulin P., Titov A. 2D non-destructive transverse diagnostics by Beam cross-section monitor // Proceedings of IBIC17, pp. 393–395, 2017.
27. Sieber T., Forck P., Barth W., Dziuba F., Feschenko A., **Gavrilov S.**, Heilmann M., Kürzeder T., Miski-Oglu M., Reeg H., Reiter A., Yaramyshev S. Bunch shape measurements at the GSI cw-linac prototype // Proceedings of IPAC18, pp. 2091–2094, 2018.
28. **Gavrilov S.**, Melnikov A., Titov A. Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac // Proceedings of IBIC18, pp. 40–42, 2018.
29. **Gavrilov S.**, Feschenko A., Chermoshentsev D. Design, fabrication and laboratory tests of Bunch Shape Monitors for ESS linac // Proceedings of IBIC18, pp. 407–409, 2018.
30. **Tan J.**, Bellodi G., Feschenko A., Gavrilov S. Results from the CERN LINAC4 longitudinal bunch shape monitor // Proceedings of IBIC18, pp. 415–419, 2018.

31. **Gavrilov S.**, Bragin S., Feschenko A., Gaidash V., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Lebedev S., Melnikov A., Serov V., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P., Tsibryaev S. Proton irradiation facility at INR RAS linac // Proceedings of RuPAC18, pp. 142–144, 2018.
32. Melnikov A., **Gavrilov S.** Multianode gas counter for low intensity beam diagnostics at the INR linac // Proceedings of RuPAC18, pp. 492–494, 2018.
33. Titov A., Gavrilov S. Luminescent diagnostics of low intensity proton beams at INR RAS linac // Proceedings of RuPAC18, pp. 489–491, 2018.
34. Chermoshentsev D., Feschenko A., **Gavrilov S.** Influence of mechanical vibrations on the phase resolution of bunch shape monitor // Proceedings of RuPAC18, pp. 477–479, 2018.
35. Bragin S., Feschenko A., **Gavrilov S.**, Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Latysheva L., Lebedev S. G., Melnikov A., Serov V., Sobolevskiy N., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P. and Tsibryaev S. Development of Proton Irradiation Facility at the INR Linac // Journal of Physics: Conference Series, 1238 012066, 2019.
36. Melnikov A., **Gavrilov S.** Modernization and operation of ionization-proportional gas counter at INR RAS proton linac // Proceedings of IBIC20, pp. 103–106, 2020.
37. Titov A., **Gavrilov S.** Transverse phase portrait tomography of proton beams at INR RAS linac // Proceedings of IBIC20, pp. 193–196, 2020.
38. **Gavrilov S.A.**, Feschenko A. V., Gaidash V.A. Development and implementation of bunch shape instrumentation for ion linacs // Proceedings of RuPAC21, pp. 1–6, 2021.
39. Belov A.S., Frolov O.T., **Gavrilov S.A.**, Nechaeva L.P., Turbabin A.V., Zubets V.N. Study of space charge compensation process of a 400 KeV pulsed hydrogen ion beam // Proceedings of RuPAC21, pp. 313–315, 2021.
40. Titov A. I., **Gavrilov S. A.**, Bragin S. E., Volodkevich O. M. Enhancement of transverse beam phase space analysis by tomography method at INR linac // Proceedings of RuPAC21, pp. 433–435, 2021.
41. **Gavrilov S. A.**, Polonik I. I., Titov A. I. Features of non-destructive beam instrumentation at the INR RAS high-intensity hydrogen ions linac // Proceedings of IBIC24, pp. 215–218, 2024.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему учителю А.В. Фещенко за научно-технические консультации и многолетнюю всестороннюю поддержку.

Большинство работ в рамках диссертации были выполнены в соавторстве с коллегами из ИЯИ РАН: В.А. Гайдашом и А.И. Титовым, которым автор искренне благодарен, поскольку без их работ в области электроники и программного обеспечения достижение заявленных целей диссертации было бы невозможно.

Кроме того, автор считает своей приятной обязанностью поблагодарить: Д.А. Чермошнцева, А.А. Мельникова, В.Е. Амосову и И.И. Полоника, чьим научным руководителем в МФТИ он являлся в течение разных лет, за плодотворное сотрудничество, результаты которого частично отражены в тексте диссертации.

Автор благодарит В.В. Парамонова не только за регулярные научные консультации в ходе проведенных исследований, но и за инициирование и поддержку работ по подготовке и оформлению диссертации.

Отдельно автор благодарит Л.В. Кравчука за многолетнюю поддержку и огромные усилия, направленные на распространение и внедрение достигнутых результатов работы, а также выражает благодарность коллегам из отечественных и зарубежных ускорительных центров за их решение использовать разработанные системы, приборы и методы диагностики пучков в своих организациях и помощь в практической реализации этих задач: Н.В. Завьялова, А.М. Опекунова и П.Н. Цедрика из ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, Т.В. Кулевого из НИЦ «Курчатовский институт», С.М. Полозова из НИЯУ МИФИ, А.В. Бутенко из ОИЯИ, P. Forck и T. Sieber из FAIR-GSI (Германия), U. Raich и J. Tan из CERN (Швейцария), I. Dolenc Kittelmann и V. Grishin из ESS (Швеция), F. Doucet и A. Tanquintic из MYRRHA (Бельгия), S. Lidia из FRIB MSU (США).

Также автор благодарит всех сотрудников Отдела ускорительного комплекса ИЯИ РАН за полезные обсуждения и техническую поддержку в ходе всего многолетнего цикла выполнения представленных работ.

Искреннюю благодарность автор выражает своей супруге Н.С. Гавриловой за понимание, поддержку, терпение и свободное время для подготовки диссертации.

Научное издание
Гаврилов Сергей Александрович
Системы, приборы и методы диагностики пучков
для линейных ускорителей ионов
АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Принято в печать 13.11.2025
Ф-т 60х84/16 Уч.-изд.л. 2,3 Зак. № 040/25 Тираж 110 экз. Бесплатно

Печать цифровая
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
Издательский отдел
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а