

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Корчуганова Владимира Николаевича на диссертацию  
Гаврилова Сергея Александровича

«Системы, приборы и методы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов»,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по  
специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

### **Актуальность темы**

При настройке и эксплуатации ускорителей заряженных частиц решающую роль играют системы контроля и диагностики пучков, позволяющие обеспечить работу ускорителей с требуемыми параметрами. Такие системы контроля и диагностики включают как специализированное единичное оборудование для редких и сложных измерений, так и оборудование базовой системы диагностики для проведения типовых измерений основных параметров пучка. Такое оборудование необходимо в виде готовых отдельных устройств или систем, оснащенных специализированной электроникой, системой автоматизированного управления и необходимым программным обеспечением.

*Исследования и разработки приборов и методов контроля, диагностики пучков заряженных частиц для российских ускорительных комплексов являются актуальной задачей физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.*

**Цель, научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций не вызывают сомнений после ознакомления с материалами диссертации.**

Диссертационная работа С.А. Гаврилова посвящена созданию приборно-методической базы систем диагностики пучков для сооружаемых и проектируемых линейных резонансных ускорителей ионов на базе российских технологий, для чего решается три взаимосвязанные задачи:

- разработка принципов построения систем диагностики пучков в линейных ускорителях ионов, обоснование конфигурации отдельных приборов, входящих в систему;
- разработка и изготовление универсальных конфигураций оборудования базовой диагностики пучков в линейных ускорителях ионов;
- экспериментальные исследования параметров пучков на линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах. Разработка и реализация методик сбора и обработки диагностических данных.

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 второй эмиссии, а также реализован метод расширения рабочего фазового диапазона измерений до полного периода следования анализируемых сгустков.

### **Практическая ценность результатов**

В основе материалов диссертации лежат результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по изготовлению отдельных устройств/приборов диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, выполненных в ИЯИ РАН по договорам поставки для ряда отечественных и зарубежных ускорительных центров.

Результаты работ применены для модернизации системы диагностики пучков сильноточного линейного ускорителя ионов водорода в ИЯИ РАН, благодаря чему обеспечено получение пучков с требуемыми параметрами.

*На базе собственных оригинальных технологий, впервые в России, создан и апробирован универсальный набор диагностического оборудования, пригодный для оснащения любых существующих и строящихся линейных ускорителей ионов.*

### **Апробация работы и публикации**

Всего по теме диссертации опубликована 41 работа. Основные результаты диссертации изложены в 16 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, а также в 25 работах, опубликованных в трудах международных конференций за период 2014-2024 г.г., индексируемых в международной базе цитирования Scopus.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений условных обозначений и списка литературы, содержащего 148 наименований, включая 41 работу автора. Общий объем диссертации: 350 страниц, включая 283 рисунка и 16 таблиц.

## **Общая характеристика и содержание работы**

**Во введении** кратко обоснована актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, сформулированы основные цели работы, а также, в сжатой форме, изложено содержание отдельных глав.

**Первая глава** посвящена физико-технической концепции построения систем базовой диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.

В главе 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. Рассмотрены физические принципы работы, конструкции и точности специализированных приборов для измерения отдельных параметров пучков линейных резонансных ускорителей. Как правило, приводятся, также, экономические обоснования использования отдельных приборов в наборе диагностического оборудования ЛУ. В совокупности, данная энциклопедически полная информация образует согласованную физико-техническую концепцию построения систем базовой диагностики пучков для линейных резонансных ускорителей ионов.

Представленная физико-техническая концепция была успешно применена для составления стационарной системы диагностики пучка сильноточного линейного ускорителя протонов проекта DARIA – компактного источника нейтронов, разрабатываемого на основе линейного ускорителя (13 МэВ, импульсный ток 100 мА, длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 100 Гц).

**Вторая глава** посвящена разработке, изготовлению и настройке оригинального оборудования базовой системы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов.

В главе описаны результаты работ в рамках нескольких договоров (ЛУ РФЯЦ-ВНИИЭФ, ЛУ DARIA, ЛУ ИЯИ РАН, НИЯУ МИФИ) на поставку диагностических устройств и систем для линейных ускорителей ионов. *Результатом выполненных работ стали разработанные автором оригинальные конфигурации диагностического оборудования, которые по своим характеристикам перекрывают весь диапазон параметров пучков в существующих и проектируемых линейных ускорителях ионов*

по типу частиц, энергиям и интенсивностям. Такие конфигурации позволяют проводить необходимые диагностические измерения как на сильноточных пучках для использования в нейтронных источниках, комплексах для наработки медицинских изотопов или протонной флэш-терапии, так и на пучках низкой интенсивности для конвенциональной протонной терапии или стендов облучения предназначенных для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры.

**В Главе 3** описаны процессы разработки, изготовления и настройки оригинальных систем диагностики ионных пучков для стендов облучения «Ускорительного центра нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины», созданного на базе ЛУ протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН. *Результатом выполненных работ стало приборно-методическое обеспечение научных и прикладных исследований по облучению объектов пучками ионов в широком диапазоне интенсивностей и энергий.*

**В Главе 4** описаны две оригинальные системы диагностики пучков для линейных ускорителей ионов, связанные с опытом автора в проведке высокоинтенсивных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки Ускорительного центра ИЯИ РАН:

- 1) Предложен, разработан и реализован метод неразрушающей диагностики положения разгруппированных пучков протонов в протяженных каналах транспортировки на основе ёмкостных датчиков положения пучка.
- 2) Предложена, разработана и изготовлена так называемая система «Δ ИДТ», основанная на контроле разности измеряемых токов пучка при прохождении двух последовательно установленных индукционных датчиков тока для контроля потерь пучка с целью быстрой аварийной защиты сильноточного линейного ускорителя проекта DARIA.

*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 заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту. Их суть изложена выше в разделах «Актуальность...», «Новизна...», «Практическая ценность...».

### **Оценка содержания диссертации, её завершенность**

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.

Все представленные в работе результаты диссертации экспериментально подтверждены на действующих отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов.

Основные результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы при проектировании линейных резонансных ускорителей ионов различного предназначения при выборе состава и структуры систем диагностики пучков. В совокупности, они 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), интенсивности и энергиям от низкоэнергетических каналов транспортировки с энергиями пучка десятки кэВ до высокоэнергетичных участков на выходе современных ускорителей с энергиями  $\sim 1$  ГэВ.

Диссертация Гаврилова С.А. является редким в отечественной научно-технической литературе трудом, посвященным не только физико-техническому обоснованию выбора современного диагностического оборудования на основе мирового и собственного опыта автора, но и технологическим тонкостям при его разработке и создании.

По широте изложения и большому количеству иллюстрированного экспериментального материала диссертация С.А. Гаврилова является настоящим учебником для физиков-ускорительщиков, участвующих в проектах настоящих и будущих линейных ускорителей ионов и оборудования для пучковых измерений.

### **Личный вклад соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации**

Неоспорим личный вклад С. А. Гаврилова в обоснование и создание диагностического оборудования, описанного в диссертации. Им лично были предложены и в значительной степени реализованы многие ключевые решения, связанные с созданием устройств диагностики ионных пучков, проведены экспериментальные исследования параметров пучков на отечественных и зарубежных линейных ускорителях ионов. Более того, 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.

### **Замечания к тексту диссертации:**

1. Глава 1. Первую главу можно было существенно сократить. Например, чрезмерно длинный текст на стр. 26-36 посвящен вполне известным физическим принципам работы и типичным характеристикам т.н. индукционных датчиков тока, описанию их технических и технологических деталей, а также рекламе фирмы Bergoz. Примером избыточной длины является текст на стр. 83-99, посвященный

методикам измерения поперечного эмиттанса. Он напоминает пошаговую инструкцию для пользователя или разработчика.

2. Приведенные в диссертации формулы для вычисления углового разрешения и коэффициента прохождения для разных моделей электростатического измерителя эмиттанса – Таблица 1.4.1, стр. 89 – на наш взгляд не являются необходимым справочным материалом.
3. Глава 1, стр. 104. Выражение: «измеряемое напряжение пропорционально производной тока пучка по времени и площади электрода, но не зависит от длины электрода вдоль пучка». Тогда как из выражения 1.5.3 следует, что зависимость от длины остается через площадь «A»?
4. Стр. 113. Правильная запись для выражения (1.5.7) следующая: « $\varphi = \arctg\left(\frac{I}{Q}\right)$ ».
5. Глава 2, стр. 176. «При фиксированной энергии и частоте следования макроимпульсов пучка температура проволоки определяется количеством прошедших через неё частиц и пропорциональна коэффициенту:

$$K = \left( \frac{I_{pulse}}{Q} \cdot \frac{\tau_{pulse}}{\sigma_x \sigma_y} \right)^a \quad (2.2.1)$$

По нашему мнению, «эмпирическое» выражение 2.2.1 должно быть безразмерным и иметь следующий вид  $K = \left( \frac{I_{pulse} \cdot \tau_{pulse}}{Q} \frac{d}{\sqrt{2} \sigma_y} \right)^a$  при измерениях профиля пучка в направлении «у». Кроме того, указанный без обоснования в тексте диапазон изменения параметра  $a$ , принимающего значения  $0.3 \div 0.6$  в зависимости от энергии, допускает существенный произвол при согласовании с экспериментальными данными.

6. Глава 2, стр. 179. Правильно писать: «при среднеквадратичном размере пучка 1 мм и диаметре проволочки 100 мкм  $p = 0.07$ », вместо  $p = 0.04$ .
7. Описание разработанных измерительных приборов в Главе 2 значительно повторяет тексты Главы 1 и зачастую сводится к перечню параметров оборудования.

### Опечатки:

1. Стр. 29: «Если возбуждающий импульс представляет собой ступенчатую функцию, то фронт измеряемого сигнала растет пропорционально  $A_\Phi \propto (1 - e^{-t/\tau_h})$ , а вершина импульса спадает, как  $A_B \propto (1 - e^{-t/\tau_c})$ ».

Следует писать:  $A_B \propto e^{-(t-t_i)/\tau_c}$ , где  $t_i$  – длительность импульса,  $t - t_i \geq 0$ .

2. Стр. 191. В тексте: «коэффициент вторичной эмиссии протонов  $\delta_p$  связан с коэффициентом вторичной эмиссии для кислорода  $\delta_k$  следующим соотношением...».

Правильно писать: «коэффициент вторичной эмиссии электронов, выбираемых

протонами  $\delta_{\text{п}}$ , связан с коэффициентом вторичной эмиссии электронов, выбиваемых ионами кислорода  $\delta_{\text{к}}$  следующим соотношением...»

## Оформление

Качество графики, нумерация и подписи к рисункам не вызывают претензий. Следует отметить, что иллюстративный материал несколько перегружен формулами, не имеющими объяснения ни в тексте, ни в подписях к рисункам. А размещение собственных фото автора в качестве иллюстративного материала напоминает рекламные приемы.

*Однако, подчеркнем, что указанные выше замечания ни в коей мере не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования, не снижают значимости и уровня выполненной автором работы и не касаются положений и выводов, вынесенных автором на защиту.*

## Заключение о соответствии диссертации критериям ВАК

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертационная работа С.А. Гаврилова является законченным научно-техническим исследованием. По научному уровню, новизне результатов и объему она удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, и всем критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842. Автор диссертации, С.А. Гаврилов, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент

\_\_\_\_\_ Корчуганов В.Н.

Доктор физ.-мат. наук,

заместитель руководителя Научного комплекса

по перспективным ускорительным технологиям,

НИЦ «Курчатовский институт».

Адрес: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

телефон: 8 495 196 72 57, e-mail: vnkorchuganov@mail.ru.

Подпись В.Н. Корчуганова заверяю:

Заместитель директора - главный научный секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

\_\_\_\_\_ Алексеева О.А.

Дата:

« 5 » февраля 2026 г.

**Список основных публикаций оппонента по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:**

1. Смыгачева А. С., Корчуганов В. Н., Фомин Е. А. Новый бустерный синхротрон на энергию электронов 2.5 ГэВ для Курчатовского источника синхротронного излучения // Прикладная физика, 2021. – №5, – с. 99.
2. Potemkin F. V., ..., Korchuganov V. N. et al. Hybrid x-ray laser-plasma/laser-synchrotron facility for pump–probe studies of the extreme state of matter at NRC «Kurchatov Institute» // Review of Scientific Instruments, 2021. – v. 92, – p. 053101.
3. V. Korchuganov et al. Status of the Kurchatov synchrotron radiation source. // JACoW Publishing, 2021. – ISBN: 978-3-95450-240-0, – p. 55.
4. Корчуганов В. Н. и др. Проект Курчатовского источника синхротронного излучения третьего поколения // Кристаллография, 2022. – т.67 (№5), – с. 735-741.
5. Ковальчук М. В., ..., Корчуганов В. Н. и др. Лазерно-синхротронный комплекс НИЦ «Курчатовский институт» // Кристаллография, 2022. – т.67 (№5), – с. 771-784.