



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**



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

(НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ)

площадь Науки, д. 1, г. Протвино,
Московская область, 142281
тел.: (4967) 71-36-23, факс: (4967) 74-28-24

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения
«Институт физики высоких энергий
имени А. А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ)

_____ Песенко В.Н.

02 февраля 2026 г.

02.02.2026 № 700-708-13/108

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения

«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

на диссертацию Гаврилова Сергея Александровича

«Системы, приборы и методы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы диссертации

Диссертация Гаврилова Сергея Александровича посвящена созданию приборно-методической базы систем диагностики пучков для действующих, сооружаемых и проектируемых линейных резонансных ускорителей ионов. Актуальность темы исследований автора определяется тем, что в России, на данный момент, полностью отсутствуют коммерчески доступные устройства диагностики пучков ускоренных заряженных частиц. Сооружение новых отечественных ускорительных комплексов фактически подразумевает либо покупку подобного оборудования у зарубежных производителей, либо их индивидуальную разработку для каждого

отдельного проекта. Это может потребовать нескольких лет дополнительного времени, так как в приборах диагностики пучка, как правило, задействован широкий набор разнообразных и зачастую взаимосвязанных физических процессов, требующих детального анализа. В особой степени это относится к интенсивным пучкам современных ускорителей, когда эксплуатация отдельных устройств диагностики ведется в режиме работы, близком к критическому режиму. В нем наступает либо существенное искажение регистрируемого сигнала, либо разрушение детектирующей части датчика.

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

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы на 13 страницах и списка сокращений и условных обозначений на 1 странице. Общий объем диссертации 350 страниц. Библиография включает 148 наименований на 23 страницах. В работе приведено 283 иллюстрации и 16 таблиц. Список авторских публикаций насчитывает 41 позицию.

Во Введении содержится краткий обзор современного состояния дел и тенденций в области создания средств диагностики пучка в линейных ускорителях ионов. Таким образом, представлен контекст, в котором решались задачи диссертации. Сформулирована цель работы, обоснована актуальность и практическая значимость проблемы создания средств диагностики ионных пучков в линейных ускорителях. Введение содержит описание новизны и практической значимости работы. Обоснован личный вклад автора. Приведены данные об апробации работы и о публикации основных результатов. Во многом, введение повторяет основные положения автореферата диссертации.

В Главе 1 сформулированы задачи диагностики пучков в зависимости от типа, назначения и характеристик линейных ускорителей ионов. Определены типичные значения основных параметров пучков. Показан характерный набор диагностических устройств, приведены описания их физических принципов работы и основных технических характеристик и примеры практической реализации. Сформирована согласованная физико-техническая концепция построения систем базовой диагностики пучков, включающей в себя

1. (Измерения тока) индукционный датчик тока и цилиндр Фарадея.
2. (Разрушающие измерения поперечного профиля) 2-проводочный сканер, многопроводочный профилометр, люминесцентный экран.
3. (Неразрушающие измерения поперечного профиля) ионизационный монитор поперечного сечения пучка, профилометр на основе свечения остаточного газа.

4. (Измерения поперечного фазового объема) электростатический диафрагмированный и щелевой измерители.
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 использована для создания системы диагностики пучка для сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA.

Особого внимания заслужили такие устройства диагностики, как ИМПС (ионизационный монитор поперечного сечения), ФЛУМ (флуоресцентный монитор). ИФС (измеритель формы сгустков) и другие приборы, разработанные и впервые опробованные на линейном ускорителе ИЯИ РАН.

Глава 2 посвящена созданию систем базовой диагностики в сильноточном ускорителе ИЯИ РАН и многочисленным работам, в которых участвовал автор диссертации, над отечественными и зарубежными ускорительными установками. Объемы работ во второй главе соизмеримы (131 страница текста против 121 в первой главе). Работа выполнена автором в период с 2014 года по настоящее время. Исследования продолжены в следующих актуальных направлениях:

1. (Измерители тока пучка) индукционные датчики на основе ферритовых сердечников, охлаждаемые и неохлаждаемые цилиндры Фарадея.
2. (Измерители поперечного профиля пучка) 2-проволочные сканеры, многопроволочные профилометры, ионизационные мониторы поперечного сечения, флуоресцентные мониторы.
3. (Измерители поперечного фазового объема пучка) диафрагмированные и щелевые измерители.
4. (Измерители положения и фазы) короткозамкнутые полосковые датчики положения пучка.
5. (Измерители продольной микроструктуры пучка) измеритель формы сгустков (фазовый анализатор).

В Главе 3 представлены исследования и разработки оригинальных систем диагностики ионных пучков для стендов облучения. Примером являлись установки Ускорительного центра нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН. Результатом выполненных работ стало приборно-методическое обеспечение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов во всём диапазоне энергий и интенсивностей пучков, подаваемых на установки. При этом

отличительной чертой разработанных систем диагностики на основе мульти-анодных газовых счётчиков является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях, включая смесь зарядовых состояний, а также атомарные пучки водорода.

В Главе 4 описаны 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. В частности, предложен, разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка.

Для линейного ускорителя проекта DARIA была предложена, разработана и изготовлена система контроля разности измеряемых токов пучка при прохождении двух последовательно установленных индукционных датчиков тока. Система использовалась в качестве быстрой аварийной защиты сильноточного ускорителя.

В Заключение перечислены основные результаты исследований в рамках диссертации и сформулированы выводы по итогам проведенных работ.

Основные положения, вынесенные 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.

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. Результаты использованы как для практической разработки нового оборудования для диагностики пучка, так и для настройки параметров пучков в существующих ускорителях.

Научная новизна результатов работы

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

В основе материалов диссертации лежат результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведенных автором. Эти работы были направлены как для

достижения целей научной программы ИЯИ РАН, так и для выполнения обязательств в рамках соглашений с другими отечественными и зарубежными ускорительными центрами. Эти работы имели своей целью разработку, изготовление и поставку систем и отдельных устройств диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, действующих или сооружаемых в этих организациях. Основные результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы при проектировании линейных резонансных ускорителей ионов различного предназначения. Они определяют структуру систем диагностики пучков, так как разработанные автором оригинальные конфигурации оборудования диагностики предназначены для широкого круга ускорителей.

Личный вклад автора

Все результаты диссертации получены автором лично, либо в соавторстве. В последнем случае вклад автора как главного разработчика используемого диагностического оборудования и непосредственного руководителя проводимых работ был определяющим. Замечания о конкретном вкладе автора при необходимости указаны в списке литературы.

Замечания, вопросы и пожелания по диссертации

Текст диссертации логично структурирован, тщательно оформлен и изложен лаконичным научным языком. Подход автора к решаемой задаче прагматичен и последователен. Расчётные, решения, методические подходы и рекомендации хорошо обоснованы. Однако к тексту диссертации есть несколько замечаний:

1. На странице 337 в «Списке сокращений и условных обозначений» ДПП («датчик положения пучка») логично поставить после ВЧ («высокочастотный»). Тогда не было бы нарушено упорядочение терминов в алфавитном порядке по первой букве, используемое всюду по списку.
2. На странице 27 после формулы (1.2.3) не нужен абзацный отступ перед далее следующим за формулой предложением. Это единственное такое место на 350 страниц текста диссертации.
3. В формуле (1.3.3) на странице 77 ошибочно оставлена габаритная рамка вокруг уравнения.

Указанные замечания не снижают ценность представленных результатов. Они никак и не влияют на общую высокую оценку работы автора.

Заключение

Диссертация С. А. Гаврилова является законченной научной работой, оригинальные результаты которой в достаточной степени изложены в 41 научной работе, 16 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Диссертация содержит 283 иллюстрации.

Работа прошла достаточную апробацию на профильных научно-технических конференциях и совещаниях по тематике линейных ускорителей заряженных частиц и их применении.

Достоверность представленных результатов и корректность методов исследований подтверждена экспериментально. Они использованы в разработках новых систем, приборов и методов диагностики пучков для линейных ускорителей ионов в отечественных и зарубежных ускорительных комплексах.

Содержание диссертации и ее основные положения, вынесенные на защиту, определяют персональный вклад автора в опубликованные вместе с соавторами работы.

Содержание диссертации полностью и точно отражено в её автореферате.

Материал диссертации интересен и убедителен с точки зрения положительной аттестации автора. Он полностью владеет предметом — системами, приборами и методами диагностики пучков для линейных ускорителей ионов,

Результаты диссертации широко использованы на линейном ускорителе ИЯИ РАН (Троицк/Москва). Они нашли применение также для работ по договорам с российскими организациями РФЯЦ–ВНИИЭФ (Саров), НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), НИЯУ «МИФИ» (Москва) и ОИЯИ (Дубна). Кроме того, работы проводились и с зарубежными ускорительными центрами CERN (Швейцария), FAIR–GSI (Германия), ESS (Швеция), MYRRHA (Бельгия), FRIB MSU (США). Все это свидетельствуют о востребованности результатов автора.

Текст диссертации логично структурирован, тщательно оформлен и изложен лаконичным научным языком. Каждая из четырех глав основного текста завершается разделом «Выводы Главы X», что способствует лучшему пониманию текста.

Диссертация С. А. Гаврилова полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, **Гаврилов Сергей Александрович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Результаты диссертации С. А. Гаврилова были представлены, обсуждены и одобрены на научном семинаре Отделения ускорительного комплекса НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 30 января 2026 г.

Отзыв составил:

Иванов Сергей Владиславович, академик РАН, доктор физико-математических наук по специальности 1.3.18 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника», научный руководитель НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ по ускорительным технологиям.

_____ **С. В. Иванов**

30 января 2026 г.

Список основных публикаций работников организации по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. S.V. Ivanov. Attaining an Extended Flat Irradiation Field with a Carbon Beam from the U-70 Synchrotron. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2025, Vol. 22, No. 4, pp. 938–944.
DOI: 10.1134/S1547477125700815
2. S.V. Ivanov, A.I. Andreianov, A.A. Bragin, A.P. Soldatov, and N.E. Tyurin. Development Projects for the Hadron Accelerator Complex at the NRC Kurchatov Institute—IHEP. *Phys. Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 207–211.
DOI: 10.1134/S1547477124700018
3. Ю.М. Антипов, Г.И. Бритвич, С.В. Иванов, В.А. Калинин, О.П. Лебедев, Э.А. Людмирский, А.В. Максимов, А.В. Минченко, А.П. Солдатов, Г.В. Хитев. Медленный вывод пучка ядер углерода из синхротрона У-70. *Приборы и техника эксперимента*, 2021, №3, с. 5–14.
DOI: 10.31857/S0032816221020117
4. М.В. Ковальчук, Н.Е. Тюрин, С.В. Иванов, А.П. Солдатов. Импульсный нейтронный источник на основе испарительно-скалывающей реакции на базе протонного синхротрона У-1.5. *Кристаллография*, 2022, том 67, №5, с. 795–800.
DOI: 10.31857/S0023476122050101
5. V.I. Garkusha, S.V. Ivanov, V.A. Kalinin, A.V. Maksimov, A.M. Markin, F.N. Novoskol'tsev, V.A. Pikalov, A.P. Soldatov, and R.Yu. Sinyukov. Status of Work on Creating Carbon Ion Beam Channels for Radiobiological and Preclinical Studies at the U-70 Accelerator Complex. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S236–S241.
DOI: 10.1134/S0020441224701768