

На правах рукописи

Владимиров Иван Юрьевич

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

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель: **Шведун В.И.**
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник ОЭПВАЯ НИИЯФ
им. Д.В. Скобельцына

Официальные оппоненты: **Фещенко А.В.**
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе ИЯИ
РАН, руководитель отдела ускорительного
комплекса

Лалаян М.В.
кандидат технических наук, доцент кафедры
электрофизических установок НИЯУ МИФИ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Государственный научный центр
Российской Федерации – Институт физики
высоких энергий»

Защита состоится _____ 2017 г. в ____ часов ____ минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-ый корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУ и по ссылке <http://sinp.msu.ru/ru/system/files/dissertations/vladimirov-dissert.pdf>.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 501.001.77, доктор физико-
математических наук, профессор

С.И. Страхова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Получение ярких интенсивных релятивистских электронных пучков является в последние 20 лет одним из ключевых направлений развития ускорительной физики и техники. Такие пучки необходимы для источников синхротронного излучения четвертого поколения, включая рентгеновские лазеры на свободных электронах [1-3] и ускорители с рекуперацией энергии [4], для проектируемых линейных коллайдеров [5], для источников рентгеновского излучения на основе комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронах [6-9], для исследования новых методов ускорения частиц, в том числе методов лазерного ускорения и ускорения в плазме.

В НИИЯФ МГУ совместно с ФИАН и МЛЦ МГУ в течение ряда лет проводились исследования различных вариантов интенсивного источника монохроматического рентгеновского излучения с энергией, перестраиваемой в диапазоне 20-40 кэВ – лазерно-электронного генератора, основанного на обратном томсоновском рассеянии лазерного излучения на релятивистских электронах [10-13]. Лазерно-электронный генератор может занять нишу между рентгеновскими трубками и источниками синхротронного излучения по таким параметрам, как интенсивность и яркость излучения, габариты и стоимость установки. Одними из основных элементов лазерно-электронного генератора, обсуждаемого в [10-13], являются нормально проводящий линейный ускоритель с СВЧ пушкой, позволяющие получить сгустки электронов с большим зарядом, малым продольным и поперечным эмиттансом и регулируемой энергией. Расчет и оптимизация параметров такого ускорителя является одной из задач настоящей диссертации.

Важнейшей задачей при создании ускорителей электронов с большой яркостью пучка является разработка методов диагностики, в том числе методов измерения энергии, энергетического спектра и продольного эмиттанса пучка. В рамках соглашения о сотрудничестве с Берлинским центром материалов и энергии имени Гельмгольца в НИИЯФ МГУ в ходе выполнения данной диссертации были разработаны методики и оборудование для проекта сверхпроводящей СВЧ пушки с большой яркостью пучка GunLab [14, 15], являющегося частью проекта

bERLinPro [16, 17], целью которого является создание прототипа сверхпроводящего линейного ускорителя с рекуперацией энергии для источника синхротронного излучения четвертого поколения.

В современных ускорителях заряженных частиц, в том числе в существующих и проектируемых источниках электромагнитного излучения, в проектируемых линейных коллайдерах, важное место занимают магнитные системы на основе редкоземельных магнитных материалов. Такие системы имеют ряд преимуществ по сравнению с электромагнитами: меньшие размеры и вес; отсутствие источника питания и гистерезисных явлений, что повышает воспроизводимость режима и стабильность работы ускорителей; возможность реализации сложных конфигураций магнитного поля; возможность достижения высоких значений индукции магнитного поля, существенно превышающих значения индукции, при которых происходит насыщение стали и специальных сплавов; помещение магнитов в вакуум. В НИИЯФ МГУ в рамках сотрудничества с научными организациями России, а также в рамках соглашения о сотрудничестве с Техническим университетом Каталонии ведутся разработки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов для ускорителей электронов прикладного назначения, в том числе ускорителей для медицины и систем безопасности. При создании магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов возникает общая проблема прецизионной настройки распределения магнитного поля, связанная как со свойствами материала (неоднородностью намагничивания по объему, хрупкостью), так и с большими ponderomotorными силами, действующими на отдельные части магнитов и достигающими для больших магнитных систем нескольких тонн. В этой связи, актуальной является еще одна из задач настоящей диссертации – разработка методов прецизионной настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов на примере магнитной системы разрезного микротрона для интраоперационной лучевой терапии [18].

Цели и задачи исследования

В работе планировалось провести расчет источника электронов, состоящего из СВЧ пушки, соленоида и линейного ускорителя. Требовалось определить параметры составных элементов источника электронов, позволяющего получить

пучок с зарядом 1 нКл, минимально достижимым нормализованным поперечным эмиттансом, длительностью в несколько пс и энергией, регулируемой в пределах 35-50 МэВ. Следующей целью было рассчитать спектрометр и изучить методику измерения продольного эмиттанса пучка для проекта GunLab. Разработка методов прецизионной настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов на примере магнитной системы разрезного микротрона для интраоперационной лучевой терапии – еще одна задача, которая стояла перед диссертантом.

Научная новизна

Научная новизна проведенных исследований заключается в следующем:

- 1) Впервые получены параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом меньше 4 мм мрад и регулируемой энергией 35-50 МэВ.
- 2) Впервые получена теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и среднеквадратичный разброс по импульсам электронов пучка в приближении, что электромагнитное поле вертикально-отклоняющего резонатора аппроксимируется полем моды TM_{110} цилиндрического резонатора без пролетного канала. Показано, что изменение среднего импульса зависит от амплитуды электромагнитного поля резонатора, от фазы влета пучка в резонатор, от длины сгустков пучка и от его энергии, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам еще зависит от вертикальных размера и углового отклонения пучка. В частности, показано, что в поле резонатора с частотой 1.3 ГГц и амплитудой магнитного поля 16.7 мТл изменение среднего импульса пучка может достигать 100 кэВ/с, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам – 10 кэВ/с.
- 3) Впервые разработана методика измерения продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора. Показано, что на точность измерения продольного эмиттанса большое влияние оказывают вертикальные размер и угловое отклонение пучка.

- 4) 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.

Научная и практическая значимость

Значимость работы обусловлена тем, что полученные параметры источника электронов с высокой яркостью пучка положены в основу генератора монохроматического рентгеновского излучения с энергией, перестраиваемой в диапазоне 20-40 кэВ, предложенного НИИЯФ МГУ совместно с ФИАН и МЛЦ МГУ.

Предложенная методика измерения продольного эмиттанса пучка электронов, учитывающая воздействие отклоняющего резонатора на энергию и энергетический спектр измеряемого пучка, позволяет увеличить точность измерений. Проведены разработка, измерения и калибровка магнитного поля магнита-спектрометра, вошедшего в состав установки по измерению параметров пучка сверхпроводящей СВЧ пушки проекта GunLab.

Разработанная методика настройки магнитов на основе редкоземельных магнитных материалов может быть использована при настройке магнитных систем ускорителей заряженных частиц, включая поворотные магниты, ондуляторы, магнитные линзы. В результате выполнения данной работы настроены поворотные магниты, квадрупольная линза и магниты вывода пучка для разрезного микротрона Технического университета Каталонии.

Достоверность

Достоверность результатов численного моделирования, представленных в диссертации, определяется использованием хорошо апробированного программного обеспечения (ASTRA [19], CST Studio [20], PARMELA [21], POISSON SUPERFISH [22]), сравнением результатов расчетов, выполненных с помощью различных программ, проведением расчетов для тестовых моделей с известными характеристиками, тщательной калибровкой измерительной

аппаратуры, а также сравнением (где это было возможно) и хорошим совпадением расчетных и экспериментальных характеристик

Личный вклад автора

Автором проведено численное моделирование динамики пучка электронов от фотокатода СВЧ пушки до выхода из линейного ускорителя, проведена минимизация среднеквадратичного эмиттанса пучка СВЧ пушки по параметрам лазерного импульса и магнитного поля соленоида. Диссертант исследовал методы регулирования энергии пучка на выходе линейного ускорителя в пределах 35-50 МэВ, обеспечивающие малую величину энергетического разброса и поперечного эмиттанса пучка.

Для проекта GunLab автором выполнены расчеты магнита-спектрометра, разработана его конструкция и измерено распределение магнитного поля. Также им предложена методика восстановления продольного эмиттанса пучка по его изображению на люминесцентном экране и изучено влияние электрического поля поперечно-отклоняющего резонатора на результаты измерения эмиттанса пучка.

Диссертант участвовал в сборке и настройке магнитной системы разрезного микротрона для интраоперационной лучевой терапии, в результате чего была разработана методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

- 1) Параметры источника электронов, позволяющего получить пучок с зарядом 1 нКл, среднеквадратичной длиной 1 мм, нормализованным поперечным эмиттансом меньше 4 мм мрад и регулируемой энергией 35-50 МэВ.
- 2) Теоретическая оценка воздействия вертикально-отклоняющего резонатора на средний импульс и среднеквадратичный разброс по импульсам электронов пучка в приближении, что электромагнитное поле вертикально-отклоняющего резонатора аппроксимируется полем моды TM_{110} цилиндрического резонатора без пролетного канала. Показано, что изменение среднего импульса зависит от амплитуды электромагнитного поля резонатора, от фазы влета пучка в резонатор, от длины сгустков пучка и от его энергии, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам

также зависит от вертикальных размера и углового разброса пучка. В частности, показано, что в поле резонатора с частотой 1.3 ГГц и амплитудой магнитного поля 16.7 мТл изменение среднего импульса пучка может достигать 100 кэВ/с, а изменение среднеквадратичного разброса по импульсам – 10 кэВ/с

- 3) Методика измерения продольного эмиттанса пучка, основанная на аналитическом решении уравнений движения электрона в поле вертикально-отклоняющего резонатора. Показано, что на точность измерения продольного эмиттанса существенное влияние оказывают вертикальные размер и угловой разброс частиц пучка
- 4) Методика и результаты настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов. В основе методики настройки лежит использование настроечных плунжеров, а критерий качества настройки магнитных систем, основан на расчете траекторий частиц в измеренных полях магнитных систем

Апробация работы и публикации

Материалы диссертации опубликованы в 9 работах, из которых 3 статьи удовлетворяют требованиям ВАК. Также результаты докладывались автором на научном семинаре ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ и следующих конференциях и школах:

- 1) 23 всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц (24-28 сентября 2012 г., Санкт-Петербург, Россия);
- 2) 5th International Particle Accelerator Conference (15-20 июня 2014 г, Дрезден, Германия);
- 3) XV и XVI межвузовские научные школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (25-26 ноября 2014 г., 24-25 ноября 2015 г., Москва, Россия);
- 4) II международная конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии» (25-27 января 2016 г., НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия).

Структура и объем диссертации

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта новизна работы и ее практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

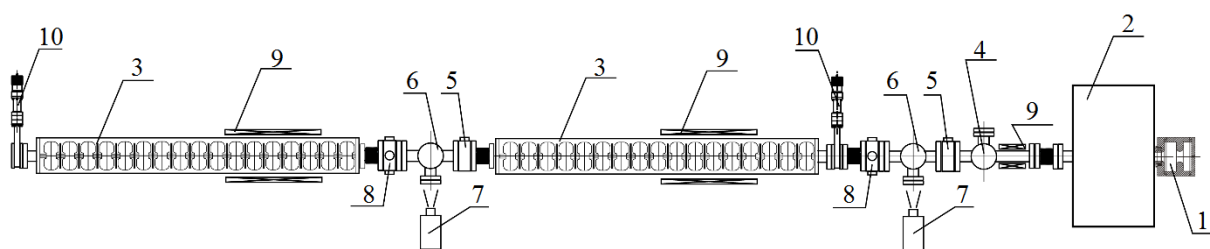


Рис. 1. 1 – СВЧ пушка, 2 – соленоид, 3 – секции линейного ускорителя, 4 - камера ввода лазерного импульса, 5 – датчик заряда, 6 – камера флуоресцентного экрана, 7 – ПЗС камера, 8 – датчик положения пучка, 9 – корректоры пучка, 10 – вакуумный затвор

Таблица 1

Основные характеристики пучка источника электронов

Параметр	источник
Интервал регулирования энергии ускоренного пучка, МэВ	35-50
Заряд ускоренного сгустка электронов, нКл	1
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс, мм мрад	< 4
Среднеквадратичная длина сгустка, мм	1
Среднеквадратичный разброс по энергии, %	0.12
Количество сгустков в цикле ускорения	4
Расстояние между сгустками, нс	12.5
Максимальная частота повторения циклов ускорения, Гц	50

В **главе 1** приведены результаты расчета динамики пучка источника электронов с высокой яркостью. В **разделе 1.1** приводится общее описание источника электронов, который схематически показан на рис. 1. Основными компонентами источника электронов являются СВЧ пушка с медным фотокатодом (1), соленоид

(2), две секции линейного ускорителя (3) и окна ввода лазерного излучения (4).
 Параметры источника приведены в табл. 1.

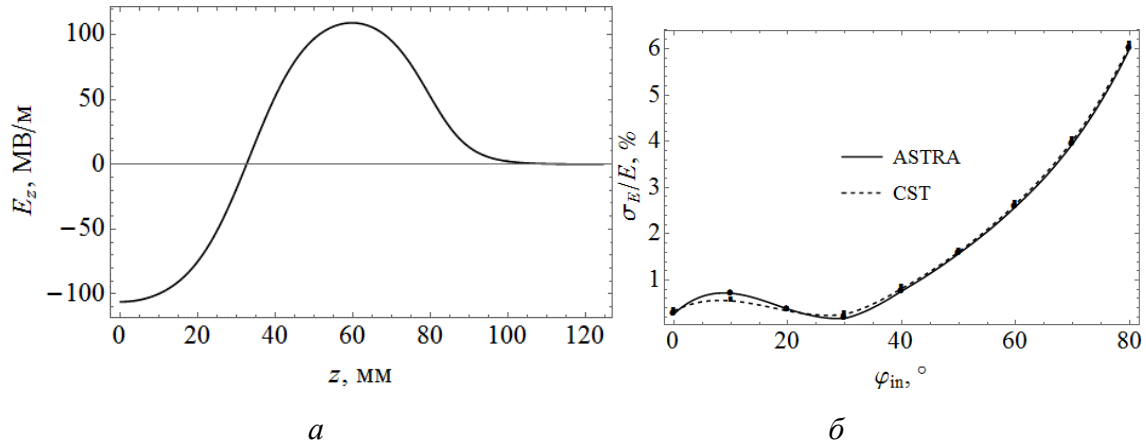


Рис. 2. (а) Распределение электрического поля E_z вдоль оси пушки. (б) Относительное среднеквадратичное отклонение σ_E/E пучка в зависимости от фазы инжекции φ_{in} пучка в СВЧ пушку

Таблица 2

Параметры лазерного импульса

Параметр	Значение
Распределение	Равномерное
x_{max}	1.2 мм
t_{max}	10 пс

В разделе 1.2 описаны методы и результаты расчета динамики пучка в СВЧ пушке с соленоидом. СВЧ пушка состоит из двух связанных резонаторов общей длиной $1.6 \lambda/2$, где λ – длина волны ускоряющего поля, и работает на π -колебании с частотой 2856 МГц. При облучении медного фотокатода лазерными импульсами с длинами волн 248-266 нм образуются сгустки электронов с энергиями 0.4-0.13 эВ. Далее они ускоряются в поле СВЧ пушки. Распределение электрического поля E_z вдоль оси пушки изображено на рис. 2, а. Если поле пушки нормировано на значение $\int |E_z| dz / \int dz = 52.2$ МВ/м, то сгустки электронов ускоряются до 5 МэВ при фазе инжекции 30° . При этом относительное среднеквадратичное отклонение кинетической энергии достигает минимального значения $\sigma_E/E \approx 0.3\%$ (рис. 2, б).

Параметры лазерного импульса (длительность, радиус и тип распределения фотонов в объеме) были подобраны таким образом, что приводили к наименьшему

нормализованному поперечному эмиттансу сгустка электронов на выходе из СВЧ пушки. Вычисленные параметры лазерного импульса указаны в табл. 2.

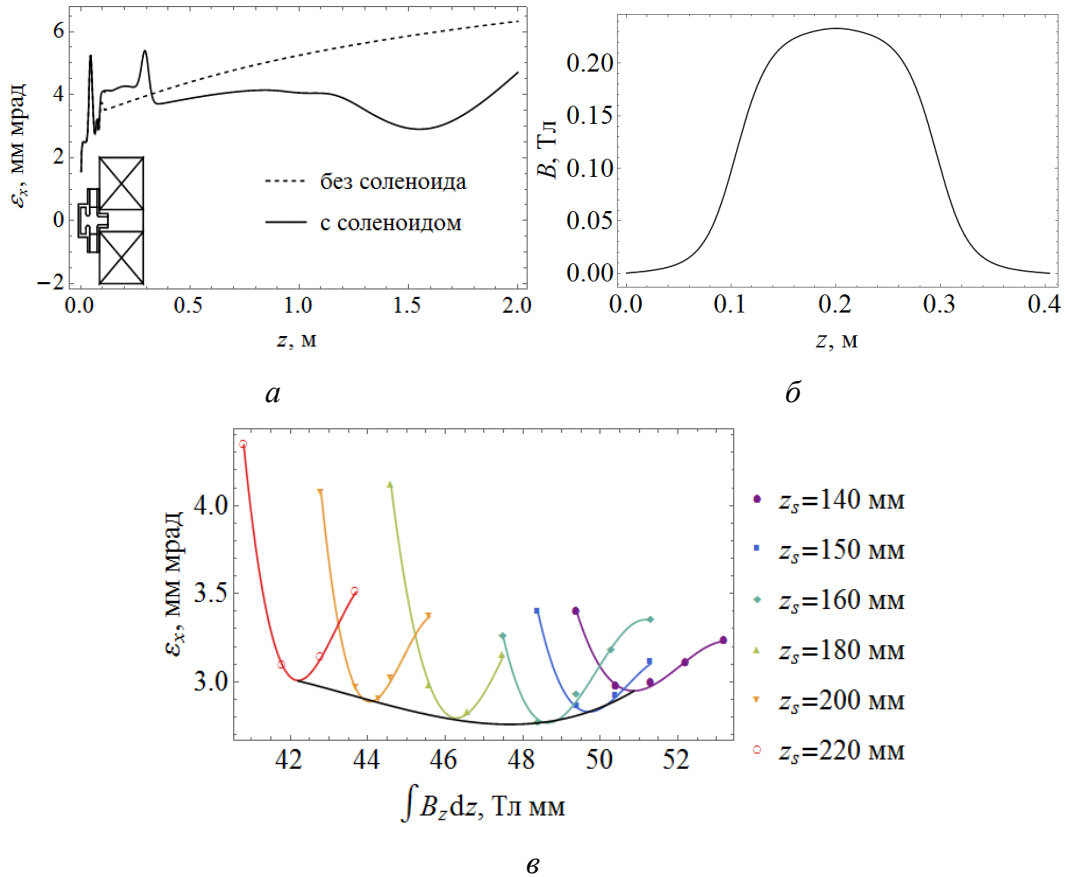


Рис. 3. (а) Изменения нормализованного поперечного эмиттанса ϵ_x при наличии магнитного поля соленоида: $z_s = 200$ мм, $\int B_z dz = 44.3$ Тл мм. (б) Распределение магнитного поля на оси соленоида. (в) Наименьший нормализованный поперечный эмиттанс пучка ϵ_x при разных положениях соленоида z_s и интегралах его магнитного поля $\int B_z dz$

В процессе ускорения пучка в СВЧ пушке и при последующем движении сгустка в пространстве дрейфа происходит рост поперечного эмиттанса под действием сил пространственного заряда. С помощью фокусирующего соленоида можно минимизировать эмиттанс в определенной точке на траектории пучка (рис. 3, а). На рис. 3, б изображено распределение магнитного поля на оси соленоида. Путем варьирования положения и величины магнитного поля соленоида (рис. 3, в) было вычислено, что наименьший нормализованный поперечный эмиттанс электронного пучка достигается, когда интеграл магнитного поля соленоида равен $\int B_z dz = 44.3$ Тл мм, а центр соленоида расположен на расстоянии $z_s = 200$ мм от

катода, так как конструкция СВЧ пушки не позволяет поместить соленоид ближе к катоду.

В разделе 1.3 приведены результаты оптимизации динамики пучка в линейном ускорителе, описаны два метода регулирования конечной энергии пучка.

После ускорения до 5 МэВ в СВЧ пушке пучок электронов ускоряется в линейном ускорителе до конечной энергии 35-50 МэВ. Линейный ускоритель состоит из двух одинаковых секций. Секция линейного ускорителя представляет собой ускоряющую структуру со стоячей волной с внутренними ячейками связи, работающую на $\pi/2$ -колебании на частоте 2856 МГц. Поля в секциях нормированы одинаково.

Расчеты динамики пучка с трехмерными полями с учетом щелей и окна связи показали, что в ускоряющей ячейке, через которую осуществляется ввод в секцию СВЧ мощности, при наличии только одного окна связи с волноводом возникает сильная дипольная компонента электромагнитного поля, приводящая к росту поперечного эмиттанса пучка (рис. 4, а), а также к смещению пучка (рис. 4, б). Для компенсации дипольной компоненты поля в узел ввода мощности было введено второе симметрично расположенное окно связи.

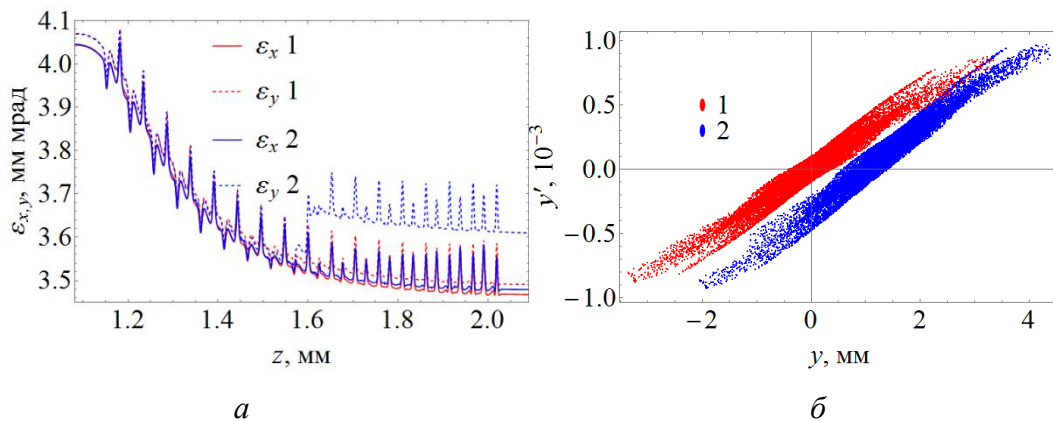


Рис. 4. (а) Изменение нормализованных поперечных эмиттансов $\varepsilon_{x,y}$ в первой секции при ускорении пучка до средней кинетической энергии 50 МэВ. (б) Фазовый портрет (y, y') пучка, ускоренного до средней кинетической энергии 35 МэВ. 1 – ускорение в секциях из азимутально-симметричных ячеек, 2 – ускорение в секциях с одним окном ввода мощности

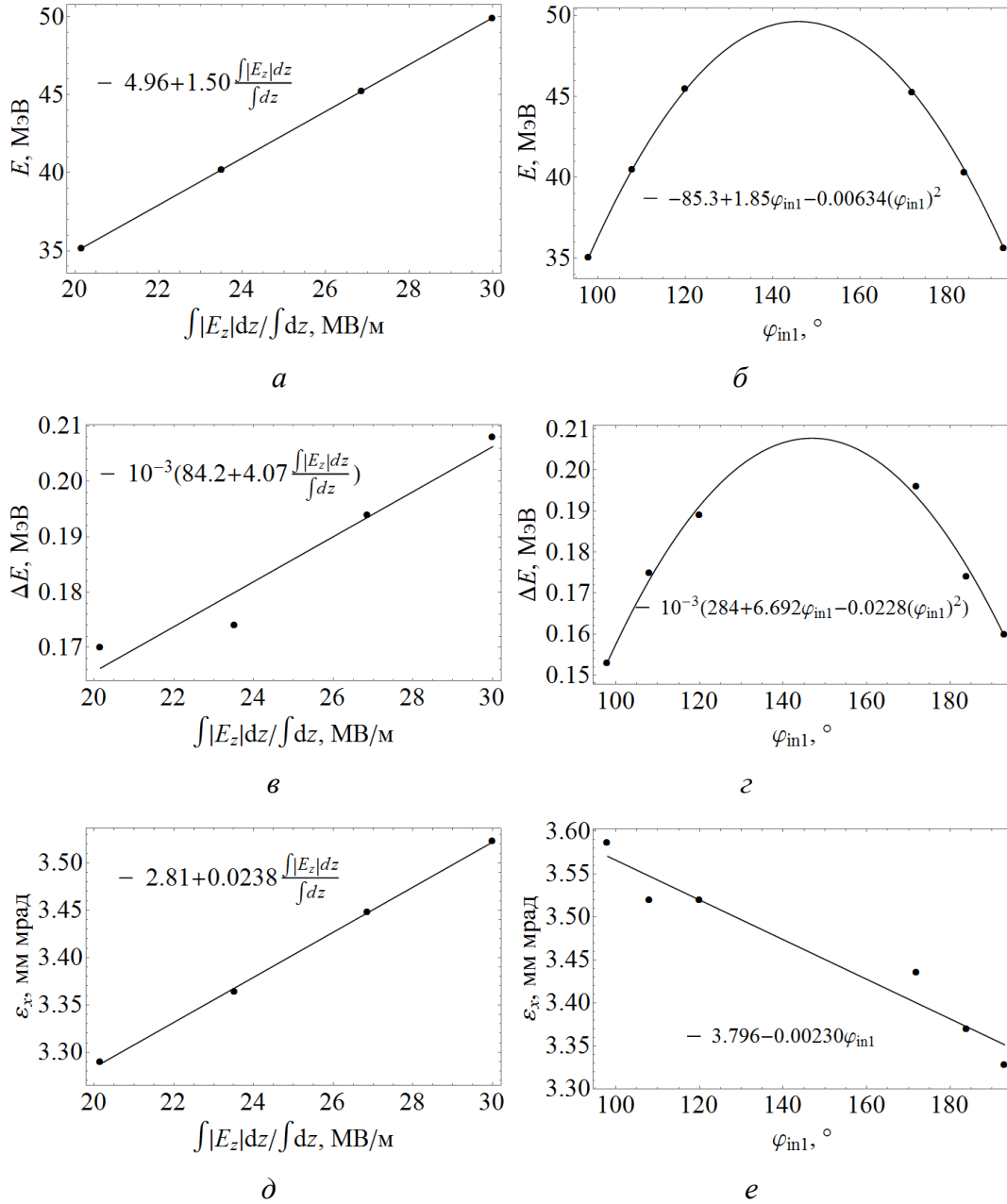


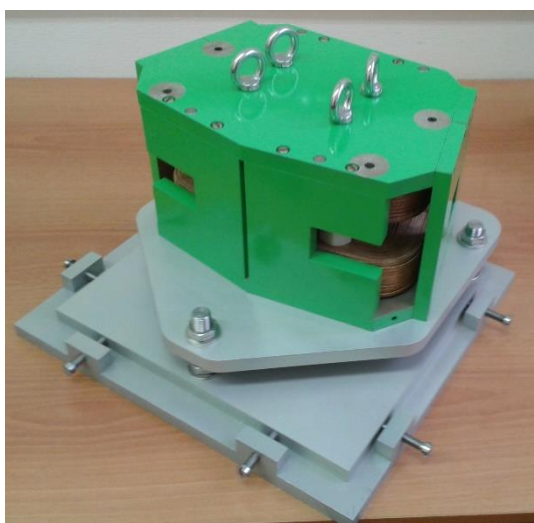
Рис. 5. Средняя кинетическая энергия E (а, б), полный разброс кинетических энергий частиц пучка ΔE (в, г), нормализованный поперечный эмиттанс ϵ_x (д, е) пучка после ускорения в линейном ускорителе при регулировании конечной энергии методом 1 с помощью нормировки поля $\int |E_z| dz / \int dz$ (слева) и методом 2 с помощью фазы влета в первую секцию φ_{in1} (справа)

Были изучены два способа регулирования конечной энергии пучка электронов: одновременное одинаковое изменение величины поля секций (метод 1); изменение фазы влета в первую и во вторую секции при постоянной нормировке поля (метод 2). Оказалось, что характеристики пучков при любом способе регулирования энергии отличаются друг от друга незначительно (рис. 5, а-е). Поэтому нужно

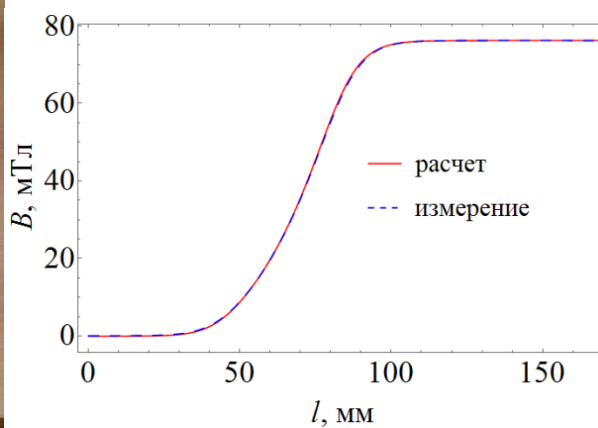
построить систему СВЧ питания линейного ускорителя таким образом, чтобы обеспечить возможность экспериментальной проверки обоих методов регулирования энергии.

Глава 2 посвящена разработке методики измерения энергии, энергетического спектра и продольного эмиттанса пучка СВЧ пушки. Методика имеет общий характер, но ее применение проиллюстрировано на примере сверхпроводящей СВЧ пушки проекта GunLab, краткое описание которого дано в **разделе 2.1**.

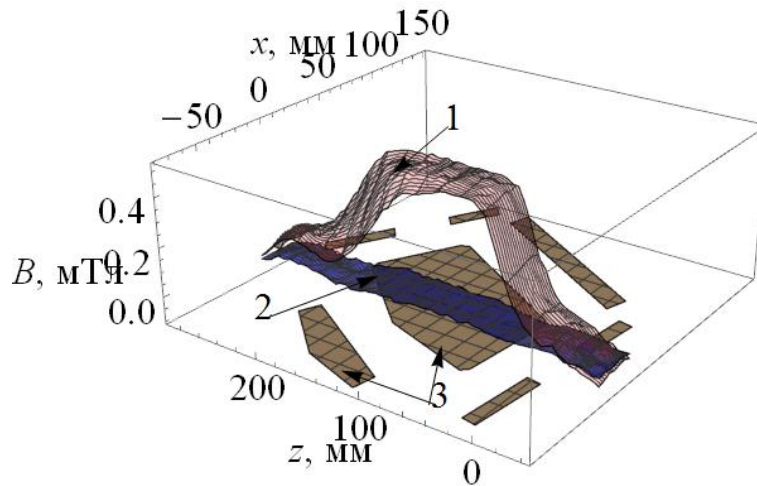
В **разделе 2.2** описывается процедура проектирования спектрометра для проекта GunLab. Главными критериями, на основе которых выбирались параметры спектрометра, были достижение разрешающей способности не хуже 0.1% и как можно меньшей погрешности измерения импульса электронов. Для вычисления параметров спектрометра использовалась его матрица преобразования. Было предложено рассчитать параметры спектрометра таким образом, что матричный элемент $m_{12} \approx 0$. При этом исключается влияние углового разброса частиц пучка на разрешение спектрометра, и, поместив на входе в спектрометр вертикальную коллимационную щель, можно регулировать разрешение спектрометра. В том же разделе оцениваются ошибка измерения импульса и разрешающая способность спектрометра и выдвигаются требования к компонентам спектрометра (системе наблюдения, состоящей из флуоресцентного экрана и ПЗС камеры, и системе измерения магнитного поля в дипольном магните).



а



б



6

Рис. 6. (а) Собранный дипольный магнит для проекта GunLab. (б) Распределение вычисленного и измеренного магнитных полей вдоль половины опорной траектории пучка в дипольном магните. (в) Распределение в медианной плоскости диполя остаточного магнитного поля (1) и поля при компенсирующем токе 16 мА (2), 3 – контуры полюса и ярма магнита

Далее приводятся результаты трехмерного расчета поля дипольного магнита спектрометра, а также результаты измерения поля в собранном магните (рис. 6, а). На рис. 6, б показаны распределения вычисленного и измеренного полей вдоль половины опорной траектории пучка в дипольном магните. Качество изготовления и сборки дипольного магнита оценивается с помощью сравнения коэффициентов краевого поля $K_1 = \int B(l)(B_0 - B(l))/(GB_0^2) dl$ и эффективных длин траекторий $L = 2 \int B(l)/B_0 dl$ для измеренного и вычисленного магнитных полей, записанных в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициент краевого поля K_1 , эффективная длина траектории L в дипольном магните и угол поворота пучка $\phi = L/R$

	Расчет	Измерение
K_1	0.246	0.251
L	196.7 мм	196.6 мм
ϕ	45.08°	45.05°

Поскольку дипольный магнит будет постоянно находиться на линии транспортировки пучка, его остаточное поле будет влиять на траекторию пучка. Для контроля величины остаточного поля в магнит помещен датчик Холла. Путем подачи на обмотки компенсирующего тока можно минимизировать величину остаточного поля, что было продемонстрировано экспериментально и показано на рис. 6, в.

В разделе 2.3 подробно описывается воздействие вертикально-отклоняющего ВЧ резонатора на пучок, а также анализируется методика восстановления продольного фазового портрета пучка.

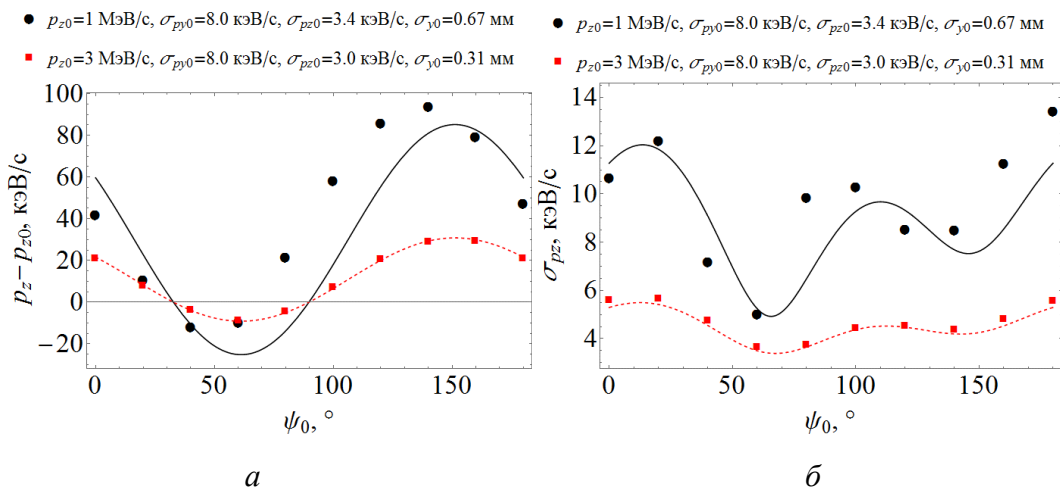


Рис. 7. Изменение среднего импульса $p_z - p_{z0}$ (а) и среднеквадратичный разброс по импульсам σ_{pz} (б) для пучков, прошедших резонатор, в зависимости от фазы ψ_0 влета опорного электрона. Точки – численный расчет в ASTRA, линии – графики полученных функций

Целью измерений с дипольным магнитом и вертикально-отклоняющим ВЧ резонатором является получение фазового портрета в продольном фазовом пространстве $p_z t$. Действие вертикально-отклоняющего ВЧ резонатора на пучок оценивается с помощью электромагнитного поля моды TM_{110} цилиндрического резонатора без пролетного канала. Использование аппроксимирующих выражений для компонент такого поля позволяет получить формулы для оценки изменения среднего импульса пучка и среднеквадратичного разброса частиц пучка по импульсам. Изменение этих характеристик пучка в вертикально-отклоняющем ВЧ резонаторе происходит из-за ненулевой продольной компоненты E_z электрического поля вблизи оси пролетного канала резонатора. На рис. 7, а, б

показано, что значения изменения среднего импульса пучка и среднеквадратичного разброса по импульсам, посчитанные с помощью выведенных формул, достаточно хорошо согласуются со значениями, полученными численно в программе ASTRA.

Предложенная методика восстановления фазового портрета $p_z t$ пучка основана на решении матричного уравнения для пучка, прошедшего участок дрейфа, вертикально-отклоняющий ВЧ резонатор, участок дрейфа, дипольный магнит с краевыми полями и еще один участок дрейфа. При решении матричного уравнения принимается, что на входе в систему измерения пучок имеет нулевой поперечный размер; все частицы пучка движутся строго вдоль оси пролетного канала резонатора; разброс по импульсам частиц пучка существенно меньше импульса опорного электрона. Пример восстановления фазового портрета пучка по его изображению на экране показан на рис. 8. Поскольку все результаты были получены для случая, когда пучок электронов движется в поле моды TM_{110} резонатора без пролетного канала, их применимость к случаю движения пучка в поле резонатора с пролетным каналом проверяется в конце **раздела 2.3**.

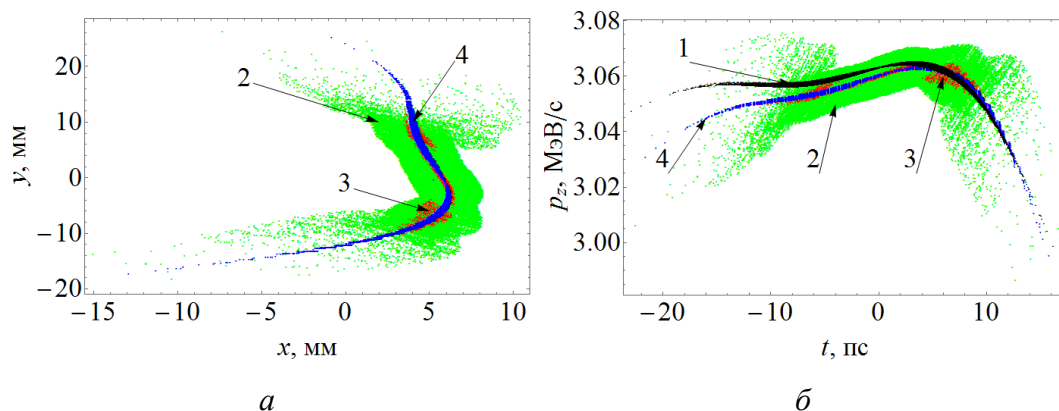


Рис. 8. Изображения пучков на экране (а) и восстановленные по ним продольные фазовые портреты (б). 1 – истинный портрет пучка; 2 – изображение и восстановленный портрет пучка в системе измерения без дополнительной горизонтальной коллимационной щели; 3 – изображение и восстановленный портрет пучка в системе измерения с дополнительной горизонтальной коллимационной щелью шириной 0.1 мм; 4 – изображение и восстановленный портрет пучка, у которого на входе в резонатор все частицы имеют координаты $x = y = 0, x' = y' = 0$

В **главе 3** описывается методика настройки магнитных систем на основе редкоземельных магнитных материалов. Пути решения общей проблемы настройки таких систем, вытекающей из свойств редкоземельных материалов, иллюстрируются на примере сложной магнитной системы разрезного микротрона Технического университета Каталонии, краткое описание которого дано в **разделе 3.1**. Основные параметры ускорителя приведены в табл. 4, схема ускорителя изображена на рис. 9. Электронный пучок формируется пушкой (1), ускоряется в структуре (2) и поворачивается поворотными магнитами (3) и (4). Квадрупольный магнит (5) выполняет горизонтальную фокусировку пучка. С помощью магнитов вывода (6) пучок с последних четырех орбит направляется на траекторию вывода из ускорителя (7).

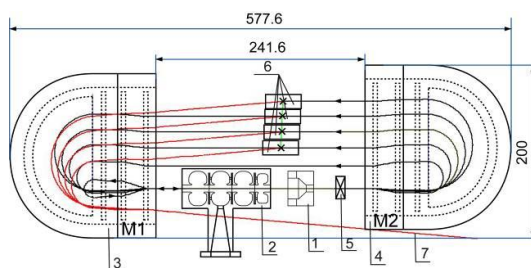


Рис. 9. Схема ускорителя: 1 – электронная пушка, 2 – ускоряющая структура, 3, 4 – поворотные магниты, 5 – квадрупольная линза, 6 – магниты вывода, 7 – траектория вывода пучка из ускорителя

Таблица 4

Основные параметры разрезного микротрона

Энергии пучков, МэВ	6, 8, 10, 12
Рабочая частота, МГц	5712
Поле поворотных магнитов, Тл	0.8
Мощность дозы, Гр/мин	10-30
Габаритные размеры, мм	578×200×123
Вес, включая платформу и вакуумную камеру, кг	< 100

В **разделе 3.2** приводится обоснование выбора четырехполюсной магнитной системы в качестве поворотного магнита и описана конструкция поворотного магнита (рис. 10, а, б). Там же описана работа настроечных элементов (плунжеров), позволяющих регулировать амплитуды магнитного поля отдельных полюсов магнита. Принцип работы настроечных плунжеров основан на изменении

магнитного сопротивления между плунжером и полюсом при перемещении плунжера, в результате чего меняется магнитный поток, проходящий через ярмо, магнитный блок и полюс и замыкающийся на плунжер. Для поворотных магнитов были рассчитаны изменения поля, при перемещении плунжеров из одного крайнего положения в другое. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Относительное изменение поля под действием плунжеров

Полюс	1	2	3	4
$ \Delta B_n/B_n , \%$	5.2	7.9	5.8	5.9

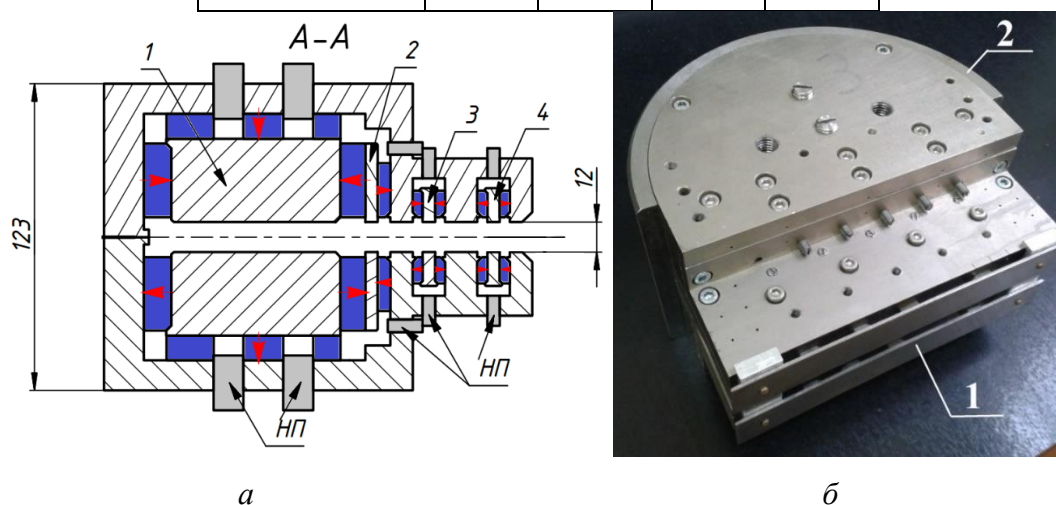


Рис. 10. (а) Поворотный магнит в разрезе: 1-4 – четыре полюса магнита, серым покрашены настроечные плунжеры (НП), синим покрашены блоки из редкоземельного магнитного материала, красными стрелочками показаны направления намагничивания блоков. (б) Собранный поворотный магнит: 1 – активный экран, 2 – стальной элемент, увеличивающий толщину ярма

В конце **раздела 3.2** приведена методика намагничивания редкоземельных блоков. Контроль значения намагниченности магнитных блоков на предприятии-изготовителе блоков осуществлялся с помощью методики, которая не гарантировала высокую точность. Чтобы установить соответствие между значениями намагниченности, измеренными на предприятии и используемыми в расчетах, применялась процедура, основанная на сопоставлении измеренного и расчетного распределений поля, создаваемого редкоземельным блоком.

В **разделе 3.3** описывается методика настройки магнитного поля поворотных магнитов. Целью настройки поворотных магнитов является обеспечение

распределения поля в рабочей области, позволяющего ускорить пучок в ускорителе без использования корректирующих магнитов. По разработанной методике сначала проводится настройка отдельных половин поворотных магнитов при установке их на стальную плиту достаточной толщины и качества поверхности. После совпадения амплитуд магнитного поля половин поворотных магнитов в пределах 1% с расчетными значениями амплитуд осуществлялась сборка магнитов. Конечными критериями качества настройки поля были, во-первых, расчеты положения орбит в измеренных полях отдельно в каждом магните и их сравнение с проектным положением. Во-вторых, расчеты траектории синхронной частицы в упрощенной модели разрезного микротрона с измеренными полями без учета фазового движения. Прохождение через ускоритель частицы по орбитам с отклонениями от оси линейного ускорителя, заметно меньшими диаметра пролетного отверстия, являлось критерием удовлетворительной настройки магнитов (рис. 11).

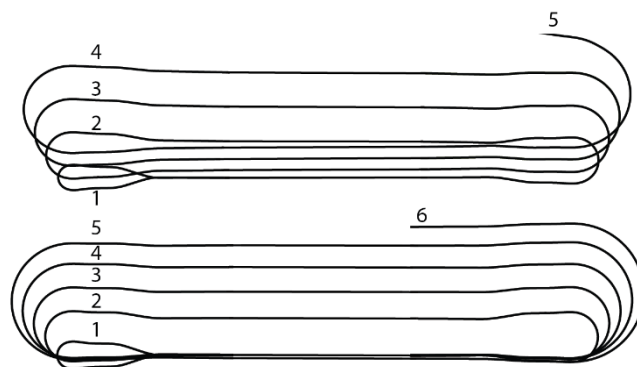
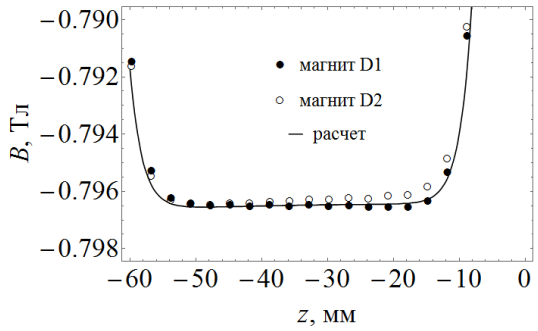


Рис. 11. Примеры траектории электрона в разрезном микротроне с измеренными полями поворотных магнитов различного качества настройки: (сверху) ускорение пучка без коррекции орбит невозможно, (снизу) пучок проходит через все орбиты с небольшим отклонением от оси линейного ускорителя

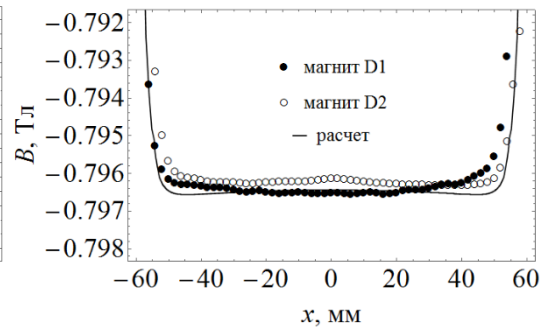
Методике измерений и оборудованию, использовавшемуся при измерениях, отведен **раздел 3.4.** Измерения магнитного поля проводились с помощью датчика Холла, соединенного с компьютером, координатного и юстировочного столов.

В **разделе 3.5** приводятся распределения магнитных полей в настроенных поворотных магнитах и результаты их анализа. Полученные в результате настройки распределения поля в медианной плоскости для магнитов изображены

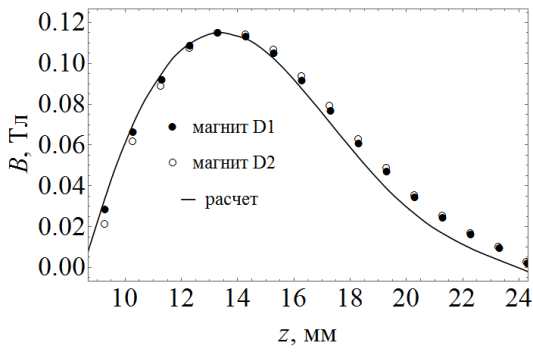
на рис. 12, а-з. На рис. 12, и, к изображены карты распределения магнитного поля в области основных полюсов.



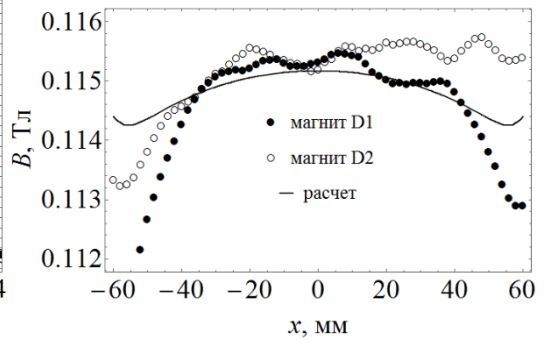
а



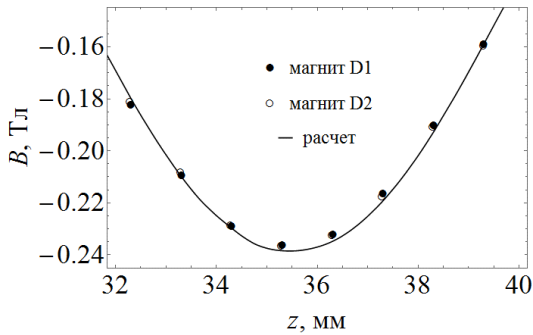
б



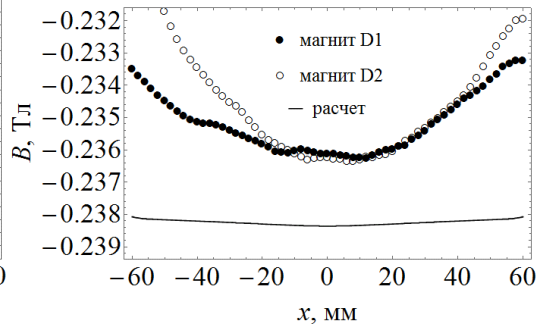
в



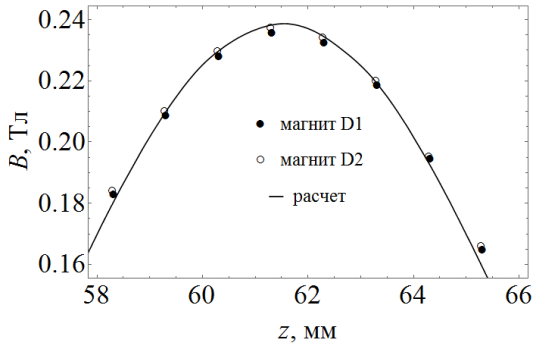
г



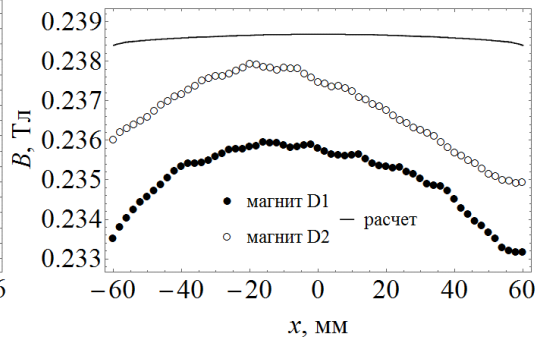
д



е



ж



з

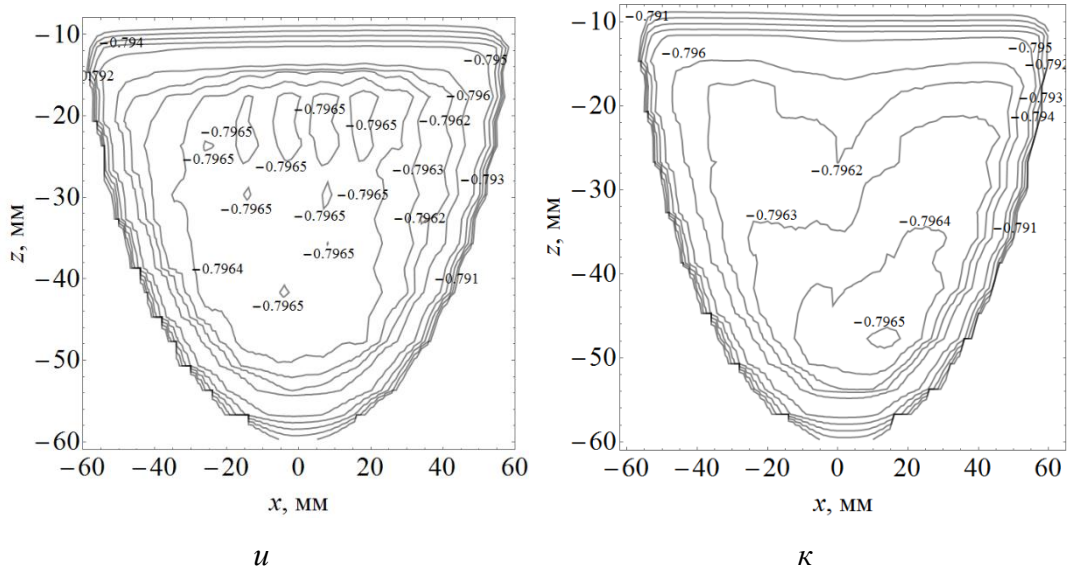


Рис. 12. Распределение магнитного поля в медианной плоскости вдоль осей z и x полюса 1 (а, б), полюса 2 (в, г), полюса 3 (д, е), полюса 4 (ж, з). Один из двух магнитов назван D1, другой – D2. Карты магнитного поля в медианной плоскости в области основного полюса магнита D1 (и) и D2 (к)

Результаты расчета траектории синхронной частицы в разрезном микротроне показывают возможность использования настроенных поворотных магнитов без дополнительных корректоров пучка. Однако магниты должны быть установлены с высокой точностью относительно оси линейного ускорителя.



Рис. 13. (а) Собранная квадрупольная линза. (б) Собранные магниты вывода

Настройка квадрупольной линзы и четырех магнитов вывода описывается в разделе 3.6. Квадрупольная линза (рис. 13, а) и магниты вывода (рис. 13, б) были спроектированы таким образом, что их сборка была выполнена без использования клея и винтов, а только с применением специальных зажимов. На рис. 14, а изображено измеренное распределение магнитного поля в плоскости xz линзы. На рис. 14, б показаны распределения интегралов $I_x(x = 0, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_x(x = 0, y, z) dz$,

$I_y(x, y = 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_y(x, y = 0, z) dz$, из которых следует, что $(L_{\text{eff}} G_{\text{eff}})_y = 0.0349$ Тл и $(L_{\text{eff}} G_{\text{eff}})_x = -0.0345$ Тл, где L_{eff} , G_{eff} – эффективные длина и градиент поля. Эти значения лежат в диапазоне, обеспечивающем устойчивые поперечные колебания пучка в разрезном микротроне.

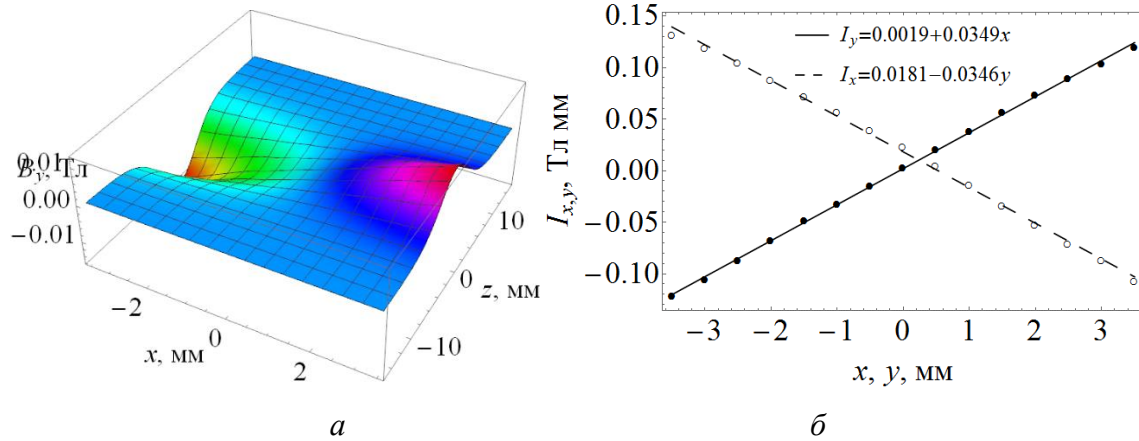


Рис. 14. (а) Магнитное поле квадрупольной линзы в плоскости xz . (б) Графики функций $I_y(x, y = 0)$ и $I_x(x = 0, y)$

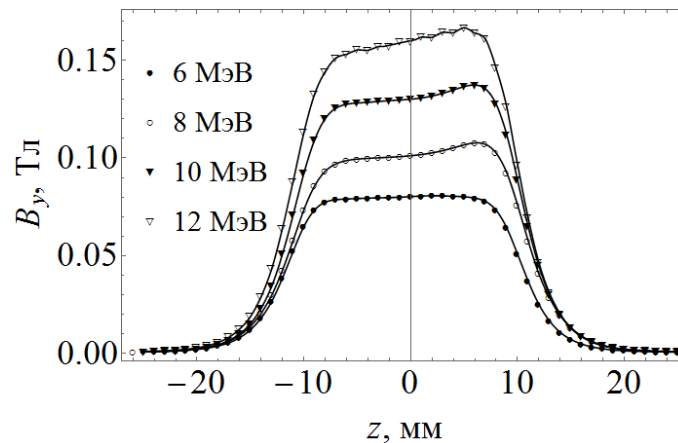


Рис. 15. Магнитное поле $B_y(z)$ вдоль магнитов вывода

На рис. 15 изображены распределения магнитных полей $B_y(z)$ вдоль магнитов вывода. Неоднородность полей в центральной части магнитов вызвана неоднородностью намагничивания редкоземельных блоков и не имеет существенного значения для выводимого из ускорителя пучка. Важной характеристикой магнитов вывода является интеграл $I_y = \int_{-\infty}^{+\infty} B_y(z) dz$, от которого зависит угол поворота электрона. В табл. 6 записаны проектные и измеренные значения интегралов I_y . Отличие между ними составляет около 1%. Следовательно, ошибка угла поворота выводимого пучка будет меньше 1 мрад.

Вертикальное отклонение пучка из-за наличия паразитного поля B_x магнитов также меньше 1 мрад.

Таблица 6

Интегралы поля магнитов вывода

Орбита	Энергия	$I_{y,proj}$	$I_{y,meas}$
3	6.009 МэВ	1.89 Тл мм	1.89 Тл мм
4	8.036 МэВ	2.47 Тл мм	2.49 Тл мм
5	10.048 МэВ	3.05 Тл мм	3.08 Тл мм
6	12.055 МэВ	3.63 Тл мм	3.66 Тл мм

Заключение содержит основные результаты, полученные в диссертационной работе.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *Vladimirov I., Pakhomov N., Shvedunov V., Kubyshin Y., et al.* End magnets with rare earth permanent magnet material for a compact race-track microtron. // Eur. Phys. J. Plus, **129**, 271, 2014. DOI: 10.1140/epjp/i2014-14271-3
2. *Владимиров И., Пахомов Н., Шведунув В., Кубышин Ю. и др.* Квадрупольная линза и магниты вывода компактного разрезного микротрона. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., № 6, 2014, С. 70-74. <http://vmu.phys.msu.ru/file/2014/6/070.pdf>
3. *Владимиров И., Каманин А., Пахомов Н., Шведунув В., и др.* Спектрометр для эксперимента GunLab. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., № 1, 2016, С. 66-71.
4. *Kubyshin Yu., Rigla J., Vladimirov I., Pakhomov N., et al.* Performance of the magnetic system of a 12 MeV UPC race-track microtron. // Proceedings of RUPAC2012, 2012, P. 472-474. <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/rupac2012/papers/weppc014.pdf>
5. *Vladimirov I., Pakhomov N., Shvedunov V., Zakharov V., et al.* Rare-earth end magnets of a miniature race-track microtron and their tuning. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 1277-1279. <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2014/papers/tupro100.pdf>

6. *Vladimirov I., Pakhomov N., Shvedunov V., Zakharov V., et al.* Quadrupole lens and extraction magnets of a miniature race-track microtron. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 1283-1285.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tupro102.pdf>
7. *Völker J., Barday R., Jankowiak A., Kamps T., et al.* Introducing GunLab – a compact test facility for SRF photoinjectors. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 630-632.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri020.pdf>
8. *Vladimirov I., Shvedunov V., Kamps T., Voelker J.* Spectrometer for SRF gun. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 3608-3610.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/thpme150.pdf>

Работы [1-3] удовлетворяют требованиям ВАК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Coupric M.E.* Panorama of new generation of accelerator based short wavelength coherent light sources. // Nucl. Instr. and Meth. B, **364**, 2015, P. 4-15. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.08.084
2. *Pellegrini C., Stöhr J.* X-ray free-electron lasers – principles, properties and applications. // Nucl. Instr. and Meth. A, **500**, 2003, P. 33-40. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00739-3
3. *Pellegrini C.* The history of X-ray free-electron lasers. // Eur. Phys. J. H, **37**, 2012, P. 659-708. DOI: 10.1140/epjh/e2012-20064-5
4. *Benson S., Borland M., Douglas D., Dowell D., et al.* X-ray sources by energy recovered linacs and their needed R&D. // Nucl. Instr. and Meth. A, **637**, 2011, P. 1-11. DOI: 10.1016/j.nima.2010.07.090
5. *Wilson I.* The compact linear collider CLIC. // Phys. Rep., 403-404, 2004, P. 365-378. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.08.028
6. *Bacci A., Alesini D., Antici P., Bellaveglia M., et al.* Electron Linac design to drive bright Compton back-scattering gamma-ray sources. // J. Appl. Phys., **113**, 194508, 2013. DOI: 10.1063/1.4805071
7. *Du Y., Yan L., Hua J., Du Q., et al.* Generation of first hard X-ray pulse at Tsinghua Thomson Scattering X-ray Source. // Rev. Sci. Instrum. **84**, 5, 2013. DOI: 10.1063/1.4803671

8. *Variola A., Auguste D., Blin A., Bonis J., et al.* The ThomX project status. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 2062-2064.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/wepro052.pdf>
9. *Huang Z., Ruth R.D.* Laser-electron storage ring. // Phys. Rev. Lett, **80**, 1998, P. 976–979. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.976
10. *Bessonov E.G., Gorbunkov M.V., Tunkin V.G., Fechtchenko R.M., et al.* Proposal of a compact repetitive dichromatic X-ray generator with millisecond duty cycle for medical applications. // Proc. of SPIE, 6024, 2005. DOI: 10.1117/12.666807
11. *Артюков И.А., Бессонов Е.Г., Виноградов А.В., Горбунков М.В., и др.* Лазерно-электронный генератор рентгеновского излучения. // Поверхность, №8, 2007, С. 3-11.
12. *Bessonov E.G., Gorbunkov M.V., Maslova Yu.Ya., Kostryukov P.V., et al.* Relativistic Thomson scattering in compact linacs and storage rings: a route to quasi-monochromatic tunable laboratory-scale X-ray sources. // Proc. of SPIE, 6702, 2007. DOI: 10.1117/12.732010
13. *Bessonov E.G., Gorbunkov M.V., Ishkhanov B.S., Kostryukov P.V., et al.* Laser-electron generator for X-ray applications in science and technology. // Laser Part. Beams, **26**, 03, 2008, P. 489-495. DOI: 10.1017/S0263034608000505
14. *Völker J., Barday R., Jankowiak A., Kamps T., et al.* Introducing GunLab – a compact test facility for SRF photoinjectors. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 630-632.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri020.pdf>
15. *Völker J., Kamps T.* Fast transverse phase space measurement system for GunLab – a compact test facility for SRF photoinjectors. // Proceedings of IBIC2014, 2014, P. 588-591.
<http://www.slac.stanford.edu/econf/C140914/papers/wepf19.pdf>
16. *Jankowiak A., Abo-Bakr M., Anders W., Kamps T., et al.* bERLinPro – a compact demonstrator ERL for high current and low emittance beams. // Proceedings of LINAC2010, 2010, P. 407-409.
<http://epaper.kek.jp/LINAC2010/papers/tup007.pdf>
17. *Abo-Bakr M., Anders W., Burrill A., Barday R., et al.* Status of the HZB ERL project bERLinPro. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 340-342.

18. *Ishkhanov B.S., Pakhomov N.I., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., et al.*
Conceptual design of the miniature electron accelerator dedicated to IORT. // Proceedings of RuPAC XIX, 2004, P. 474-476.
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/r04/papers/TUJP15.PDF>
19. *Floettmann K.* ASTRA. A space charge tracking algorithm. // DESY, 2014.
<http://www.desy.de/~mpyflo/>
20. CST code // <https://www.cst.com>. Лицензия ООО “ЛЭУ МГУ”.
21. *Mouton B.* The PARMELA program. Version 4.03. // LAL/SERA 93-455, 1995.
22. *Menzel M., Stokes H.* User’s guide for the POISSON/SUPERFISH. Group of codes. // LA-UR-87-115, 1987.
http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml