

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Кудашкин Иван Васильевич

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ И
МОНИТОРИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ И ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ
УСКОРИТЕЛЯ НУКЛОТРОН

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна, 2016 г.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: Балдин Антон Александрович,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Объединенного института ядерных
исследований

Официальные оппоненты: Фещенко Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
ФГБУН «Институт ядерных исследований
Российской академии наук»

Федорков Виктор Георгиевич,
кандидат технических наук,
директор АО «Институт физико-технических
проблем»

Ведущая организация: НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ
«Государственный научный центр РФ –
Институт теоретической и
экспериментальной физики»

Защита состоится «___» _____ 2016 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований или на сайте http://www.info.jinr.ru/announce_disser.htm

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета: Арефьев Валентин Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач, решаемых на любом ускорительном комплексе, является разработка и создание современных систем диагностики и мониторинга пучков. В рамках реализации проекта NICA [1] и экспериментов с выведенными пучками ускорительного комплекса Нуклотрон (ЛФВЭ ОИЯИ) в 2011 г. была поставлена задача по созданию новых детекторов для диагностики и мониторинга внутренних (циркулирующих) пучков тяжелых ионов [2].

На Нуклотроне проводится широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований с пучками ионов разного сорта (в том числе и тяжелых ионов) в диапазоне интенсивностей от единиц до 10^{11} частиц за цикл ускорения. Для работы на максимальных проектных интенсивностях на Нуклотроне существует система диагностики пучка, разработанная и созданная на период пуско-наладочных работ, которая позволяет настраивать ускоритель при интенсивности свыше 10^8 однозарядных ионов. Для ряда фундаментальных и прикладных исследований (таких как исследования в области радиобиологии, изучение радиационной стойкости электронных компонентов и др.) требуется настройка и работа ускорителя при интенсивностях существенно меньших максимальных проектных. Существует проблема настройки ускорения и контроля медленного вывода пучков ионов с низкой интенсивностью от единиц до 10^8 частиц за цикл ускорения. Решение этой актуальной проблемы является одной из задач диссертационной работы.

Востребованным и актуальным направлением в области прикладных исследований с пучками релятивистских ионов является изучение радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ) и исследование влияния ионизирующих излучений на биологические объекты. Защита от радиационного воздействия как легких элементарных частиц, так и тяжелых ионов (в особенности исследования единичных эффектов от локального воздействия тяжелого иона) становится важным фактором в реализации национальных программ космических исследований [3,4]. Наиболее

подходящий диапазон энергии пучков ионов для проведения таких исследований соответствует интервалу 100 – 2000 МэВ/нуклон, что согласуется с проектными параметрами выведенных пучков Нуклотрона. Разработка, создание и пучковые испытания прототипа специализированного облучательного стенда для прикладных исследований является составной частью настоящей диссертационной работы.

На выведенных пучках Нуклотрона в рамках проекта «Энергия+Трансмутация» [5,6] традиционно проводятся уникальные эксперименты по облучению протяженных мишеней из тяжелых элементов («Гамма-3», «КВИНТА» и др.), в которых автор настоящей диссертации принимает активное участие. Опыт проведения таких исследований показал необходимость создания новых современных систем диагностики и мониторинга пространственно-временных характеристик выведенных пучков. Разработке, созданию, пучковым испытаниям и вводу в эксплуатацию новой системы мониторинга выведенных пучков посвящена часть диссертационной работы.

Описанные в диссертации работы объединены общей актуальной задачей – создание систем синхронного измерения и контроля пространственно-временных характеристик пучков в процессе ускорения, вывода и транспортировки до потребителя в режиме реального времени.

Цель работы состояла в разработке, создании, испытании и вводе в эксплуатацию систем диагностики и мониторинга циркулирующих и выведенных пучков ускорительного комплекса Нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ.

Этой цели были подчинены следующие направления работы автора:

1) Разработка детектора на основе микроканальных пластин (МКП) для неразрушающей диагностики циркулирующего пучка Нуклотрона.

2) Испытание детектора на основе МКП на специализированном вакуумном стенде и на пучках Нуклотрона.

3) Разработка программного обеспечения (ПО) для сбора, хранения и on-line визуализации данных с системы диагностики циркулирующего пучка на основе МКП в рамках принятой на ускорительном комплексе системы «Tango»¹.

4) Разработка, создание и пучковые испытания детекторов системы мониторинга прототипа облучательного стенда для прикладных исследований на выведенных пучках Нуклотрона.

5) Разработка и создание дистанционно управляемой системы позиционирования облучаемых объектов и пучковых детекторов стенда.

6) Разработка и применение методики проведения облучений исследуемых образцов на прототипе облучательного стенда.

7) Разработка, создание и эксплуатация системы мониторинга выведенных пучков для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация».

8) Калибровка ионизационных камер на пучках релятивистских дейтронов и ядер углерода с использованием сцинтилляционных счетчиков.

¹ URL: <http://nuclotango.jinr.ru>

Новизна работы. Показана возможность применения детектора на основе МКП для регистрации циркулирующего пучка в однооборотном режиме. Таким образом, созданная система диагностики пучка на основе МКП позволяет проводить настройку циркуляции низкоинтенсивных пучков Нуклотрона на первых оборотах после инъекции.

Разработана и апробирована методика одновременной регистрации циркулирующего и выведенного пучков Нуклотрона в режиме реального времени при помощи созданных систем диагностики.

Практическая значимость работы. Разработанная и испытанная система неразрушающей диагностики циркулирующих пучков Нуклотрона на основе МКП позволяет контролировать и настраивать циркуляцию и ускорение низкоинтенсивных пучков от момента инъекции в ускоритель до вывода пучка потребителю.

Разработанное и интегрированное в общую систему сбора данных «Tango» ПО детектора на основе МКП позволило контролировать пространственно-временные характеристики и относительную интенсивность циркулирующих пучков Нуклотрона совместно с другими штатными системами диагностики пучка ускорителя.

Разработанный прототип дистанционно управляемого облучательного стенда позволил провести тестовые испытания по воздействию единичных ионов на работу ИЭТ. Система позиционирования и диагностики выведенных пучков ионов позволяет проводить облучения образцов на площади $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с контролем интенсивности и пространственно-временных характеристик пучка в режиме реального времени.

Созданная система мониторинга выведенных пучков на основе ионизационных камер и сцинтилляционных счетчиков для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация» позволяет измерять абсолютную интенсивность выведенных пучков с точностью 10 %, контролировать временную структуру и регистрировать положение центра тяжести

выведенного пучка с точностью 1 мм в режиме реального времени. Данная система мониторинга позволила получить новые экспериментальные данные в работах коллаборации «Энергия+Трансмутация», а также была использована для мониторинга выведенных пучков в других экспериментах (установки «ФАЗА», «МАРУСЯ») и для прикладных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1) Разработка, создание, испытание и ввод в эксплуатацию системы на основе МКП для неразрушающей диагностики низкоинтенсивных циркулирующих пучков ионов ускорителя Нуклотрон.

2) Методика регистрации пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка Нуклотрона в однооборотном режиме на первых оборотах пучка после инжекции.

3) Разработка, создание и испытание прототипа облучательного стенда для проведения прикладных исследований на выведенных пучках Нуклотрона.

4) Разработка, создание, испытание и ввод в эксплуатацию системы мониторинга выведенных пучков Нуклотрона для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация».

5) Методика измерения абсолютной интенсивности пучков на основе ионизационных камер, быстрых сцинтилляционных счетчиков и ядерных фотоэмульсий.

Степень достоверности результатов работы. Созданная система диагностики циркулирующего пучка показала свою надежную работу в 8-ми сеансах ускорителя Нуклотрон в период с 2011 по 2015 гг.

Достоверность результатов абсолютного мониторинга выведенных пучков подтверждена сравнительным анализом данных, полученных на основе штатных детекторов ускорителя Нуклотрон, а также на основе методики ядерных фотоэмульсий и активационного анализа.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались автором на XXI и XXII международных конференциях по «Релятивистской ядерной физике и квантовой хромодинамике» (Baldin ISHEPP) в г.Дубна (2012 и 2014 гг.), на XV, XVI и XVII научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ в г.Дубна (2011 – 2013 гг.), на II школе-конференции молодых ученых и специалистов в г.Алушта (2013 г.), а также неоднократно обсуждались на научных семинарах в Объединенном Институте Ядерных Исследований.

По результатам работ, вошедших в диссертацию, в 2011 г. автору присуждена стипендия им. академика М.А. Маркова и поощрительная стипендия им. академика В.И. Векслера для молодых ученых и специалистов ЛФВЭ ОИЯИ; в 2013 г. – 1-ая премия молодым ученым и специалистам ОИЯИ и в 2015 г. – стипендия им. академика А.М. Балдина. Работы, вошедшие в диссертацию, поддержаны грантом ЛФВЭ ОИЯИ для молодых ученых и специалистов в 2014 г.

Результаты работ, составивших основу диссертации, опубликованы в 10 печатных работах, 3 из которых изданы в реферируемых журналах по списку ВАК.

Личный вклад автора. Соискатель принял активное участие в проектировании, сборке, настройке и пучковых испытаниях всех описанных в настоящей диссертации детекторов и систем диагностики пучков Нуклотрона.

Определяющий вклад автора привнесен в следующие работы: разработка системы высоковольтного питания детектора на основе МКП; испытания детектора на основе МКП на вакуумном стенде; разработка ПО для системы сбора и визуализации данных системы мониторинга циркулирующего пучка; определение поправочных функции показаний МКП-детектора для вычисления относительной интенсивности циркулирующих пучков; разработка и испытание электротехнической части системы позиционирования образцов и детекторов облучательного стенда; разработка и создание 16-ти канального сцинтилляционного годоскопа и тонких сцинтилляционных счетчиков прототипа облучательного стенда; разработка ПО для управления системой позиционирования и визуализации данных с системы мониторинга облучательного стенда; калибровка системы мониторинга облучательного стенда на основе ионизационных камер и ядерных фотоэмульсий; абсолютная калибровка ионизационных камер системы мониторинга для эксперимента «Энергия+Трансмутация» с использованием выведенных пучков ядер углерода и дейтронов.

Автор также принял активное участие в обработке и анализе данных, полученных в экспериментах коллаборации «Энергия+Трансмутация» в 2012 – 2015 гг.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 59 наименований. Общий объем диссертационной работы составил 88 страниц, включая 56 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность в разработке систем диагностики циркулирующих и выведенных пучков ускорителей, в том числе и для ускорительного комплекса Нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ. Обозначена цель, новизна и практическая значимость работ, вошедших в настоящую диссертацию.

В первой главе представлен обзор методов неразрушающего контроля пространственно-временных характеристик пучков в ускорителях. Рассмотрен мировой опыт различных конструкций ионизационных детекторов, работающих на остаточном газе, для регистрации пучков как в циклических, так и в линейных ускорителях. Одним из перспективных элементов конструкций детекторов является вторичный электронный умножитель на основе МКП. Проанализированы оригинальные конструкции детекторов для предотвращения перегрузок и старения МКП, используемые в передовых ускорительных центрах. Изучены особенности регистрации электронной и ионной составляющих остаточного газа для неразрушающей диагностики пучков ускорителей. Рассмотрены достоинства и недостатки существующих детекторов для разработки конструкции, подходящей для ускорительного комплекса Нуклотрон. Выбор конструкции обусловлен не только характеристиками пучков и требованием к пространственно-временному разрешению, но и условиями работы детектора в конкретном месте ускорителя (вакуум, радиационный фон и др.).

Вторая глава посвящена разработке, созданию, испытаниям и вводу в эксплуатацию системы на основе МКП для неразрушающей диагностики циркулирующих пучков ускорителя Нуклотрон.

Описаны особенности работы на пучках Нуклотрона и требования к системам диагностики. Обоснован выбор конструкции детектора, удовлетворяющей поставленным на ускорительном комплексе Нуклотрон задачам. Подробно описана конструкция детектора, особенности системы высоковольтного питания и системы сбора и отображения данных.

Представлена методика и результаты испытания детектора на специализированном вакуумном стенде. На рисунке 1 показана трехмерная модель детектора для диагностики радиальной координаты пучка Нуклотрона.

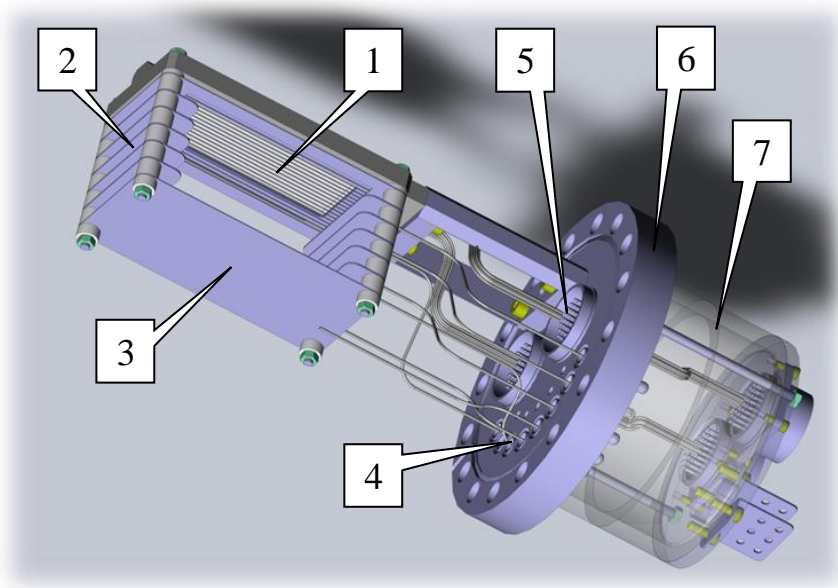


Рисунок 1 – Трехмерная модель детектора для диагностики радиальной координаты пучка Нуклотрона. 1 – запирающий электрод, шевронная сборка МКП и печатная плата с многоканальным коллектором; 2 – электроды, выравнивающие электростатическое поле транспортировки ионов; 3 – ускоряющий электрод; 4 – высоковольтные вакуумные разъемы; 5 – сигнальные вакуумные разъемы; 6 – вакуумный фланец; 7 – короб для защиты вакуумных разъемов.

В главе проиллюстрированы результаты пучковых испытаний системы диагностики на основе МКП в семи сеансах работы ускорительного комплекса (2011 – 2014 гг.) при работе с циркулирующими пучками дейтронов, альфа частиц, ионов углерода и аргона. Представлены результаты измерений пространственно-временных характеристик пучков для различных режимов ускорения от энергии инжекции до 4 ГэВ/нуклон. Показано, что разработанная система надежно регистрирует поперечный профиль циркулирующего пучка, а также временную структуру и относительную интенсивность от момента инжекции в ускоритель до вывода пучка из ускорителя при заданной энергии. На рисунке 2 приведен пример регистрации динамического профиля и

относительной интенсивности циркулирующего пучка системой на основе МКП для одного цикла ускорения.

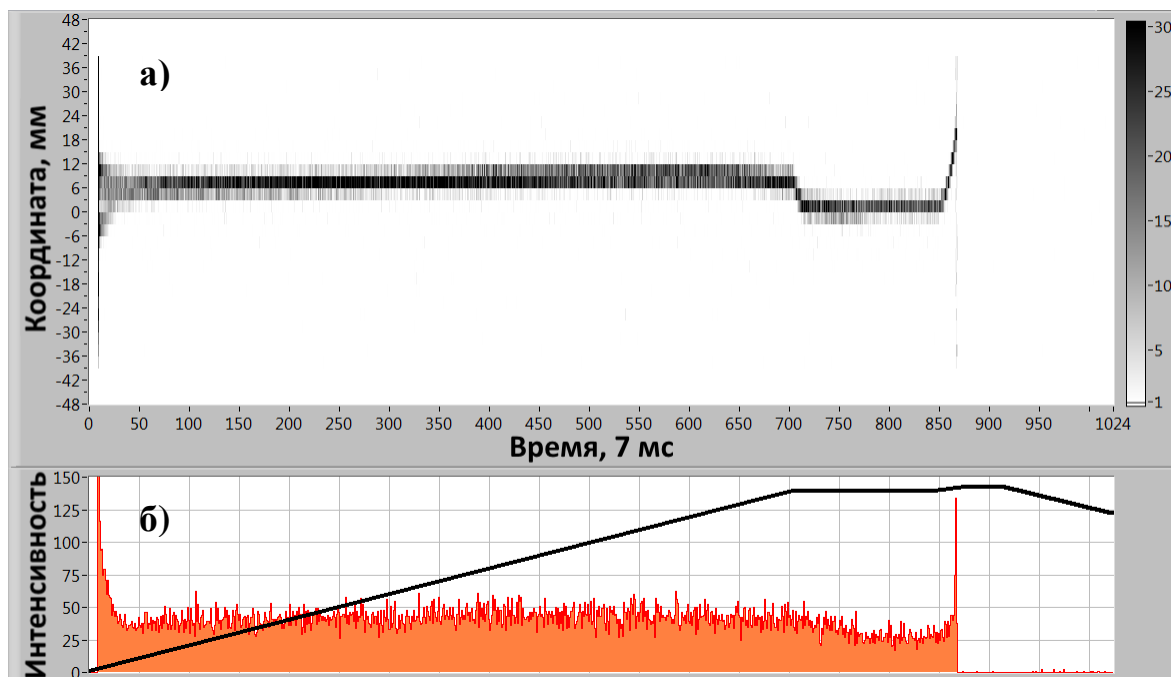


Рисунок 2 – Динамический профиль (а) и относительная интенсивность (б) циркулирующего пучка дейтронов при ускорении до энергии 4 ГэВ/нуклон. Черная кривая области (б) отображает изменение магнитного поля ускорителя.

Продемонстрирована возможность использовать детектор на основе МКП для регистрации циркулирующего пучка в однооборотном режиме, на примере инжектированного пучка α -частиц низкой интенсивности в процессе настройки ускорения. Отработана методика настройки детектора для различных интенсивностей и типов ускоряемых ионов. Описана форма передачи и представления информации с детектора на пульте ускорителя в режиме реального времени.

В Приложении А диссертации описана методика расчета поправочных функций для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка с учетом релятивистской динамики движения частиц в ускорителе (изменение энергии и частоты обращения пучка в процессе ускорения). В приложении также представлены оценки точности измерения пространственно-временных характеристик пучков для созданной системы диагностики.

В третьей главе диссертации представлен цикл работ по проектированию, созданию и испытаниям прототипа облучательного стенда для прикладных исследований на выведенных пучках Нуклотрона. Сформулированы особенности и требования при проведении облучений образцов электронной техники и биологических объектов пучками ионов (минимальное количество вещества на пути пучка, надежная регистрация и идентификация ионов, прошедших через заданное место исследуемого объекта и т.д.).

Облучательный стенд включает в себя систему позиционирования детекторов и исследуемых образцов, систему диагностики и мониторинга выведенного пучка, систему сбора и передачи данных, систему дистанционного управления и другие подсистемы, описанные в главе. На рисунке 3 представлена фотография прототипа стенда, расположенного в месте вывода пучка из Нуклотрона.

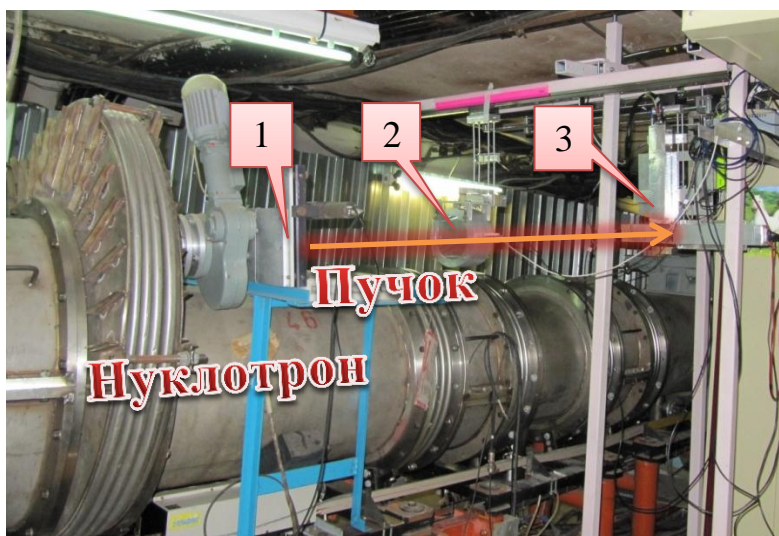


Рисунок 3 – Фотография прототипа облучательного стенда. 1 – окно вывода пучка; 2, 3 – детекторы системы мониторинга пучка.

Приведены результаты испытания прототипа облучательного стенда на пучках дейтронов, ионов углерода и аргона. Показано, что система мониторинга позволяет определять интенсивность пучка, профиль (ширину и положение центра тяжести относительно облучаемого объекта), а также состав выведенного пучка в процессе облучения. Система позиционирования дает возможность облучать объекты испытаний с

однородностью не хуже 10 % на площади размером 200×200 мм². На рисунке 4 показан пример синхронизованных измерений характеристик циркулирующего (при помощи системы на основе МКП) и выведенного пучка (система мониторинга облучательного стенда) в процессе облучения ИЭТ ионами аргона для одного цикла ускорения и вывода.

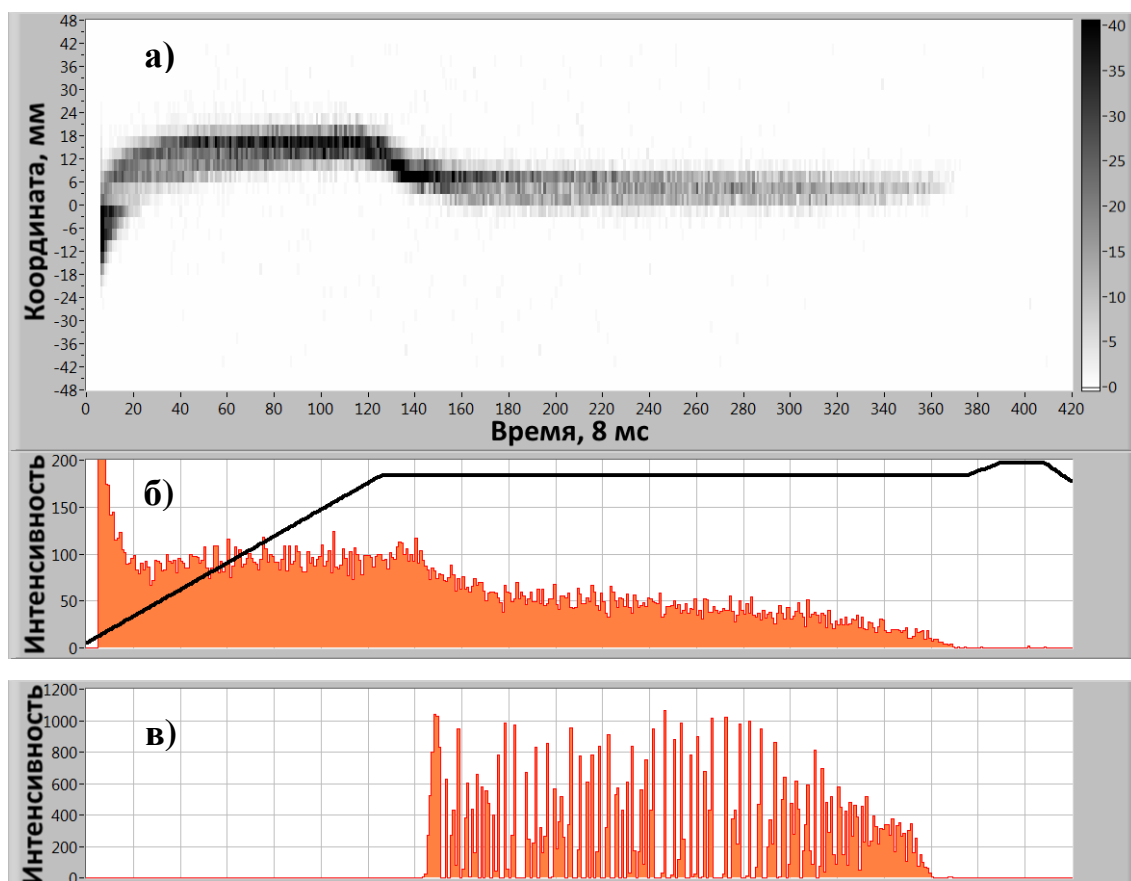


Рисунок 4 – Цикл ускорения и вывода пучка ионов аргона Ar^{16+} . Радиальный профиль (а) и относительная интенсивность (б) циркулирующего пучка при ускорении до энергии 500 МэВ/нуклон; (в) – интенсивность выведенного пучка ионов аргона в месте облучения исследуемых образцов.

В главе представлены результаты калибровки детекторов системы мониторинга стенда на основе ионизационных камер и ядерных фотоэмульсий. Описаны разработанные методики облучений, а также специально рассмотрены вопросы получения однородного облучения заданных областей исследуемых образцов на основе комбинированного использования информации с профилометров и мониторов стенда в сочетании с заданным динамическим перемещением образцов в процессе облучения.

В завершении главы продемонстрированы результаты работы системы мониторинга выведенного пучка и системы динамического позиционирования объектов облучения в процессе пробного испытания ИЭТ на пучках ионов аргона. Продемонстрирована возможность изучения единичных эффектов от воздействия ионов на работу ИЭТ в активном режиме (например, сбой в работе микропроцессора в процессе облучения).

В четвертой главе представлена система мониторинга выведенных пучков Нуклотрона для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация». Рассмотрена актуальность экспериментов коллаборации и обоснована необходимость разработки новой системы мониторинга выведенных пучков. В главе представлена новая созданная система мониторинга и проведен сравнительный анализ работы детекторов системы при работе на выведенных пучках дейтронов и ядер углерода с энергиями 1 – 4 ГэВ/нуклон. На рисунке 5 показана функциональная схема системы мониторинга выведенных пучков.

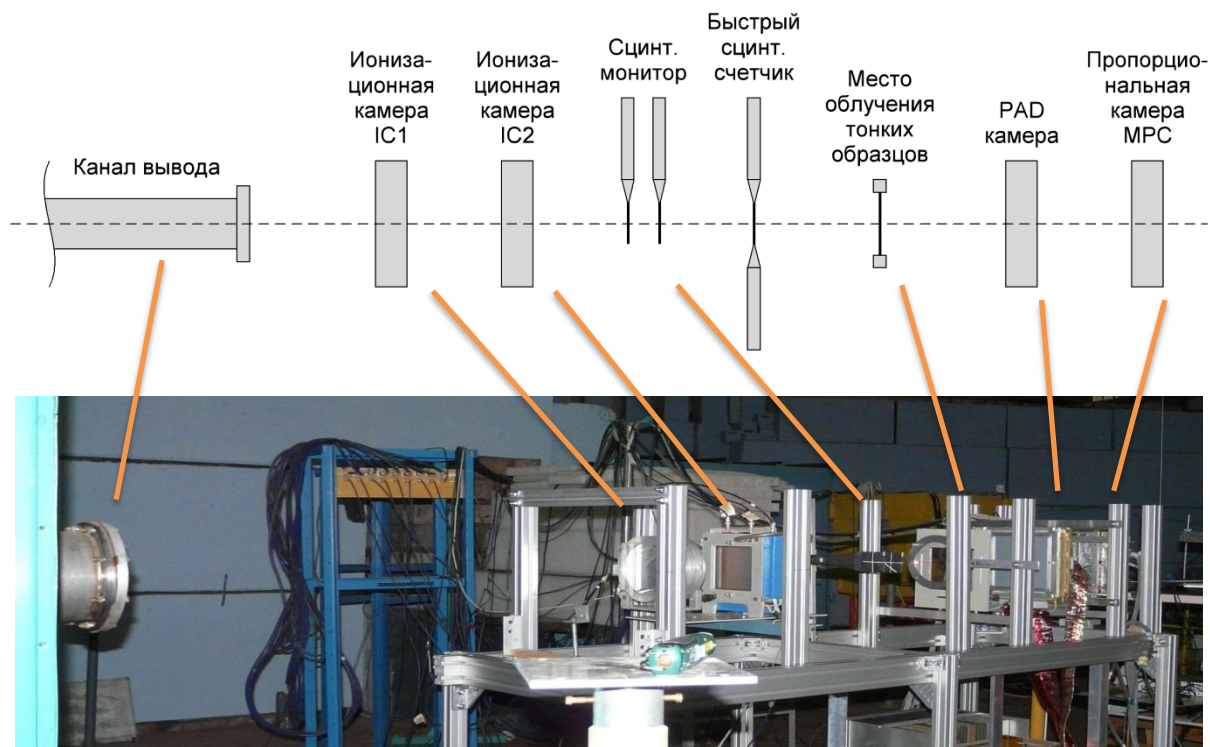


Рисунок 5 – Система мониторинга выведенных пучков Нуклотрона для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация».

Проведен подробный сравнительный анализ результатов измерения интегральной интенсивности пучков при помощи активационной методики и на основе созданных ионизационных детекторов. Проанализированы проблемы точностей измерения абсолютной интегральной интенсивности всеми используемыми методиками.

В диссертации подробно описана методика и результаты абсолютной калибровки ионизационных камер при помощи сцинтилляционных счетчиков на пучках ядер углерода с энергиями от 1 до 4 ГэВ/нуклон. Достигнута точность измерения абсолютной интенсивности в пределах 10 %, что согласуется с теоретической оценкой работы ионизационных детекторов.

Экспериментально обосновано, что секционированная ионизационная камера может быть использована не только для измерения интенсивности пучка, но и для измерения и контроля положения центра тяжести пучка относительно мишени в процессе облучения.

Представлены важные для коллаборации «Энергия+Трансмутация» результаты специального экспериментального исследования о влиянии на системы мониторинга дополнительного «паразитного» вещества, вносимого в пучок.

В заключении сформулированы основные результаты выполненных работ, вошедших в диссертацию.

1) Создана, испытана и введена в эксплуатацию на ускорительном комплексе Нуклотрон система диагностики циркулирующего пучка на основе МКП. Данная система используется для регистрации динамического профиля и относительной интенсивности пучка в течение всего цикла ускорения и вывода с временным разрешением 20 нс и пространственным разрешением – 3 мм (положение центра тяжести пучка с точностью 1 мм). Система работает в диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^9 однозарядных ионов циркулирующих в камере ускорителя при характерном давлении в вакуумной камере на «теплом» участке ускорителя $2 \cdot 10^{-6}$ Па.

2) Показана возможность использования системы диагностики циркулирующего пучка для оптимизации начального этапа ускорения пучка на первых оборотах от момента инжекции, а также для настройки режимов ускорения и медленного вывода пучка, что особенно важно при ускорении пучков тяжелых ионов и пучков низких интенсивностей, которые не регистрируются существующими штатными системами диагностики Нуклотрона.

3) Создан и испытан прототип облучательного стенда для прикладных исследований на выведенных пучках Нуклотрона. В процесс испытаний и калибровки детекторов облучательного стенда проведены измерения и контроль параметров выведенных пучков дейтронов, ионов лития, углерода и аргона в диапазоне энергий 500 – 2000 МэВ/нуклон в широком диапазоне интенсивностей от единиц до 10^{10} ионов в секунду.

4) Система мониторинга облучательного стенда позволила контролировать интенсивность, положение центра тяжести пучка относительно облучаемого объекта с точностью 1 мм, а также состав выведенного пучка.

5) Показана возможность использования системы позиционирования облучательного стенда для облучения объектов испытаний с однородностью не хуже 10 % на площади размером 200×200 мм².

6) Проведено пробное облучение образцов ИЭТ пучком Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон и показана возможность изучения единичных эффектов при воздействии пучка ионов на работоспособность ИЭТ. Разработана методика проведения облучений на основе динамического контроля параметров пучка и перемещения объекта испытания.

7) Создана, испытана и введена в эксплуатацию система мониторинга выведенных пучков Нуклотрона на основе ионизационных камер и сцинтилляционных счетчиков для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация». Данная система использовалась в серии экспериментов в 2011 – 2014 гг. для измерения и контроля интенсивности, временной структуры и положения центра тяжести выведенных пучков

дейтронов и ядер углерода с энергиями 1 – 4 ГэВ/нуклон в диапазоне интенсивностей от 10^5 до 10^{10} ионов в секунду.

8) Проведена абсолютная калибровка ионизационных камер с точностью 10 % на пучках ядер углерода с энергиями от 1 до 4 ГэВ/нуклон.

9) Предложен и апробирован метод мониторингования пучков на основе секционированных проволочных ионизационных камер, позволяющий одновременное измерение интенсивности и отклонения положения центра тяжести пучка (с точностью до 0,5 мм) с использованием минимального числа каналов регистрации и привнесением малого количества вещества на пути пучка.

10) Исследовано влияние на системы мониторингования дополнительного «паразитного» вещества, вносимого в пучок. Данная работа позволила уточнить результаты измерений интегральных интенсивностей выведенных пучков в экспериментах коллаборации «Энергия+Трансмутация».

В приложении А представлены теоретические оценки, связанные с работой детектора на основе МКП, включая характерные поправки для вычисления относительной интенсивности пучка с учетом динамики ускоряемых пучков Нуклотрона.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Балдин А.А., Берлев А.И., Кудашкин И.В., Федоров А.Н.* Детектор на основе микроканальных пластин для контроля пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка Нуклотрона. // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11. № 2(186). С. 209-218.
2. *Балдин А.А., Берлев А.И., Брандова В., Бутенко А.В., Кудашкин И.В., Федоров А.Н.* Прототип облучательного стенда для прикладных исследований на выведенных пучках ускорительного комплекса Нуклотрон // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т.13. № 3(201).
3. *Балдин А.А., Берлев А.И., Васильев С.Е., Вишневский А.В., Владимирова Н.М., Кудашкин И.В., Маканькин А.М., Параипан М., Тютюнников С.И.* Мониторирование выведенных пучков ускорительного комплекса Нуклотрон для экспериментов «Энергия + Трансмутация» // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т.13. № 2(200).
4. *Baldin A.A., Berlev A.I., Fedorov A.N., Kudashkin I.V.* The MCP-based system for monitoring space-time characteristics of the Nuclotron circulating beam // Proceedings of Science (Baldin ISHEPP XXI)079. Dubna, 2012.
5. *Furman W. et al. (E+T Collab.)* Recent results of the study of ADS with 500 kg natural uranium target assembly QUINTA irradiated by deuterons with energies from 1 to 8 GeV at JINR Nuclotron // Proceedings of Science (Baldin ISHEPP XXI)086. Dubna, 2012.
6. *Адам И. и др. (E+T коллаб.)* Исследование пространственных распределений реакций деления и радиационного захвата нейтронов в массивной урановой мишени, облучаемой дейтронами с энергией 1-8 ГэВ (установка «КВИНТА»). Препринт ОИЯИ Р1-2012-147. Дубна, 2012. 20 с.
7. *Аверичев А.С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов Нуклотрона // Сообщения ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011. 15 с.
8. *Аверичев А.С. и др.* Итоги 44-го и 45-го сеансов Нуклотрона // Сообщения ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012. 41 с.

9. *Кудашкин И.В.* Координатно-чувствительная система диагностики циркулирующего пучка ускорителя Нуклотрон // Труды XV научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, 2011. С. 127-130.
10. *Прокошин А.М. и др.* Измерение характеристик полей вторичных нейтронов при взаимодействии дейтронов релятивистских энергий с массивной урановой мишенью // Труды научной конференции «Развитие идей В.И. Вернадского в современной российской науке». Санкт-Петербург, 2013. С. 238-243.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA project at JINR // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9. № 4–5(174-175). С. 521-526.
2. *Аверичев А.С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов Нуклотрона // Сообщения ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011. 15 с.
3. *Knoll G.* Radiation Detection and Measurement // JohnWiley & Sons. New York, 1989.
4. *Верхотуров В.И.* Проблемы обеспечения радиационной стойкости элементов и аппаратуры современных спутников связи // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. № 6.
5. *Адам И. и др. (E+T коллаб.)* Исследование пространственных распределений реакций деления и радиационного захвата нейтронов в массивной урановой мишени, облучаемой дейтронами с энергией 1-8 ГэВ (установка «КВИНТА») // Препринт ОИЯИ Р1-2012-147. Дубна, 2012. 20 с.
6. *Балдин А.А. и др. (E+T коллаб.)* Ядерные релятивистские технологии (ЯРТ) для производства энергии и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Результаты первых экспериментов по физическому обоснованию ЯРТ. // Письма в ЭЧАЯ. 2011. Т. 8. № 6(169). С. 1007-1023.