

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**доктора физико-математических наук, заместителя директора по научной работе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных  
исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)**

**Фещенко Александра Владимировича**

(Адрес: 117312, г.Москва, проспект 60-летия Октября, д.7а. Телефон: 8(495)851-09-70, 8(495)851-00-62. Эл. почта: feschenk@inr.ru)

**на диссертацию Владимира Ивана Юрьевича**

**«ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЙ ЯРКОСТЬЮ ПУЧКА: ДИНАМИКА,  
ДИАГНОСТИКА, МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**Актуальность темы диссертации.** Одной из задач, стоящих в настоящее время перед физикой пучков заряженных частиц и ускорительной техникой, является создание ускорителей электронов с высокой яркостью пучка, то есть большим зарядом сгустков и малым шестимерным эмиттансом пучка. Решение этой задачи необходимо в связи с разработкой и созданием источников синхротронного излучения четвертого поколения, включая рентгеновские лазеры на свободных электронах, линейных коллайдеров, ускорителей с рекуперацией энергии, генераторов монохроматического рентгеновского излучения, развитием методов лазерного ускорения и ускорения в плазме. Темой диссертационной работы является, исследование динамики ярких электронных пучков, разработка методов их диагностики, а также магнитных систем с использованием постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов, предназначенных для управления такими пучками. Именно поэтому тема диссертации является актуальной.

**Обоснованность и достоверность научных результатов.** Автор использует не подлежащие сомнению математический аппарат и физические модели. Расчетные результаты получены с использованием уже апробированных и получивших признание научной общественностью моделей и программных средств. Проводится сравнение расчетных результатов, полученных с помощью разных программных средств (ASTRA, CST Studio, PARMELA, POISSON SUPERFISH), а также сравнение с тестовыми моделями с известными характеристиками. При получении экспериментальных данных проводится калибровка измерительной аппаратуры, а сами экспериментальные данные сравниваются с расчетными. Также проводится сравнение рассчитанных характеристик источника электронов с параметрами других установок. Противоречия в заявляемых автором результатах с результатами других авторов не просматривается. Вышесказанное



позволяет сделать вывод о достаточной обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации, а также об их достоверности.

**Научная новизна.** Автором разработана методика расчетов и выполнены расчеты динамики пучка электронов, а также оптимизация параметров пучка инжектора, состоящего из СВЧ пушки с фотокатодом, двух ускоряющих секций и соленоида. В результате проведенных расчетов и оптимизации показано, что может быть получен пучок с зарядом в сгустке 1 нКл, среднеквадратическим продольным размером сгустков 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом менее 4 мм·мрад и обеспечена регулировка энергии в диапазоне 35÷50 МэВ. Исследовано влияние на параметры пучка мультипольных компонент ускоряющего поля, возникающих из-за наличия щелей связи и окон ввода мощности. Разработана методика восстановления продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора по изображению пучка на люминесцентном экране после прохождения отклоняющего резонатора, магнитного спектрометра и участков дрейфа. Проведен анализ точности восстановления продольного эмиттанса. Разработан прецизионный магнитный спектрометр, выполнена его калибровка. Получена теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и среднеквадратический разброс по импульсам электронов пучка. Разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов, включая многополюсные поворотные магниты, дипольные магниты, квадрупольные линзы. В основе методики настройки лежит использование специальных плунжеров, а критерий качества настройки магнитных систем, основан на расчете траекторий частиц в измеренных полях магнитных систем.

**Научная и практическая значимость.** Значимость работы обусловлена тем, что полученные результаты имеют непосредственное отношение к генератору монохроматического рентгеновского излучения с энергией, перестраиваемой в диапазоне 20-40 кэВ, предложенного в НИИЯФ МГУ совместно с ФИАН и МЛЦ МГУ. Предложенная методика измерения продольного эмиттанса пучка электронов позволяет увеличить точность измерений, а результаты разработки и калибровки магнитного спектрометра, используются в установке по измерению параметров пучка сверхпроводящей СВЧ пушки проекта GunLab. Разработанная методика настройки магнитов на основе редкоземельных магнитных материалов использовалась для настройки магнитных элементов разрезного микротрона Технического университета Каталонии и может быть применена для настройки магнитных систем других ускорителей. Безусловно,



выполненная работа заслуживает продолжения и, прежде всего, в плане практического применения.

**Личный вклад автора.** Вклад диссертанта в выполнение исследований, представленных в диссертации, является определяющим. Им выполнено численное моделирование динамики и оптимизация пучка электронов от фотокатода СВЧ пушки до выхода из линейного ускорителя, предложена методика восстановления продольного эмиттанса и проведен анализ влияния различных факторов на точность восстановления, для проекта GunLab выполнены расчеты магнита-спектрометра, разработана его конструкция и измерено распределение магнитного поля, разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов. Диссертант также участвовал в сборке и настройке магнитной системы разрезного микротрона для интраоперационной лучевой терапии.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы представлены в 9 печатных работах, три из которых опубликованы в рецензируемых журналах по списку ВАК. Результаты докладывались на международных и российских конференциях, конференциях молодых ученых, научных семинарах.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений. Ее объем составляет 143 страницы, она включает 86 рисунков и 24 таблицы. Список литературы включает 105 наименований.

Диссертация достаточно полно проиллюстрирована как расчетным, так и экспериментальным графическим материалом, а также трехмерными моделями анализируемых и разрабатываемых устройств.

В то же время необходимо отметить некоторые недостатки работы:

- 1) Нечеткость некоторых фраз. При формулировании научной новизны на стр. 8 есть фраза «Впервые разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов. В основе методики настройки лежит использование специальных плунжеров, а критерий качества настройки магнитных систем, основан на расчете траекторий частиц в измеренных полях магнитных систем». Из этой фразы можно формально сделать заключение, что до диссертанта методик настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов не существовало. Стр.23: «Путем варьирования положения и величины магнитного поля соленоида подбирались такие их значения, обеспечивающие минимально достижимый нормализованный поперечный эмиттанс электронного пучка». Стр. 32: «В методе 1 регулирования конечной энергии пучка меняется нормировка полей обеих секций». Более правильно было бы написать, что меняется



уровень поля или амплитуда поля. Стр. 32: «При этом пучок получает в каждой секции одинаковое количество энергии».

- 2) Встречаются сокращения, не являющиеся общепринятыми, например ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ (стр.10).
- 3) Встречаются описки. Стр. 5: Интраоперационная лучевая терапия, вместо интраоперационной. Стр. 39: Поведение энергии показано на рис  $z$ , а не  $\delta$ . Поведение разброса кинетической энергии - на рис  $\delta$ , а не  $e$ . Рис. 1.30 – 1.33, 1.35-1.38, стр.83,84. Единицы шкалы  $z$  должны быть метры, а не миллиметры. Рис. 3.16: В подписи к рисунку есть ссылка на позиции 1 и 2 и стрелки намагниченности, которые на рисунке не показаны. Стр. 123: Пропущен номер рисунка
- 4) Стр. 16: Используется жаргонное выражение «разравнивающая пластина».
- 5) Стр. 41, 42-44: Говорится о пучке, ускоренном методами 1 и 2, хотя методы 1 и 2 – это методы не ускорения, а регулирования энергии.
- 6) Стр. 42-45: Двумерные распределения частиц в поперечной плоскости  $(x,y)$  называется фазовыми портретами, хотя таковыми не являются.
- 7) Стр. 60, 83, 84: Функция тангенс обозначена  $\tan$  вместо  $tg$ .
- 8) Стр. 72, 73: Используется понятие амплитуда для постоянного магнитного поля.
- 9) Табл. 1 автореферата: Колонка называется «источник», хотя указаны значения параметров.

Отмеченные недостатки не являются существенными, не умаляют значения диссертационной работы и не влияют на основные выводы.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что она является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для развития физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертационная работа отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Владимиров Иван Юрьевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент:

заместитель директора по научной работе ИЯИ РАН,

доктор физико-математических наук



Фещенко А.В.

«17» 01 2017 г.