МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ханкин Вадим Валерьевич

Экспериментальное исследование динамики пучков в импульсном линейном ускорителе и разрезном микротроне

Специальность 01.04.20
Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математическихнаук

Москва - 2020

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова и в Лаборатории электронных ускорителей МГУ.

Научный руководитель	**Шведунов Василий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты	**Фещенко Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук, ФГБУН ИЯИ РАН, заместитель директора по научной работе
	Каминский Владимир Ильич, доктор технических наук, профессор, НИЯУ МИФИ, начальник отдела
	Шемухин Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, НИИЯФ МГУ, заведующий лабораторией

Защита диссертации состоится 06 ноября 2020 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы 1, строение 5 (19 корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией, а также со сведениями о регистрации участия в удаленном интерактивном режиме в защите можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА» https://istina.msu.ru/dissertations/321883905/
и в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27).

Автореферат разослан "___" _____ 2020 г.

Телефон совета для справок: +7 916 8717750

E-mail: galan_lidiya@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень её разработанности

Область применения ускорителей электронов на средние и низкие энергии очень широка. Это, в том числе, неразрушающий контроль в промышленности, инспекционно-досмотровые комплексы, антимикробная обработка продуктов питания, лучевая терапия, стерилизация медицинских изделий, наработка радиоактивных изотопов, исследования в области строения ядра и многое другое. Использование для этих целей импульсных линейных ускорителей и разрезных микротронов обусловлено такими их качествами, как компактность, высокая эффективность, широкий диапазон доступных энергий и токов ускоренных пучков.

В НИИЯФ МГУ в течение многих лет разрабатываются ускорители электронов с энергией в диапазоне от 1 до 100 МэВ. К их числу относятся импульсный линейный ускоритель с максимальной энергией 10 МэВ и импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ, результаты экспериментального исследования динамики пучка в которых представлено в настоящей работе.

Линейный ускоритель электронов с возможностью регулирования в широких пределах основных параметров ускоренного пучка – энергии, импульсного тока, длительности и частоты следования импульсов, размера пучка на выпускном окне – позволит создавать высокоэффективные комплексы радиационной обработки продукции с различной поверхностной плотностью и различными значениями требуемых доз. Отметим, что используемые в настоящее время для радиационной обработки продукции мощные ускорители электронов работают, как правило, при фиксированных значениях всех основных параметров, за исключением, возможно, частоты следования импульсов, что существенно снижает диапазон обрабатываемой продукции и эффективность использования электронного пучка.

Разрезной микротрон дает возможность получить энергию ускоренного пучка до 100 МэВ и высокую эффективность использования СВЧ энергии при существенно меньших, по сравнению с линейным ускорителем, размерах и существенно меньшей стоимости. Эти качества определяют области применения разрезного микротрона: фундаментальные исследования в области строения ядра в рамках небольшой лаборатории, лучевая терапия электронным пучком, наработка радиоизотопов, детектирование скрытых взрывчатых веществ и другие. В тоже время, особенности динамики пучка в разрезном микротроне – узкая область продольной фазовой стабильности, значительный путь, проходимый пучком до достижения конечной энергии, ограниченный большим количеством апертур, существенное влияние на токопрохождение неоднородности поля поворотных магнитов и ошибок установки элементов, делают настройку ускорителя крайне сложной задачей. В этой связи, разработка методики настройки РМ, учитывающей все особенности динамики пучка, является весьма актуальной задачей.

Современные методы численного моделирования и трехмерные программные комплексы позволяют осуществлять расчеты отдельных элементов ускорителей и динамики пучка с высокой точностью. Однако промоделировать взаимосвязь всех существенных параметров линейного ускорителя с целью выработки алгоритма управления при изменении режима его работы, промоделировать во всех деталях процедуру настройки разрезного микротрона не представляется возможным. Для решения указанных задач и необходимо экспериментальное исследование динамики пучка.

Цель работы

Цель диссертационной работы заключалась в экспериментальном исследовании динамики пучков в импульсном линейном ускорителе на максимальную энергию 10 МэВ и в импульсном разрезном микротроне на энергию 55 МэВ для выработки алгоритмов управления этими ускорителями

и их настройки. Для решения указанных задач разработаны методики измерения параметров пучка, созданы экспериментальные стенды, проведены измерения, выполнен анализ полученных результатов с привлечением различных моделей, установлена взаимосвязь параметров пучка с установленными параметрами и режимами работы элементов и систем ускорителей, выработаны алгоритмы управления и настройки.

Наряду с этим, в диссертации представлены результаты различных экспериментов на пучках линейного ускорителя и разрезного микротрона, выполненных автором диссертации или при его непосредственном участии.

Научная новизна

В настоящей диссертационной работе представлены результаты экспериментального исследования динамики пучка в импульсном линейном ускорителе электронов на энергию 10 МэВ и импульсном разрезном микротроне на энергию 55 МэВ. Эти ускорители, по сравнению с аналогами, содержат ряд новых решений, требующих проведения детальных исследований и разработки методик настройки. В частности, особенностью линейного ускорителя, предназначенного для реализации различных радиационных технологий, отличающего его от известных аналогов, является возможность регулирования параметров пучка, в первую очередь его энергии и мощности, в широких пределах за счет изменения параметров режима работы. Разрезной микротрон также содержит ряд новых, впервые примененных решений, в частности, оригинальную систему инжекции низкоэнергетичного пучка; магнитное зеркало на базе поворотного магнита, отражающее пучок после первого ускорения и обеспечивающее подстройку фазы пучка на второй орбите без использования дополнительных магнитных элементов; оригинальную систему вывода пучка с последней орбиты.

Объект и предмет исследования

Объектом изучения в настоящей работе являлись стенды линейного импульсного ускорителя электронов на энергию 10 МэВ и импульсного разрезного микротрона на энергию 55 МэВ. В качестве предмета исследования рассматривалась динамика пучков в этих стендах.

Методология исследования

Для расчёта электронных пушек использовалась программа EGUN, для расчёта электромагнитных полей – программа SUPERFISH, для расчёта динамики пучка в ускоряющей структуре – программа PARMELA, для расчёта динамики пучка в разрезном микротроне – программа RTMTRACE. Экспериментальное исследование динамики пучка проводилось с использованием магнитоиндукционных датчиков тока, поглотителей пучка, радиационно-чувствительной плёнки, видео-фиксации синхротронного и переходного излучения, прецизионных калориметрических приборов.

Достоверность

Достоверность результатов работы подтверждается хорошим соответствием измеренных характеристик расчетным данным, совпадений результатов измерений, проведенных с использованием различных методик, достижением проектных параметров ускорителей.

Практическая и теоретическая значимость

Представленные в данной работе ускорители используются в НИИЯФ МГУ для проведения фундаментальных и прикладных исследований, в том числе с помощью методик, разработанных автором, что нашло отражение в соответствующих разделах диссертации.

На основе полученных в работе результатов создан не имеющий аналогов промышленный образец импульсного линейного ускорителя на энергию 10 МэВ и импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ.

Положения, выносимые на защиту

1. На основе исследуемой ускоряющей структуры за счёт выбора параметров питания электронной пушки и клистрона возможно создание ускорителя с регулированием энергии в диапазоне от 5 МэВ до 10 МэВ и средней мощности от сотен ватт до 15 кВт.
2. Для исследуемой ускоряющей структуры максимальная средняя мощность ускоренного пучка 17 кВт достигается при энергии 8.5 МэВ, электронный кпд ускоряющей структуры при этом превышает 70%.
3. Обратная бомбардировка катода электронной пушки значительно влияет на работу линейных ускорителей с большой средней мощностью пучка.
4. Использование поворотных магнитов в качестве спектрометра позволяет определить энергию однократно и двукратно ускоренного пучка, что даёт возможность с высокой точностью настроить уровень ускоряющего поля и взаимное положение ускоряющей структуры и поворотных магнитов.
5. Синхротронное излучение, генерируемое пучком в поворотных магнитах, является источником важной информации о положении пучка на орбитах, дополняя данные о токе пучка с магнитоиндукционных датчиков, и ускоряя процедуру настройки разрезного микротрона.

Личный вклад

Все результаты, приведённые в работе, получены автором или при непосредственном участии автора, кроме случаев, отдельно оговоренных в тексте диссертации. А именно, автором, либо при непосредственном участии автора: проведены дополнительные расчёты для линейного ускорителя электронов на энергию 10 МэВ, создано два стенда линейного ускорителя, разработаны методики измерения параметров пучка линейного ускорителя, проведены измерения параметров пучка линейного ускорителя, разработаны методики настройки линейного ускорителя, проведено ряд работ на пучке линейного ускорителя, создан стенд разрезного микротрона на энергию 55 МэВ, разработана методика настройки разрезного микротрона и

измерения параметров его пучка, проведены измерения параметров пучка разрезного микротрона, проведено ряд прикладных и фундаментальных исследований на пучке разрезного микротрона.

Место выполнения работы

Работа выполнена в отделе электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в период с 2007 по 2020 год.

Апробация работы и публикации

Основные научные результаты и положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, 8 из которых в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI.

Статьи в журналах из списков Scopus, WoS, RSCI

1. S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, V.I. Shvedunov, K.A. Stopani, Studying photonuclear reactions using the activation technique, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2014, v. 745, p. 133-137 (IF-1.265)
2. S.S. Belyshev, D.M. Filipescu, I. Gheoghe, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, V.N. Orlin, N.N. Peskov, K.A. Stopani, O. Tesileanu, V.V. Varlamov, Multinucleon photonuclear reactions on 209Bi: Experiment and evaluation, European Physical Journal A, 2015, v. 51, p. 67-75 (IF-2.176)
3. А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, А.И. Карев, Н.И. Пахомов, Н.П. Собенин, Н.В. Шведунов, А.Н. Каманин, Е.Е. Журавлев, Многоцелевой импульсный разрезной микротрон на энергию 55МэВ, Приборы и техника эксперимента, 2018, № 2, с. 20-37 (RINC-0.737)

4. В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, Расчёт и измерение эффекта обратной бомбардировки катода в технологическом линейном ускорителе электронов со стоячей волной, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2020, № 1, с. 37-41 (RINC-1.01)
5. Е.Е. Журавлев, А.И. Карев, В.Б. Лопатко, В.В. Ханкин, С.Н. Черепня, В.И. Шведунов, Фотоядерная технология обнаружения скрытых взрывчатых веществ, Ядерная физика и инжиниринг, 2017, том 8, № 4, с. 336-343 (RINC-0.112)
6. V.I. Shvedunov, A.S. Alimov, A.N. Ermakov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, L.Yu Ovchinnikova, N.I. Pakhomov, N.V. Shvedunov, D.S. Yurov, I.V. Shvedunov, A.S. Simonov, Electron accelerators design and construction at Lomonosov Moscow State University, Radiation Physics and Chemistry, 2019, v. 159, p. 95-100 (IF-2.226)
7. Р.А. Алиев, С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, Исследование возможности получения и выделения радиоизотопа 18F на ускорителях электронов, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия 2014 №3, с. 29-32 (RINC-1.01)
8. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, А.С. Курилик, К.А. Стопани, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, Образование 18F в реакции 19F(γ, n), Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2013, том 77, № 4, с. 531-534 (RINC-0.47)

Статьи в сборниках

1. A.I. Karev, A.N. Lebedev, V.G. Raevsky, A.N. Ermakov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, N.P. Sobenin, L. Brothers, L. Wilhide, 55 MeV special purpose race-track microtron commissioning, XXII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2010 Contributions to the Proceedings, p. 316-318

2. A.N. Ermakov, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, A.I. Karev, V.G. Raevsky, Operational Experience with 55 MeV Pulsed RTM, XXIII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2012 Contributions to the Proceedings, p. 538-540
3. A.S. Alimov, E.A. Alimov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, A.V. Gryzlov, S.V. Lamonov, A.P. Musatov, V.N. Sigalaev, Beam Parameters Measurement Of Technological 10 Mev Linac, XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2008, г. Звенигород, Россия, стр. 267-269
4. A.N. Ermakov, V.V. Khankin, A.S. Alimov, V.V. Klementiev, L.Yu. Ovchinnikova, N.I. Pakhomov, Yu.N. Pavshenko, A.S. Simonov, N.V. Shvedunov, V.I. Shvedunov, Commissioning of High Efficiency Standing Wave Linac for Industrial Applications, in Proc. RuPAC 2016, pp. 99-101

Доклады на научных конференциях

Основные научные результаты диссертации докладывались на конференциях:

1. A.S. Alimov, E.A. Alimov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, V.N. Sigalaev, V.I. Shvedunov, A.V. Gryzlov, S.V. Lamonov, A.P. Musatov, N.I. Pakhomov, Beam Parameters Measurement Of Technological 10 Mev Linac XXI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC -2008, Zvenigorod, Russia, 2008
2. Brothers L., A.N. Ermakov, A.N. Kamanin, A.I Karev., V.V. Khankin, A.N. Lebedev, N.I. Pakhomov, V.G. Raevsky, V.I. Shvedunov, Sobenin N.P., Wilhide L., 55 MeV special purpose race-track microtron commissioning XXII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2010, Protvino, Russia, 2010
3. A.I. Karev, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.G. Raevsky , V.I. Shvedunov, Operational Experience with 55 MeV Pulsed RTM RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, 2012

4. В.В. Ханкин, А.Н. Ермаков, А.С. Курилик, В.И. Шведунов Планирование облучения и регулирование параметров технологического ускорителя на энергию 10 МэВ, III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017", Москва, Россия, 2017
5. А.Н. Ермаков, В.В. Ханкин, Д.С. Юров, В.И. Шведунов, Л.Ю. Овчинникова , Результаты проведения пусковых работ мощного промышленного ускорителя Ломоносовские чтения-2018, секция "Ядерная физика", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 2018
6. V.V. Khankin, A.S. Alimov, A.N. Ermakov, A.N. Kamanin, A.S. Kurilik, N.I. Pakhomov, N.V. Shvedunov, V.I. Shvedunov, D.S. Yurov, I.V. Shvedunov, A.S. Simonov, Linear Electron Accelerator for Radiation Technologies with Beam Parameters Varied in a Wide Range, 29th Linear Accelerator Conference LINAC18, Beijing, China, 2018

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. В диссертации 128 страниц, 98 рисунков, 13 таблиц, список литературы содержит 65 ссылок.

Содержание диссертации.

Во **введении** определяется актуальность избранной темы, степень ее разработанности, цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В **первой главе** приведены результаты расчетов ускоряющей структуры и динамики пучка линейного ускорителя на энергию 10 МэВ, полученные ранее другими авторами [1,2], а также результаты

дополнительных расчетов, выполненных автором диссертации. В таблице 1 представлены параметры ускорителя, полученные в результате этих расчётов.

Таблица 1. Расчетные характеристики линейного ускорителя.

Напряжение на первом аноде электронной пушки	-50 кВ
Напряжение на управляющем электроде электронной пушки[1]	12,9 кВ
Импульсное значение тока пушки	750 мА
Импульсное значение ускоренного тока	450 мА
Средняя энергия ускоренного пучка электронов	9,9 МэВ
Коэффициент захвата[2]	60%
Электронный кпд	75%
Величина энергетического разброса на выходе структуры	0,6 МэВ
Фазовая ширина ускоренного сгустка	25°
Среднеквадратичный радиус пучка на выходе структуры	1,868 мм
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс	12,5 мм×мрад
Среднеквадратичная расходимость ускоренного пучка	1,21 мрад
Импульсная мощность потерь пучка	68,1 кВт
Импульсная мощность СВЧ потерь в ускоряющей структуре	1,5 МВт

Показывано, что, меняя уровень ускоряющего поля, можно регулировать энергию пучка в диапазоне от 5 до 10 МэВ. Для реализации этой возможности проведены дополнительные расчёты, определяющие требования к системам высоковольтного и СВЧ питания стендов, а именно: получены зависимости (Рис. 1) от требуемой энергии пучка мощности клистрона и напряжения на управляющем электроде электронной пушки. Последнее должно компенсировать падение коэффициента захвата пучка в процесс ускорения с энергией для сохранения согласования ускоряющей структуры с питающим волноводом.

[1] Относительно катода.

[2] Доля частиц в пределах указанного энергетического разброса и фазовой ширины сгустка.

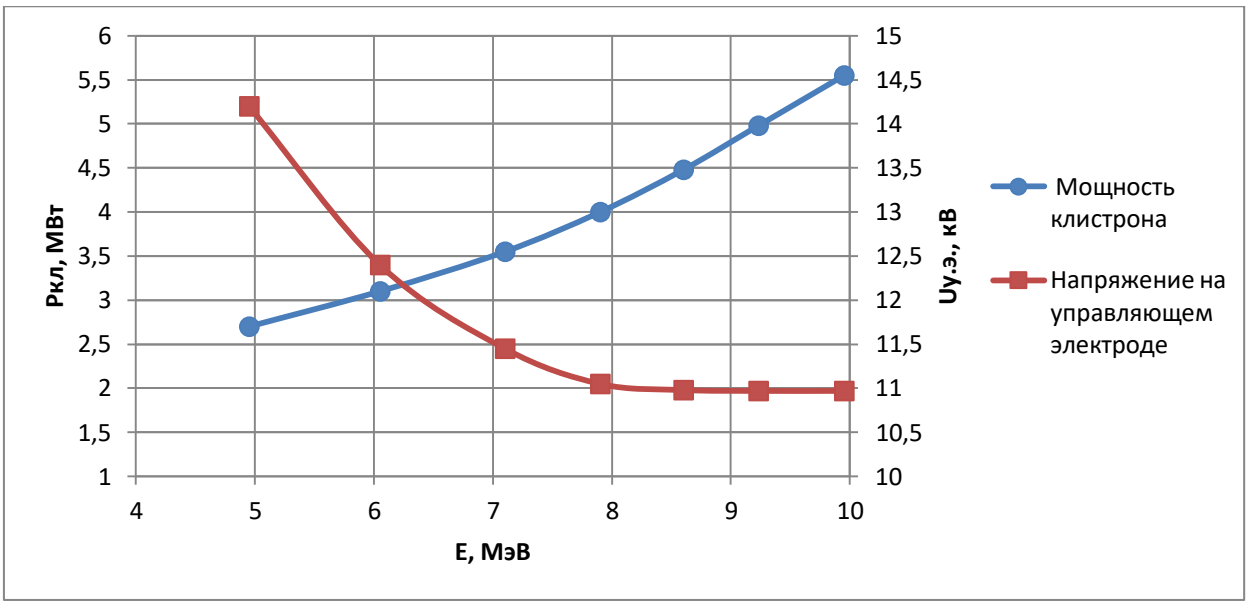

Рис. 1. Зависимость мощности клистрона и напряжения на управляющем электроде пушки от требуемой энергии пучка.

Во второй части первой главы описываются стенды [3, 4], созданные для проверки результатов расчетов и экспериментального исследования различных режимов работы ускорителя. Было создано два стенда, включающих электронную пушку, ускоряющую структуру, магнитооптическую систему, систему СВЧ питания, систему высоковольтного питания, систему измерения параметров ускоренного пучка, вакуумную систему и систему охлаждения.

Электронные пушки и ускоряющие структуры обоих стендов имеют идентичную внутреннюю геометрию, но, по результатам работ на стенде №1, систему охлаждающих каналов структуры стенда №2 упростили, так же у структуры стенда №2 увеличен коэффициент связи с питающим волноводом: 3,89 против 2,88 у структуры стенда №1.

Магнитооптические системы обоих стендов аналогичны и состоят из корректирующих дипольных магнитов и фокусирующей соленоидальной линзы, в конструкцию которой были внесены изменения по результатам работ на стенде №1 – соленоид стенда №2 включает магнитный экран, ограничивающий область распространения магнитного поля.

Системы СВЧ питания, высоковольтного питания и измерения параметров пучка существенно различны.

Питание ускоряющей структуры стендов осуществляется от импульсного усилительного многолучевого клистрона КИУ-147А производства АО «НПП «Торий» с максимальной импульсной и средней мощностью соответственно 6 МВТ и 25 кВт. Система СВЧ питания стенда №1 построена по автоколебательному принципу [5], стенда №2 - реализует режим внешнего возбуждения клистрона от высокостабильного задающего генератора с перестраиваемой частотой. Автоколебательная схема не требует задающего генератора и СВЧ усилителя, позволяет автоматически отслеживать изменения резонансной частоты ускоряющей структуры и работать без изолирующего ферритового вентиля между структурой и клистроном, однако стабильная работа возможна только на нелинейном участке амплитудной характеристики клистрона в области перевозбуждения, что затрудняет процесс регулирования энергии ускоренного пучка. Кроме того, время, необходимое на установление автоколебаний, может составлять заметную часть длительности импульса модулятора, это снижает эффективность ускорителя. Схема с высокостабильным задающим генератором с цифровым управлением и СВЧ усилителем свободна от указанных недостатков, но требует наличия системы автоподстройки частоты и изолирующего ферритового вентиля.

Источниками высоковольтного питания клистрона стендов служили модуляторы, основанные на различных принципах, но с близкими характеристиками высоковольтных импульсов. Существенным отличием стенда №2 является независимое от клистрона высоковольтное питание электронной пушки. В отличие от стенда №1, где питание на клистрон и катод пушки подаётся от общего источника, а напряжение на управляющем электроде пушки задаётся делителем напряжения, независимое питание позволяет регулировать режим работы ускорителя в соответствии с

зависимостями, приведенными на Рис. 1, что заметно увеличивает его КПД, особенно в области низких энергий ускоренных электронов.

Система измерения характеристик пучка стенда №1 показана на Рис. 2. Система позволяет измерять:

1. осциллограммы импульсных токов пучка с магнитоиндукционного датчика, расположенного на оси ускоряющей структуры, и с цилиндров Фарадея, нагруженных на сопротивление 50 Ом и расположенных на пути прямого ускоренного пучка и пучка, отклонённого магнитом спектрометра;
2. распределение заряда ускоренного пучка в поперечном сечении с помощью переходного излучения, генерируемого на экране из титановой фольги и фиксируемого CCD камерой;
3. спектр пучка спектрометром на основе 45-градусного поворотного магнита и цилиндра Фарадея 2;
4. среднюю мощность ускоренного пучка калориметром 2 и мощность СВЧ потерь в стенках ускоряющей структуры калориметром 1.

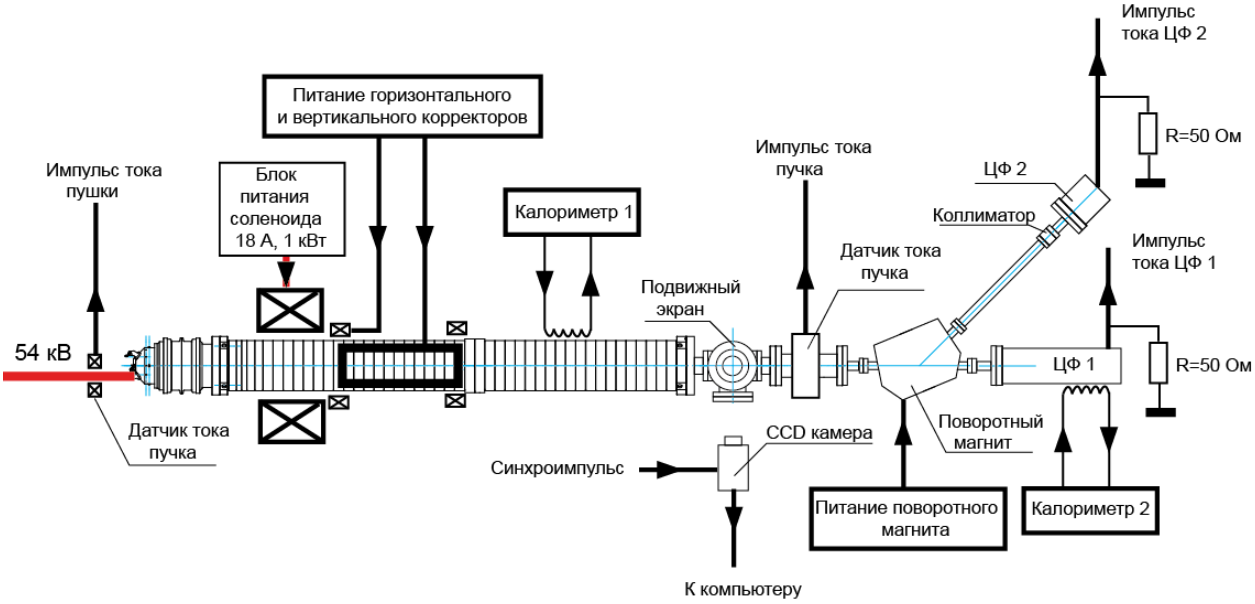

Рис. 2. Система измерения параметров ускоренного пучка стенда №1.

Для стенда №2 использовались две системы измерений. Первая, показанная на Рис. 3, аналогична системе стенда №1, при этом средняя энергия пучка оценивалась по отношению средней мощности к среднему

току, измеряемым с помощью цилиндра Фарадея, и устанавливалась связь средней энергии и средней мощности СВЧ потерь в стенках ускоряющей структуры, измеренной калориметром, включающим вычислитель тепловой энергии 2.

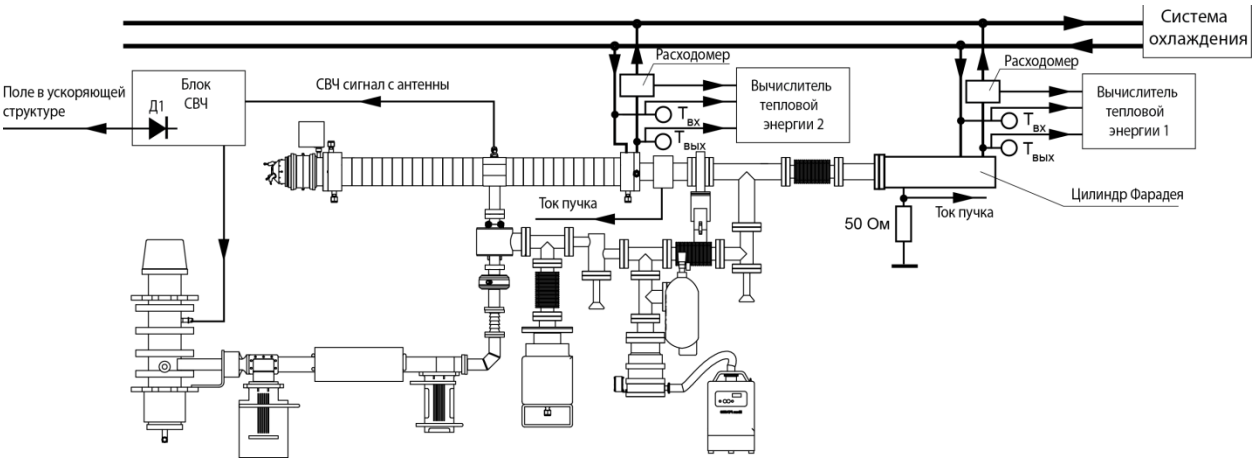

Рис. 3. Первая система измерения параметров ускоренного пучка стенда №2.

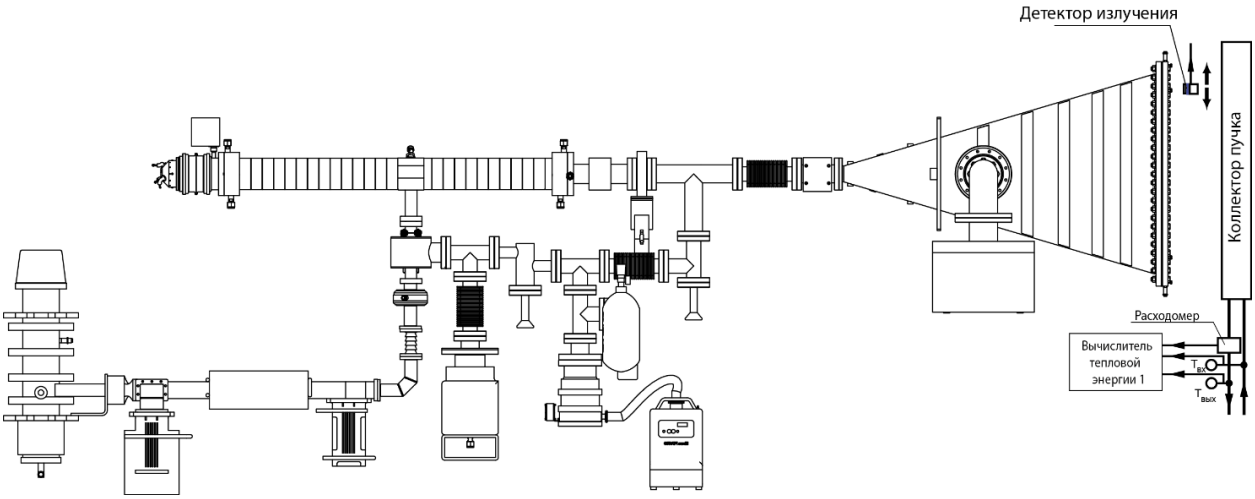

Рис. 4. Вторая система измерения параметров ускоренного пучка стенда №2.

Во второй системе (Рис. 4) цилиндр Фарадея заменяется камерой развёртки для измерения параметров выведенного в атмосферу пучка, при этом магнитоиндукционный датчик и система измерения мощности СВЧ потерь в стенках ускоряющей структуры позволяют напрямую сравнивать результаты, полученные в обеих измерительных схемах. Вторая система позволяет проверить работоспособность ускорителя на максимальной средней мощности 15 кВт и оценить энергию ускоренного пучка несколькими независимыми способами:

1. аналогично первой измерительной системе, средняя энергия оценивается по отношению средней мощности, выделяемой в коллекторе пучка, к среднему току, однако в данном случае необходимо учесть существенные систематические погрешности, связанные с утечками мощности и заряда;
2. спектр ускоренного пучка определяется по измерению цилиндром Фарадея малого поперечного сечения или радиохромной плёнкой угла отклонения пучка в известном магнитном поле сканирующего магнита;
3. эффективная энергия пучка определяется в соответствии с нормами [6] по кривой поглощённой дозы, для чего используется мишень из стопки алюминиевых пластин, проложенных радиохромной плёнкой.

Вторая глава посвящена описанию результатов измерений параметров пучка на стендах №1 и 2.

Измерения тока ускоренного пучка и коэффициента захвата на стенде №1 проведены в зависимости от выходной мощности клистрона. При этом клистрон работал в режиме перевозбуждения, а его выходная мощность регулировалась посредством изменения амплитуды высоковольтного импульса модулятора. В силу используемой на стенде схемы подключения пушки к высоковольтному модулятору, ток пушки в процессе измерения менялся вместе с выходной мощностью клистрона. Ток ускоренного пучка, при его энергии близкой к 10 МэВ, и токе пушки около 800 мА соответствует расчётному значению 400 мА. Коэффициент захвата в зависимости от мощности клистрона (Рис. 5) изменяется в пределах от 30% до 55%, что так же близко к результатам расчёта при выключенной соленоидальной линзе.

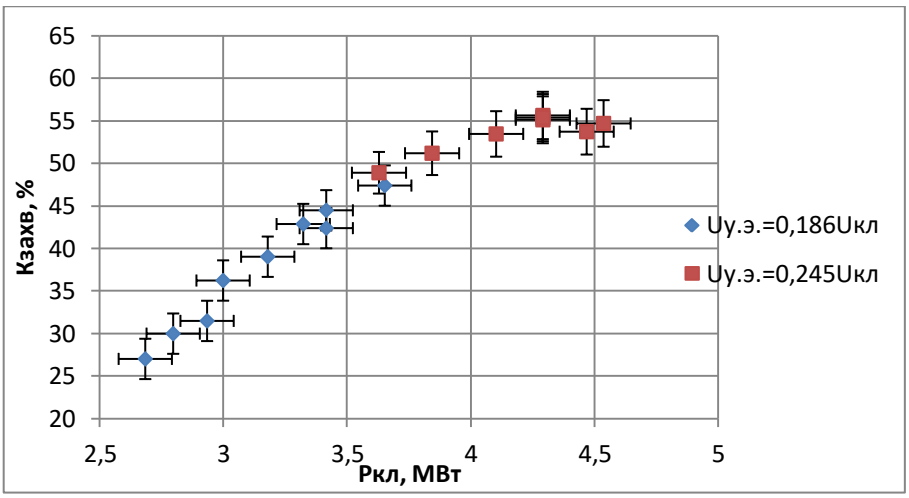

Рис. 5. Зависимость коэффициента захвата от импульсной мощности клистрона.

Энергетические спектры измерены при фиксированной на значении около 50 кВ амплитуде импульсов высоковольтного модулятора, а уровень поля в структуре регулировался выходной мощностью клистрона посредством изменения ослабления цепи обратной связи, а также нагрузкой током пучка. Примеры полученных спектров показаны на Рис. 6. Таким образом, продемонстрирована возможность изменения энергии максимума спектра в расчётных пределах. Однако ширины спектров заметно больше расчётных. Это обусловлено наличием фронтов и неравномерностью вершины огибающей импульса ускоряющего поля.

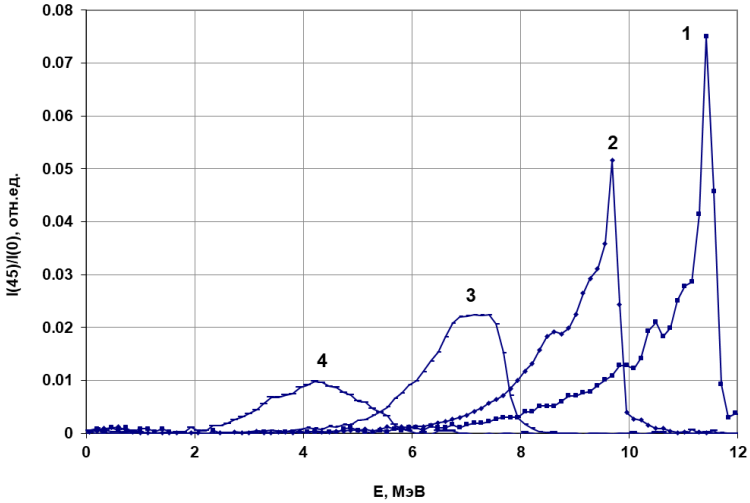

Рис. 6. Измеренные спектры пучка для различных режимов работы ускорителя.

По результатам регистрации переходного излучения, генерируемого пучком, можно оценить распределение заряда в поперечной плоскости. Эта информация важна для оценки корректности результатов расчёта динамики пучка. На Рис. 7 приведена зависимость измеренного и рассчитанного среднеквадратичного радиуса пучка на выходе ускоряющей структуры от тока соленоида. Качественно зависимости сходны, а при токах соленоида более 6А, когда фокусирующие силы магнитного поля соленоида начинают играть важную роль, значения радиусов близки. Полученные результаты в целом подтверждают надёжность методики расчетов, однако существенное различие радиусов при малых токах соленоида говорит об определенных ограничениях используемых моделей.

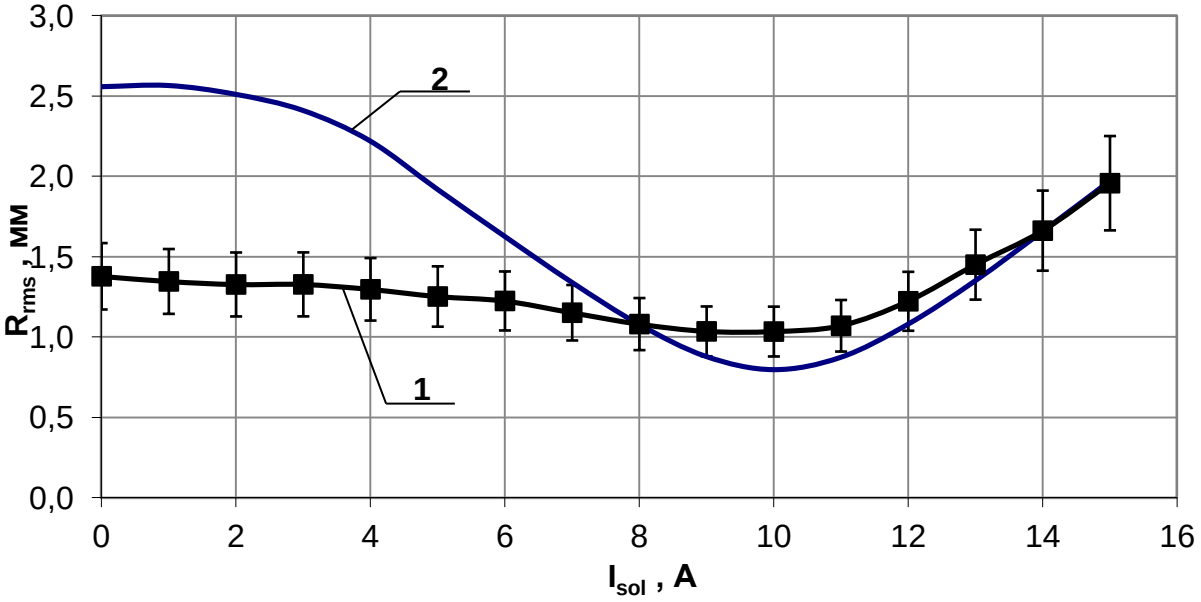

Рис. 7. Зависимость от тока соленоида измеренного (кривая 1) и расчетного (кривая 2) среднеквадратичного радиуса пучка на выходе ускоряющей структуры. Энергия пучка 10 МэВ, ток пушки 800 мА.

Результаты измерений, приведённых во второй части главы, на стенде №2 получены при раздельном высоковольтном питании электронной пушки и клистрона. Регулирование энергии пучка осуществлялось за счёт изменения высокого напряжения на клистроне, при этом мощность СВЧ сигнала на входе клистрона соответствовала максимуму его амплитудной характеристики при данном напряжении.

Калориметрические измерения энергии пучка проводились в соответствии с методикой, описанной в первой главе. Измеренная энергетическая зависимость отношения токов поглотителя пучка и магнитоиндукционного датчика подтверждают правильность расчёта корректирующих факторов, связанных с отражением электронов от поглотителя и утечкой части энергии пучка в виде тормозного излучения. Суммарная мощность пучка и СВЧ потерь в стенках так же соответствует выходной СВЧ мощности клистрона, что говорит о корректности калориметрических измерений в целом.

Калориметрические измерения подтвердили хорошее согласие измеренных характеристик ускоряющей структуры с расчётами, а именно: связь энергии ускоренного пучка и мощности импульсных потерь в стенках структуры (рис. 8), зависимость эффективного шунтового сопротивления от энергии (рис. 9), зависимость коэффициента захвата от энергии (рис. 10). Расхождение рассчитанного и измеренного коэффициента захвата в области низких энергий может быть объяснено тем, что в расчетах для определения коэффициента захвата использовалась часть частиц, находящихся в узком энергетическом интервале, а в эксперименте регистрировался ток всех частиц, вышедших из ускоряющей структуры.

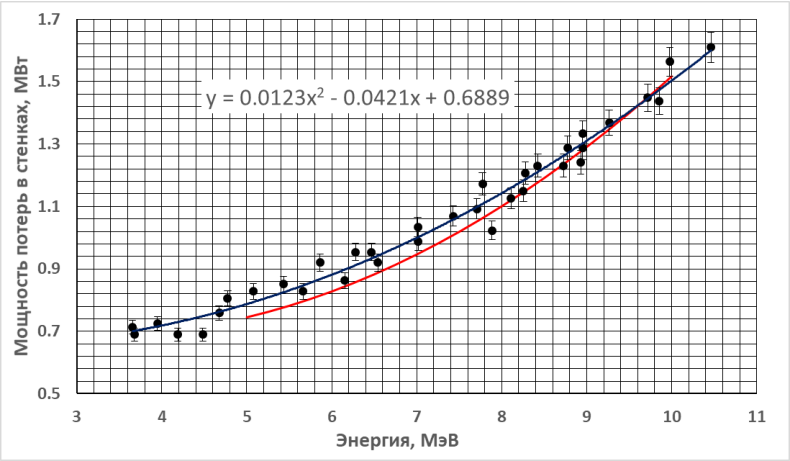

Рис. 8. Измеренная и расчетная (красная линия) связь энергии ускоренного пучка и импульсных СВЧ потерь в стенках структуры.

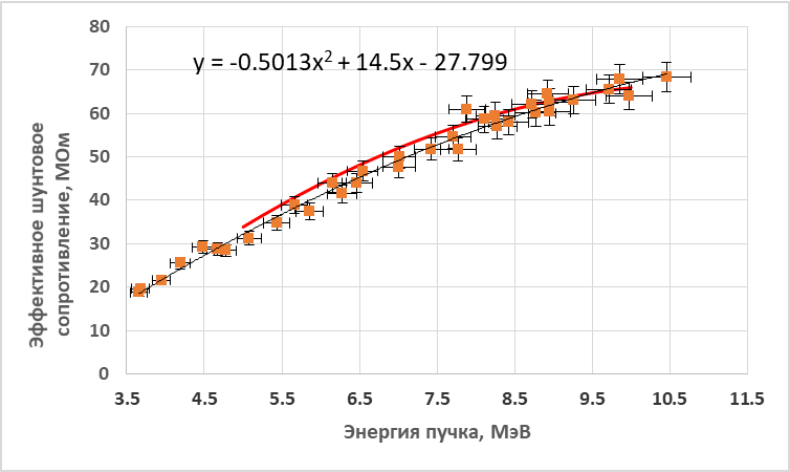

Рис. 9. Измеренная и расчетная (красная линия) зависимость эффективного шунтового сопротивления от энергии.

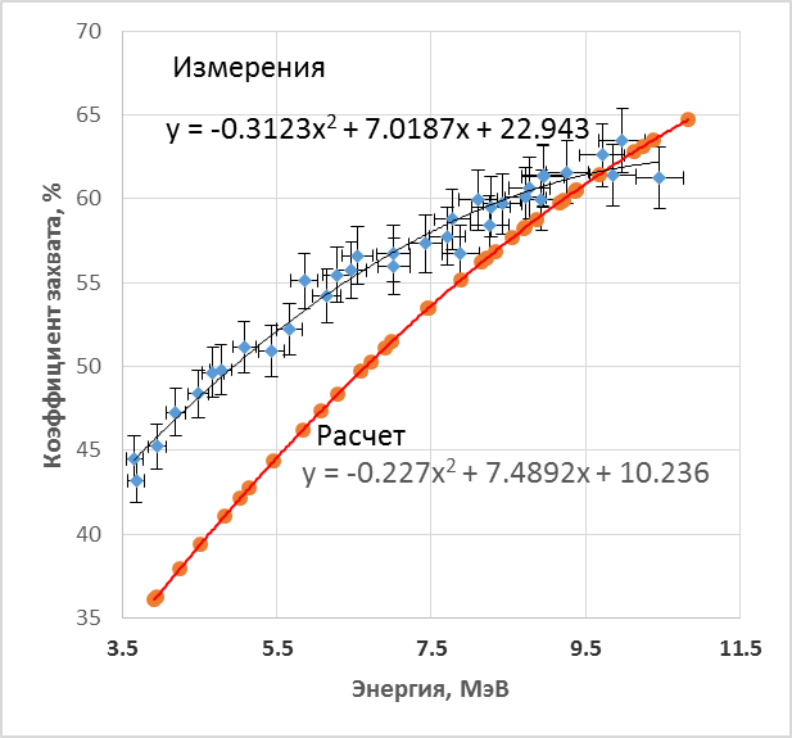

Рис. 10. Сравнение измеренной и расчетной зависимости коэффициента захвата от энергии.

Один из основных результатов экспериментальных исследований динамики пучка - зависимость от энергии импульсной мощности пучка для различных значений напряжения высоковольтного источника модулятора U_{HVPS}, определяющего СВЧ мощность на выходе клистрона, и различных значений напряжения на управляющем электроде пушки $U_{C.E.}$, определяющего ускоренный ток, – показан на Рис. 11. Видно, что выбирая различные сочетания U_{HVPS} и $U_{C.E.}$ можно в широких пределах изменять

соотношение энергии и импульсной мощности ускоренного пучка. Максимальная импульсная мощность пучка около 4.3 МВт достигается при энергии около 8.5 МэВ. Это соотношение определяется эффективным шунтовым сопротивлением ускоряющей структуры и ее коэффициентом связи с питающим волноводом. Для минимальной возможной скважности использовавшихся в эксперименте клистрона и модулятора, равной 250, максимальная средняя мощность ускоренного пучка достигает 17 кВт.

Практическая ценность результатов заключается в том, что полученная взаимосвязь параметров может быть положена в основу алгоритма управления режимом работы ускорителя.

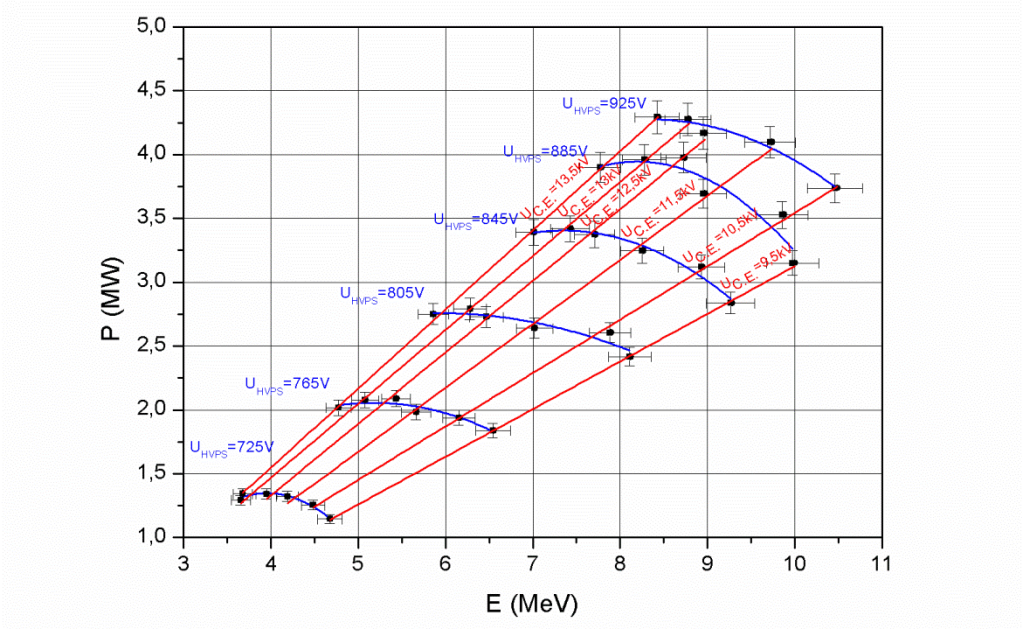

Рис. 11. Измеренная зависимость от энергии импульсной мощности пучка для различных значений напряжения высоковольтного источника модулятора U_{HVPS} и различных значений напряжения на управляющем электроде пушки $U_{C.E.}$.

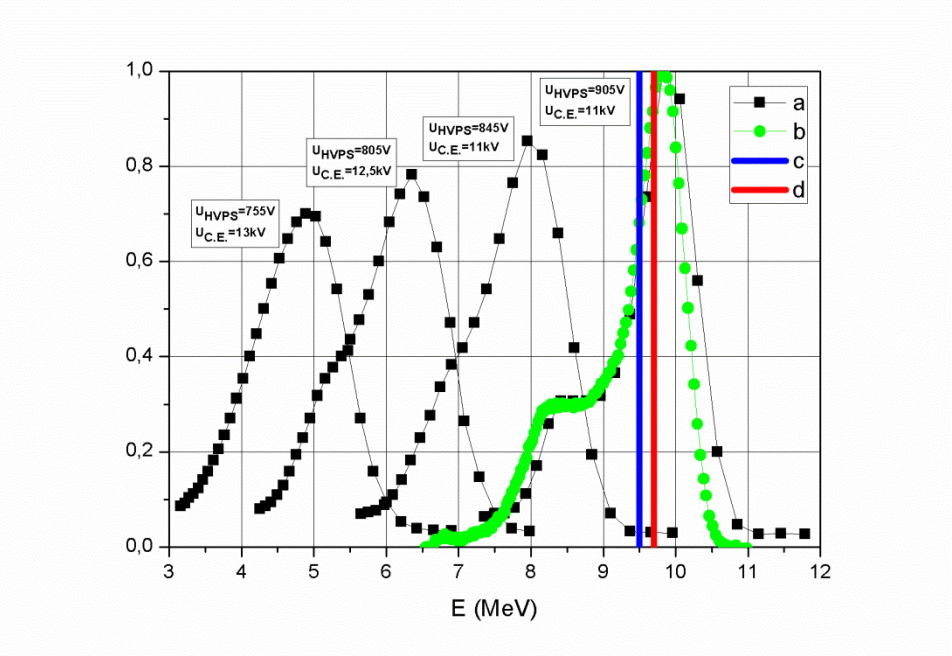

Рис. 12. Спектры пучка, полученные с помощью (a) поглотителя, (b) радиохромной плёнки; (c) эффективная энергия, (d) средняя энергия пучка.

Вывод электронного пучка в атмосферу позволил оценить его энергию различными методами, описанными в Главе 1. Используя магнит развёртки в качестве спектрометра, были измерены спектры пучка, как с помощью перемещаемого цилиндра Фарадея малого поперечного сечения (Рис. 12, кривая (a)), так и посредством регистрации поглощенной дозы с помощью радиохромной пленки (Рис. 12, кривая (b)). Энергетическое разрешение данной методики ограничено поперечными размерами пучка в плоскости регистрации. Можно отметить неплохое совпадение энергетических распределений, измеренных с помощью различных методов регистрации. При этом максимум спектра для параметров ускорителя, обеспечивающих энергию около 9.7 МэВ совпадает со значением эффективной энергии, измеренной с использованием стопки алюминиевых пластин, средняя энергия измеренная калориметрическим методом (линия (d) на Рис. 12), хорошо согласуется со средней энергией спектра. Хорошее совпадение результатов измерения энергии различными методами свидетельствует об их высокой надежности.

В третьей части главы описан ряд экспериментов, выполненных на стендах. А именно, на базе стенда №1 продемонстрирована возможность поимпульсного переключения энергии ускоренного пучка, результаты данного эксперимента в дальнейшем легли в основу разработки ускорителя электронов для инспекционно-досмотрового комплекса, способного распознавать атомный номер материалов. Были выполнены эксперименты по модификации свойств различных материалов и электронных компонент и их радиационной стойкости. Создан и испытан оригинальный стенд для калибровки по энергии детекторов электронов в счётном режиме, для чего интенсивность потока электронов, попадающих на детектор, была снижена на тринадцать порядков величины. На основе стенда №2 созданы ускорители для радиационных технологий, работающие в настоящее время в центре антимикробной обработки продукции ООО «Теклеор».

Четвёртая часть главы посвящена исследованию эффекта обратной бомбардировки катода электронной пушки [7]. Расчёты показали (рис. 13), что доля электронов всех энергий на выходе ускоряющей структуры меняется от 60 до 78%, при изменении энергии ускоренного пучка в диапазоне 5 – 10 МэВ, при этом доля обратных частиц колеблется в диапазоне 12.5 ± 1%, остальные частицы оседают на стенках пролетного канала и резонаторов ускоряющей структуры. Доля электронов, достигающих катода, меняется от примерно 2% в диапазоне энергий 5 – 7.5 МэВ до 6 – 7 % выше 8.5 МэВ. При работе ускорителя на скважности 240 и энергии 10 МэВ средняя мощность достигающих катод электронов составляет около 30 Вт, что больше мощности накала. Экспериментальное подтверждение расчётам получено на действующем ускорителе центра антимикробной обработки продукции ООО «Теклеор».

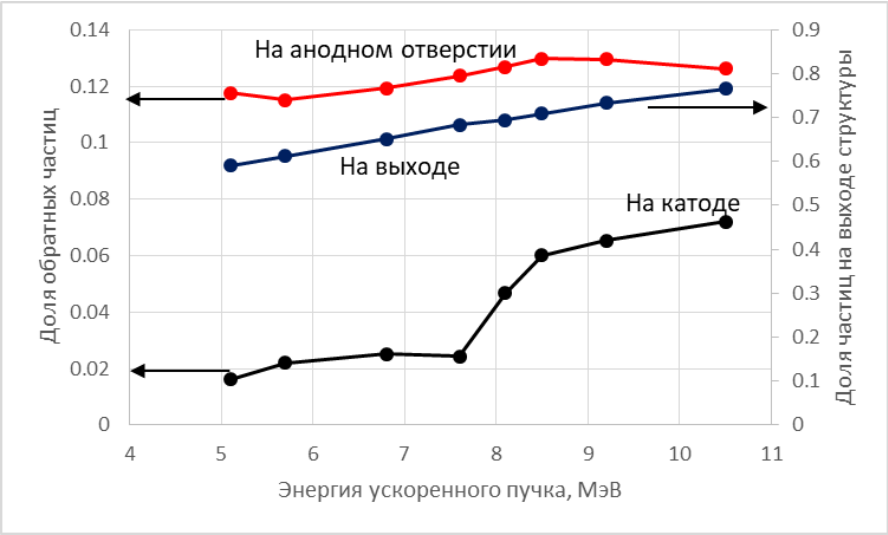

Рис. 13. Зависимость от энергии ускоренного пучка доли обратных частиц в плоскости анодного отверстия и на катоде, а также доли частиц на выходе ускоряющей структуры.

Третья глава посвящена стенду импульсного разрезного микротрона (РМ) на энергию 55 МэВ [8-11]. Стенд проектировался для проведения исследований по обнаружению скрытых взрывчатых веществ методом фотоядерных реакций, но оказался востребованным для решения более широкого круга задач, в том числе для фундаментальных исследований в области ядерной физики, различных прикладных исследований. Его основные параметры представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры РМ.

Энергия электронов на выходе	55.5 МэВ
Ток ускоренного пучка	10 мА
Длительность импульса	8 мкс
Максимальная частота следования импульсов	50 Гц
Прирост энергии за оборот	5 МэВ
Число проходов через линейный ускоритель	11
Рабочая частота	2856 МГц
Потребляемая СВЧ мощность	2.5 МВт
Магнитное поле поворотных магнитов	1 Тл
Габариты Д×В×Ш	2700×1750×750 мм
Масса	< 3000 кг
Питание	380 В 3 фазы 50 Гц
Потребляемая мощность	15 кВт

В первой части третьей главы описан состав стенда, показана схема расположения основных элементов (рис. 14).

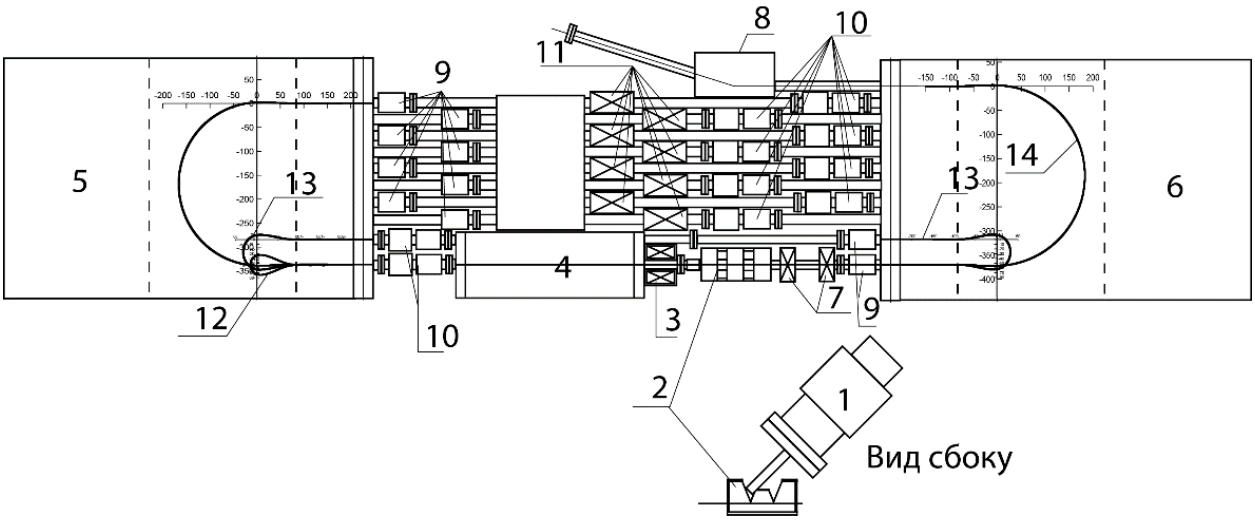

Рис. 14. Устройство и основные элементы стенда РМ. 1 – электронная пушка, 2 – магнит инжекции, 3 – соленоидальная линза, 4 – ускоряющая структура, 5, 6 – поворотные магниты М1 и М2, соответственно, 7 – квадрупольные линзы, 8 – магнит вывода, 9 – сильфоны, 10 – сильфонные узлы с датчиками тока пучка, 11 – корректоры пучка, 12 – орбита пучка с энергией 5 МэВ, 13 – первая орбита, 14 – орбита вывода пучка.

Во второй части главы приведены результаты расчёта динамики пучка в РМ. Расчет трехэлектродной электронной пушки был выполнен с помощью программы EGUN [12], расчет части системы инжекции до выхода из ускоряющей структуры с учетом пространственного заряда производились с помощью программы PARMELA [13], для расчета динамики пучка в РМ использовалась программа RTMTRACE [14].

Для решения проблемы сильной дефокусировки пучка краевым полем поворотного магнита и обхода ускоряющей структуры пучком на первой орбите, введено поле обратной полярности [15], которое замыкает орбиту пучка после его первого ускорения и обеспечивает отсутствие дефокусировки на остальных орбитах. Индукция основного магнитного поля B_0 и равновесный прирост энергии связаны ΔE_s связаны выражением [16]:

$$B_0 = \frac{2\pi\Delta E_s}{\nu c\lambda}$$

где ν – кратность прироста длины орбиты за оборот длине волны ускоряющего поля λ, *c* – скорость света. Для описываемого РМ выбраны следующие значения: B_0=1 Тл, ΔE_s=5 МэВ, ν=1, λ≈0,105м и равновесная фаза φ_s=16°.

В результате расчетов получены необходимая форма краевого поля поворотных магнитов, и распределение поля ускоряющей структуры, обеспечивающее максимальный захват в режим ускорения электронов от электронной пушки и последующее ускорения релятивистского пучка. Оптимизирован тракт инжекции и оптика РМ, определено взаимное положение поворотных магнитов и ускоряющей структуры. Расчетный коэффициент захвата частиц от электронной пушки в режим ускорения составил 16%. Расчётные параметры пучка на выходе ускорителя приведены в таблице 3.

Таблица 3. Среднеквадратичные параметры пучка на выходе РМ.

Энергия пучка	55.52 МэВ
Энергетический разброс	83.919 кэВ
Длина сгустка,	4.5546 град.
Продольный эмиттанс	366.98 кэВ град.
Размеры пучка *x*/*y*	1.7488 / 1.7178 мм
Поперечный нормализованный эмиттанс $\varepsilon_{nx}/\varepsilon_{ny}$	9.706/ 27.530 мм мрад

В третьей части описаны отдельные элементы РМ, приведены результаты измерения их характеристик и настройки. В частности, для получения высокой однородности поля поворотных магнитов, была выполнена их настройка, которая заключалась в выставлении параллельности полюсов магнитов. В результате настройки удалось улучшить однородность поля первого магнита с ±0.12% и второго магнита с ±0.22% до ±0.05% для обоих магнитов. Определены токи обмоток активных экранов, компенсирующих рассеянное поле на выходе магнитов. Рассчитаны ошибки угла поворота пучка на орбитах в измеренных полях, для компенсации которых на участках дрейфа между поворотными магнитами установлены корректирующие дипольные магниты.

Ускоряющая структура, работающая в режиме стоячей волны, состоит из 7 ускоряющих ячеек и 6 ячеек связи. Первая ускоряющая ячейка имеет меньшую длину для обеспечения эффективного захвата нерелятивистских частиц в режим ускорения. Ввод высокочастотной мощности осуществляется по волноводу, присоединенному к центральной ускоряющей ячейке. В теле структуры расположены каналы охлаждения, а также канал для прохождения 10 МэВ пучка на первой орбите. Для обеспечения контроля уровня ускоряющего поля в центральной ячейке установлена антенна (петля связи). Электродинамические параметры структуры приведены в Таблице 4.

Трехэлектродная электронная пушка работает при номинальном напряжении на катоде -50 кВ. Управляющий электрод позволяет регулировать ток пучка при сохранении его поперечных характеристик в диапазоне 300 – 500 мА при изменении напряжения на нем по отношению к катоду в диапазоне 18-25 кВ.

Таблица 4. Параметры ускоряющей структуры.

Электрическая длина структуры	350 мм
Частота $\pi/2$ колебания	2856 МГц
Коэффициент связи ячеек	6.2 %
Коэффициент связи с волноводом	3.6
Собственная добротность	15500
Мощность СВЧ потерь в стенках	1.5 МВт

Магнитооптическая система представлена трёх-полюсным магнитом и соленоидальной линзой в тракте инжекции, дублетом квадрупольных линз на общей орбите, корректирующими дипольными магнитами на участках дрейфа и магнитом вывода. Последний имеет гибридную конструкцию Основной уровень поля создается редкоземельными постоянными магнитами, его регулирование в небольших пределах обеспечивается изменением тока в корректирующих обмотках. Для исключения влияния паразитного рассеянного поля магнита вывода на соседнюю орбиту он имеет многослойный пассивный экран, снижающий уровень рассеянного поля в области соседней орбиты до 0.5 Гс [17].

Система СВЧ питания РМ построена по автоколебательному принципу с ускоряющей структурой в цепи обратной связи клистрона, аналогично [18]. В состав тракта низкого уровня мощности входят механические фазовращатель и аттенюатор, направленный ответвитель с СВЧ детектором и запирающее устройство. СВЧ тракт высокого уровня мощности состоит из многолучевого клистрона КИУ-111А, фазового циркулятора с волноводными нагрузками, вакуумного СВЧ окна и системы подачи изолирующего газа.

Высоковольтное питание на клистрон и пушку подается от модулятора на формирующей линии с тиратроном в качестве ключевого коммутатора и повышающим трансформатором.

Диагностика пучка РМ производится с помощью магнитоиндукционных датчиков тока, расположенных на орбитах, с помощью синхротронного излучения, испускаемого пучком в поворотных магнитах, с помощью переходного излучения, генерируемого пучком на выпускном окне и посредством измерения тока пучка с цилиндра Фарадея, устанавливаемого после выпускного окна.

Система управления РМ основана на программном обеспечении LabView и различных модулях National Instruments [19], обеспечивающих управление источниками тока всех магнитных элементов [20], блоком обратной связи СВЧ системы, модулятором. Измерение большого числа импульсных сигналов осуществляется с помощью цифрового осциллографа и мультиплексора.

В **четвёртой главе** дано описание методики и результатов настройки РМ, приведены результаты экспериментов на пучке.

Первым шагом настройки РМ является определение уровня ускоряющего поля, соответствующего равновесной фазе 16^0 при номинальном уровне индукции поля поворотных магнитов 1 Т. В отличие от уровня магнитного поля поворотных магнитов, контролируемого прецизионным магнетометром, амплитуда ускоряющего поля не может быть измерена в абсолютных единицах с достаточной точностью. Определение

энергии однократно ускоренного пучка, а, следовательно, и амплитуды ускоряющего поля производилось с использованием в качестве спектрометра поворотного магнита М1 и датчика тока пучка, установленного на 1-й орбите (Рис. 14). На Рис. 15(а) приведены примеры спектров, измеренных при различных уровнях ускоряющего поля, а также расчетный спектр. Ширина экспериментального спектра определяется энергетическим разрешением методики, ограниченным апертурой датчика тока. Связь средней энергии измеренных спектров с уровнем поля с петли связи ускоряющей структуры в дальнейшем использовалась в качестве калибровочной зависимости при установке уровня ускоряющего поля.

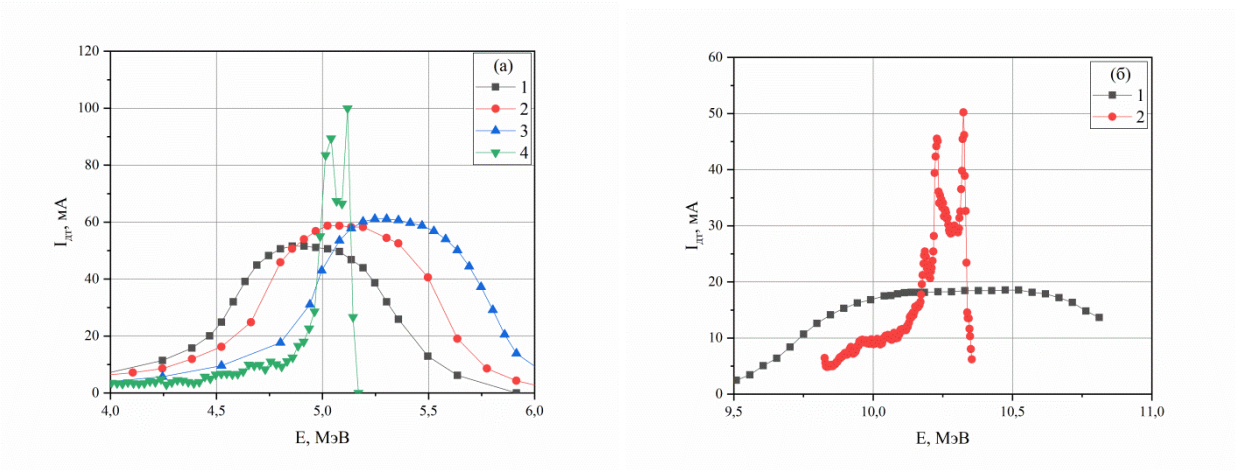

Рис. 15. (а) Кривые 1,2,3 - энергетические спектры однократно ускоренного пучка, измеренные для трех уровней ускоряющего поля E1<E2<E3. Кривая 4 – расчетный спектр. (б) Кривая 1 – измеренный, 2 – расчетный спектры пучка на 1-й орбите.

На следующем шаге оптимизировалась фаза инжекции однократно ускоренного пучка в РМ за счет подстройки положения магнита М1 (Рис. 14) относительно ускоряющей структуры. Критерием служило равенство энергии двукратно ускоренного пучка расчётному значению. Пример измеренного и расчетного спектров приведен на Рис. 15(б), при этом в качестве спектрометра использовался магнит М2 и магнитоиндукционный датчик, установленный на 1-й орбите (Рис. 14). Таким образом фиксировалось положение магнита М1. Положение магнита М2 устанавливалось в расчётное относительно магнита М1.

Наконец, для окончательной настройки использовалась информация о токе пучка с магнитоиндукционных датчиков и о форме и положении пучка по синхротронному излучению на каждой орбите. Достижение максимального тока пучка обеспечивалось подстройкой тока корректирующих магнитов и линз и уровня ускоряющего поля.

Падение тока по орбитам, полученное после настройки, показано на Рис. 16. Основной причиной уменьшения тока пучка являются потери в пролетных трубах с ограниченной апертурой, установленных в дрейфовом промежутке между магнитами.

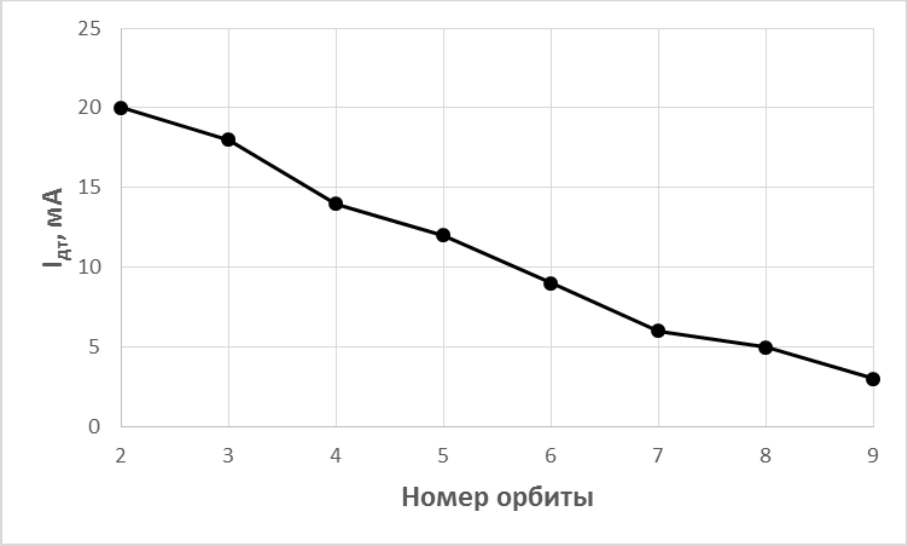

Рис. 16. Ток пучка на орбитах, измеренный магнитоиндукционными датчиками.

Во второй части четвёртой главы дано описание экспериментов на пучке разрезного микротрона. Исследования возможности детектирования взрывчатых веществ ядерно-физическим методом [21, 22] показали наличие сильного нейтронного фона, превышающего уровень полезного сигнала. Исследования фотоядерных реакций методом наведённой активности [23, 24] на пучке РМ оказались весьма плодотворными. Получены выходы реакций на изотопах следующих элементах: Cd, Ti, Bi, Y. Получены оценки возможности наработки следующих медицинских изотопов [25] на данном ускорителе: ^{18}F, ^{67}Cu, ^{69m}Zn, ^{177}Lu.

В **заключении** диссертации изложены основные результаты и подведены итоги проделанной работы.

Работа частично выполнена в рамках соглашения между Минобрнауки России и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии от 03.10.17г. № 14.582.21.0011 «Создание и передача на клинические испытания образца импортозамещающего комплекса лучевой терапии на базе инновационного оборудования (6 МэВ ускорителя и конусно-лучевого томографа)». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58217X0011.

Литература

1. А.А. Ветров, «Расчет электродинамических характеристик и оптических свойств ускоряющих структур в широком диапазоне длин волн»
2. А.В. Посеряев, «Расчет динамики и оптимизация параметров ускорительных комплексов различного назначения»
3. A.S. Alimov, E.A. Alimov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, A.V. Gryzlov, S.V. Lamonov, A.P. Musatov, V.N. Sigalaev, Beam Parameters Measurement Of Technological 10 Mev Linac, XXI Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2008, 28 сентября – 3 октября 2008 г., г. Звенигород, Россия, стр. 267-269
4. A.N. Ermakov, V.V. Khankin, A.S. Alimov, V.V. Klementiev, L.Yu. Ovchinnikova, N.I. Pakhomov, Yu.N. Pavshenko, A.S. Simonov, N.V. Shvedunov, V.I. Shvedunov, Commissioning of High Efficiency Standing Wave Linac for Industrial Applications, in Proc. RuPAC 2016, pp. 99-101
5. А.Н. Ермаков, Д.И. Ермаков, Б.С. Ишханов, Г.А. Новиков, А.С. Чепурнов, В.И. Шведунов, В.Р. Яйлиян, У.П. Трауэр, О.В. Милованов, Н.П. Собенин, А.И. Карев, П.В. Невский, И.А. Фрейдович, В.С. Скачков, Н.А. Архангелов, В.А. Даниличев, В.А, Павлов, Ю.С. Смирнов, Система инжекции и ускорения импульсного разрезного микротрона. Приборы и техника эксперимента, Техника ядерного эксперимента, N 4, с. 51-58, 2002
6. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV, NTERNATIONAL ISO/ASTM STANDARD 51649, Second edition, 2005-05-15
7. В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, Расчёт и измерение эффекта обратной бомбардировки катода в технологическом линейном ускорителе электронов со стоячей волной, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2020, № 1, с. 37-41
8. А.Н. Ермаков, Б.С. Ишханов, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, А.И. Карев, Н.И. Пахомов, Н.П. Собенин, Н.В. Шведунов, А.Н. Каманин, Е.Е. Журавлев, Многоцелевой импульсный разрезной микротрон на энергию 55МэВ, Приборы и техника эксперимента, 2018, № 2, с. 20-37
9. A.I. Karev, A.N. Lebedev, V.G. Raevsky, A.N. Kamanin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, 55 MeV Race-Track Microtron of Lebedev Institute, XXI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2008 Contributions to the Proceedings, p. 124-127
10. A.I. Karev, A.N. Lebedev, V.G. Raevsky, A.N. Ermakov, A.N. Kamanin, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, N.P. Sobenin, L. Brothers, L. Wilhide, 55 MeV special purpose race-track microtron commissioning, XXII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2010 Contributions to the Proceedings, p. 316-318
11. A.N. Ermakov, V.V. Khankin, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, A.I. Karev, V.G. Raevsky, Operational Experience with 55 MeV Pulsed RTM, XXIII

Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2012 Contributions to the Proceedings, p. 538-540
12. В.Г. Геворкян, А.Б. Савицкий, М.А. Сотников, В.И. Шведунов, RTMTRACE, Рукопись, депонированная в ВИНИТИ 183-В89 (1989)
13. W.B. Herrmannsfeldt, EGUN – An electron optics and gun design program, Stanford Linear Accelerator Center, SLAC-331, UC-28 (A), (1988).
14. V. Veksler, A new method of acceleration of relativistic particles, Journal of Physics, 1945, V. IX, No. 3, pp. 153-158
15. Babić H. and Sedlaček M. A method for stabilizing particle orbits in the race-track microtron. Nuclear Instruments and Methods, 1967, Vol. 56, Issue 1, pp. 170-172
16. V. Veksler, A new method of acceleration of relativistic particles, Journal of Physics, 1945, V. IX, No. 3, pp. 153-158
17. A.N. Ermakov, V.A. Khankin, Yu.A. Kubyshin, N.I Pakhomov, J.P. Rigla, V.I. Shvedunov, Design and Magnetic Measurements of the Extraction Magnet For 55 MeV Race Track Microtron, MSU-SINP Preprint No 2011-2/866
18. A.N. Ermakov, D.I. Ermakov, B.S. Ishkhanov, et al, An Injection and Acceleration System of a Pulsed Race-Track Microtron, Instruments and Experimental Techniques, v. 45, № 4, 2002, p. 51-58
19. http://www.ni.com
20. http://www.protom.ru
21. A.I. Karev, V.G. Raevsky, L.Z. Dzhilavyan, V.D. Laptev, N.I. Pakhomov, V.I. Shvedunov, V.I. Rykalin, L.J. Brothers, L.K. Wilhide, Device for Detection and Identification of Carbon- and Nitrogen-Containing Materials, Patent US 8,681,939 B2, 2014
22. Е.Е. Журавлёв, А.И. Карев, В.Б. Лопатко, В.В. Ханкин, С.Н. Черепня, В.И. Шведунов, Фотоядерная технология обнаружения скрытых взрывчатых веществ, Ядерная физика и инжиниринг, 2017, том 8, №4, с 336-372
23. S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, V.I. Shvedunov, K.A. Stopani, Studying photonuclear reactions using the activation technique, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2014, v. 745, p. 133-137
24. S.S. Belyshev, D.M. Filipescu, I. Gheoghe, B.S. Ishkhanov, V.V. Khankin, A.S. Kurilik, A.A. Kuznetsov, V.N. Orlin, N.N. Peskov, K.A. Stopani, O. Tesileanu, V.V. Varlamov, Multinucleon photonuclear reactions on 209Bi: Experiment and evaluation, European Physical Journal A, 2015, том 51, с. 67-75
25. Р.А. Алиев, С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, В.В. Ханкин, В.И. Шведунов, Исследование возможности получения и выделения радиоизотопа 18F на ускорителях электронов, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2014 №3, с. 29-32