

## **Отзыв официального оппонента**

**кандидата технических наук, доцента** Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

**Лалаяна Михаила Владимировича**

(Адрес: 115409 г. Москва, Каширское шоссе, д.31. тел. 8(495)788-5699 доб. 9823, эл. почта MVLalayan@mephi.ru )

на диссертацию **Владимирова 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.

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

### **Актуальность темы диссертации**

Для реализации широкого класса установок, основанных на адронных ускорителях (таких, как лазеры на свободных электронах, источники синхротронного излучения, коллайдеры) требуется решение задачи получения интенсивных пучков электронов высокой яркости с прецизионными параметрами. При этом для некоторых приложений весьма желательно обеспечить регулировку энергии ускоряемого пучка, с помощью которой реализуется например изменение длины волны когерентного излучения ЛСЭ. Подобные области применения накладывают достаточно жёсткие требования на параметры ускоренного пучка и делают необходимым разработку методов контроля этих параметров. Задачей, на решение которой направлена данная диссертационная работа, является создание ускорителя-источника такого пучка, методик измерения его параметров и магнитных систем ускорителей с постоянными магнитами.

### **Обоснованность и достоверность научных результатов**

Основные результаты, полученные в работе, являются обоснованными. Достоверность данных численного моделирования подтверждается использованием известного и апробированного программного обеспечения, а так же сравнением между собой результатов, полученных с помощью различных программ. Для полученных экспериментальных данных автором проведён расчёт погрешностей, а сами результаты проанализированы с точки зрения корректности. Разработанные автором алгоритмы и основанные на них программы определения продольного эмиттанта пучка и распределения магнитного поля должным образом верифицированы путём проведения тестовых расчётов, которые показали совпадение результатов с полученными другими методами (в том числе аналитическими и экспериментальными) данными.

Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

## **Научная новизна**

В результате проведённой работы определены параметры системы, позволяющей получать сгустки электронов зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, с возможностью регулировки энергии в диапазоне от 35 до 50 МэВ. Выполнено моделирование динамики пучка электронов при его ускорении, показана возможность регулировки энергии частиц в широком диапазоне. Исследовано влияние компонент электромагнитных полей высших порядков на динамику ускоряемого пучка.

Проведена оценка влияния резонатора-дефлектора пучка на величину среднего импульса и на разброс по импульсам электронов. Разработана методика настройки магнитных элементов системы разрезного микротрона, успешно реализованная на практике.

## **Научная и практическая значимость**

Полученные автором результаты имеют значительную практическую ценность и значимость для установок, работы над которыми ведутся в НИИЯФ МГУ - источника интенсивного монохроматического рентгеновского излучения и разрезных микротронов. Автором работы разработана методика, позволяющая измерять продольный эмиттанс пучка заряженных частиц, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора.

Подробно изучены вопросы выбора оптимальных параметров спектрометра для системы диагностики пучка, его разрешающей способности и ошибок измерения. Полученные результаты имеют общий характер и могут быть использованы при решении подобной задачи для других проектов.

Разработана методика настройки магнитного поля поворотных магнитов, линз и магнитов вывода магнитной системы разрезного микротрона. Произведены расчёты и выбор конструктивных особенностей элементов настройки. Результаты проведённого моделирования динамики ускоренного пучка в реальных, полученных экспериментально полях подтверждают как работоспособность предложенной методики, так и возможность применения элементов магнитной системы в микротроне.

## **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в данной работе является определяющим. Наиболее важные результаты получены им лично. Им выполнено численное моделирование электродинамики ускоряющих структур, динамики ускоряемого пучка, выполнена значительная часть экспериментальных исследований – измерений магнитного поля, сборки и настройки магнитных систем микротрона. Текст работы оригинальный, некорректных заимствований не обнаружено.

## **Апробация работы**

Результаты работы достаточно подробно изложены в печатных работах, в том числе реферируемых изданиях и регулярно докладывались автором на конференциях и семинарах различного уровня.

Среди недостатков работы отмечу следующие:

1. Несмотря на ряд преимуществ, которыми обладают магнитные системы с постоянными магнитами, их использование в крупных ускорительных комплексах (о чём упоминается во введении) всё же не настолько широко. Основное применение они находят в ускорителях прикладного назначения с небольшой энергией пучка, для которых важную роль имеют малые габариты и энергоэффективность.
2. Встречаются не вполне корректно построенные фразы: (стр. 14, 15, 28) «Данная пушка ... работает на  $\pi$ -колебании»; «частота 0-моды». Более правильно было бы использовать общепринятый термин «вид колебаний».
3. Стоит отметить некоторые замечания по оформлению: (стр. 22) раздел 1.2.5, (стр. 45), раздел 1.3.3, (стр. 79), раздел 2.3.1 начинаются с рисунка, за которым следует текст раздела. (стр. 17, табл. 1.3, стр 20, табл. 1.4) Традиционно указание единиц измерения приводится рядом с самими физическими величинами, а не вынесением их в столбец «значение».
4. Приводимое на стр. 28-29 сравнение результатов расчёта электродинамических характеристик ячеек ускоряющей структуры с помощью программ CST Studio и Astra не несёт полезной информации. Верификация полученных с помощью CST Studio результатов решения данной задачи не требуется (программа является де-факто эталоном среди подобных инструментов моделирования), а значения ЭДХ получены в очень грубом приближении аксиальной симметрии ячеек.
5. Предложение реализовать в системе СВЧ-питания ускорителя два метода регулировки энергии для последующего выбора наилучшего из них эмпирически не обосновано – подобный выбор делается на этапе проектирования ускорителя на основе данных расчётов и моделирования.
6. В работе рассматривается только резонатор-дефлектор, работающий на волне  $E$ -типа без обоснования выбора такого варианта. Так, известны системы с волной  $H$ -типа, и такие резонаторы имеют в несколько раз большую ВЧ эффективность и на порядок шире полосу пропускания.

Отмеченные недостатки в целом носят технический характер, существенными не являются и не снижают общей ценности и значения диссертационной работы.

Оценивая диссертацию Владимирова И.Ю. в целом, могу утверждать, что она является законченной научно-квалификационной работой, в результате выполнения которой решены задачи, имеющие существенное значение для развития физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа отвечает критериям утверждённого «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Владимиров Иван Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент

кандидат технических наук, доцент

кафедры Электрофизических установок НИЯУ МИФИ

М.В. Лалаян

Лялиев М.В. Лалаян  
завершено: И.О. директора  
по персоналу  
М.В. Вашильченко

