

На правах рукописи

Кудашкин Иван Васильевич

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ 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, 2015 г.

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Балдин Антон Александрович

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 2015 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 «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета: Арефьев Валентин Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшей задачей любого ускорительного комплекса 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]. Поскольку на Нуклотроне планируется ускорение широкого спектра ионов вплоть до золота, существует проблема настройки и контроля вывода пучков тяжелых ионов с низкой интенсивностью от единиц до 10^6 частиц за цикл ускорения. Первая часть диссертационной работы посвящена решению этой актуальной задачи – созданию системы неразрушающего контроля пространственных и временных характеристик циркулирующих пучков Нуклотрона в процессе ускорения и вывода из ускорителя.

Создание систем диагностики, обеспечивающих работу с низкоинтенсивными пучками (в особенности с пучками тяжелых ионов), является актуальной задачей и для развития ускорительного комплекса ЛФВЭ в целом, в особенности для прикладных исследований. Выведенные пучки Нуклотрона представляют уникальные возможности проведения разнообразных исследований с набором как легких, так и тяжелых ядер в области промежуточных энергий от сотен МэВ до нескольких ГэВ на нуклон.

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 ядер становится важным фактором в реализации национальных программ для космических исследований [3,4]. Наиболее подходящий диапазон энергии пучков ионов для проведения таких исследований соответствует интервалу 100 – 2000 МэВ/нуклон, что соответствует проектным параметрам выведенных пучков Нуклотрона. Разработке, созданию и пучковым испытаниям специализированного облучательного стенда для прикладных исследований посвящена вторая часть диссертации.

На выведенных пучках Нуклотрона традиционно проводятся уникальные эксперименты по облучению протяженных мишеней из тяжелых элементов («Гамма-3», «КВИНТА» и др.) в рамках проекта «Энергия + Трансмутация» [5,6], 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 для этих экспериментов. Разработке, созданию,

испытаниям, калибровке и вводу в эксплуатацию новой системы мониторинга выведенных пучков посвящена третья часть настоящей диссертации.

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

Этим целям были подчинены следующие направления работы автора:

1) Участие в разработке системы неразрушающей диагностики циркулирующего пучка Нуклотрона на основе микроканальных пластин (МКП).

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».

4) Участие в разработке, создании и пучковых испытаниях прототипа облучательного стенда для прикладных исследований на выведенных пучках Нуклотрона.

5) Разработка и создание электротехнической части и ПО системы позиционирования облучаемых объектов и детекторов стенда.

6) Участие в разработке и применении методики калибровки детекторов облучательного стенда на основе ионизационных камер, сцинтилляционных детекторов и ядерных фотоэмульсий.

7) Участие в разработке и применении методики проведения облучений исследуемых образцов на облучательном стенде.

8) Участие в разработке, создании и эксплуатации системы мониторинга выведенных пучков для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация».

9) Разработка и реализация методики абсолютной калибровки ионизационных камер на пучках релятивистских дейтронов и ядер углерода с использованием сцинтилляционных счетчиков.

10) Участие в проведении экспериментов и обработки данных коллаборации «Энергия+Трансмутация».

Новизна и практическая значимость работы. Разработана, испытана и введена в эксплуатацию система неразрушающей диагностики циркулирующих пучков Нуклотрона на основе МКП. Система позволяет контролировать и настраивать циркуляцию и ускорение низкоинтенсивных пучков от момента инжекции пучка в ускоритель до вывода пучка

потребителю. Впервые на Нуклотроне удалось провести ускорение низкоинтенсивного пучка α -частиц (10^6 частиц/цикл) с on-line визуализацией параметров пучка системой на основе МКП, что позволило отработать методику настройки циркуляции и ускорения низкоинтенсивных пучков.

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 в режиме реального времени. Пространственные и временные характеристики новой системы превосходят существующие на Нуклотроне детекторные системы для пучков низкой интенсивности.

Разработанный прототип дистанционно управляемого облучательного стенда позволил провести исследования по воздействию ионов на работу ИЭТ. Стенд расположен в непосредственной близости от места вывода пучка из Нуклотрона, что обеспечивает минимизацию вещества на пути пучка до облучаемых образцов. Система позиционирования и диагностики выведенных пучков ионов позволяет проводить облучения образцов на площади 200×200 мм² 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 с точностью 1 мкс и регистрировать отклонение положения центра тяжести выведенного пучка с точностью 1 мм в режиме реального времени. Использование данной системы мониторинга позволило получить принципиально новые экспериментальные данные при облучении большой (500 кг) урановой мишени пучками релятивистских ядер.

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

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

5) Результаты измерений пространственно-временных характеристик циркулирующих и выведенных пучков Нуклотрона.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались автором на XXI и XXII международных конференциях по «Релятивистской ядерной физике и квантовой хромодинамике» (Baldin ISHEPP), на трех семинарах в ЛФВЭ ОИЯИ, а также на XV, XVI и XVII конференциях ОМУС ОИЯИ.

По результатам работ, вошедших в диссертацию, автору присуждена стипендия им. Маркова в 2011 г.; поощрительная премия им. Векслера в 2011 г.; 1-ая премия молодым ученым и специалистам в 2013 г. и стипендия им. Балдина в 2015 г. Работы, вошедшие в диссертацию, поддержаны грантом ЛФВЭ ОИЯИ для молодых ученых 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 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 58 наименований. Общий объем диссертационной работы составил 89 страниц, включая 55 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 работе по разработке, созданию, испытаниям и вводу в эксплуатацию системы неразрушающей диагностики циркулирующего пучка ускорителя Нуклотрон на основе МКП.

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, система сбора и отображения данных. На рисунке 1 показана принципиальная конструкция детектора. Представлена методика и результаты испытания детектора на специализированном вакуумном стенде.

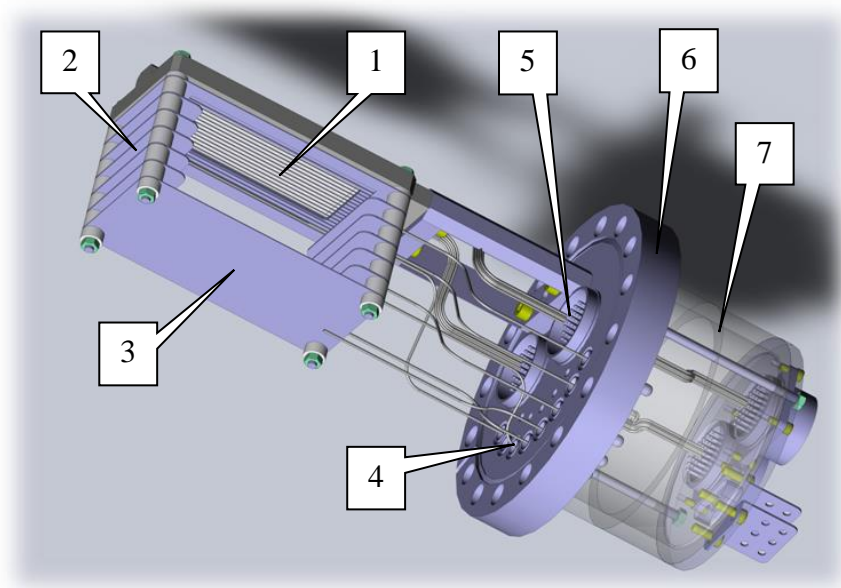


Рисунок 1 – Трехмерная модель детектора для диагностики радиальной координаты пучка Нуклотрона. 1 – запирающий электрод, шевронная сборка МКП и печатная плата с многоканальным коллектором; 2 – электроды, выравнивающие электростатическое поле транспортировки ионов; 3 – ускоряющий электрод; 4 – высоковольтные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

Представлены результаты измерений пространственно-временных характеристик пучков для различных режимов ускорения от энергии инжекции до 4 ГэВ/нуклон. На рисунке 2 показан пример динамического профиля и относительной интенсивности циркулирующего пучка зарегистрированный нашей системой для одного цикла ускорения.

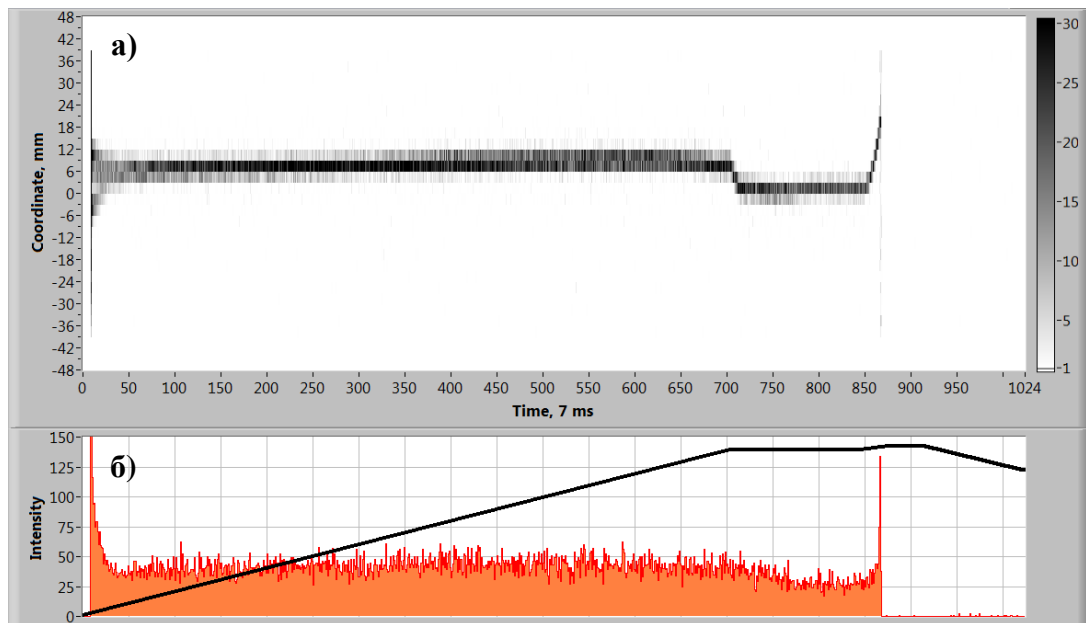


Рисунок 2 – Динамический профиль (а) и относительная интенсивность (б) циркулирующего пучка дейтронов при ускорении до энергии 4 ГэВ/нуклон. Черная кривая области (б) соответствует величине магнитного поля ускорителя.

Продемонстрирована возможность регистрации пучка в однооборотном режиме работы при инжекции 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 главе проиллюстрированы результаты пучковых испытаний системы диагностики на основе МКП в семи сеансах работы ускорительного комплекса (2012 – 2014 гг.) при работе с циркулирующими пучками дейтронов, альфа частиц, ионов углерода и аргона. 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. Для учета релятивистской динамики движения частиц в ускорителе, в Приложении А диссертации описана методика расчета поправочных функций для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка с учетом изменения 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 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.).

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

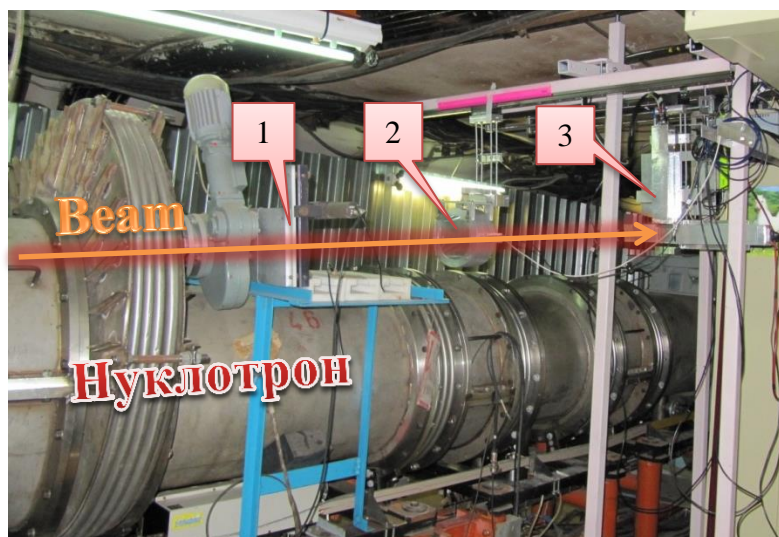


Рисунок 3 – Фотография прототипа облучательного стенда. 1 – окно вывода пучка; 2,3 – детекторы системы мониторинга пучка.

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 синхронизированных измерений характеристик циркулирующего (система на основе МКП) и выведенного пучка (система мониторинга облучательного стенда) для одного цикла ускорения и вывода, полученные двумя системами в процессе облучения ИЭТ ионами аргона.

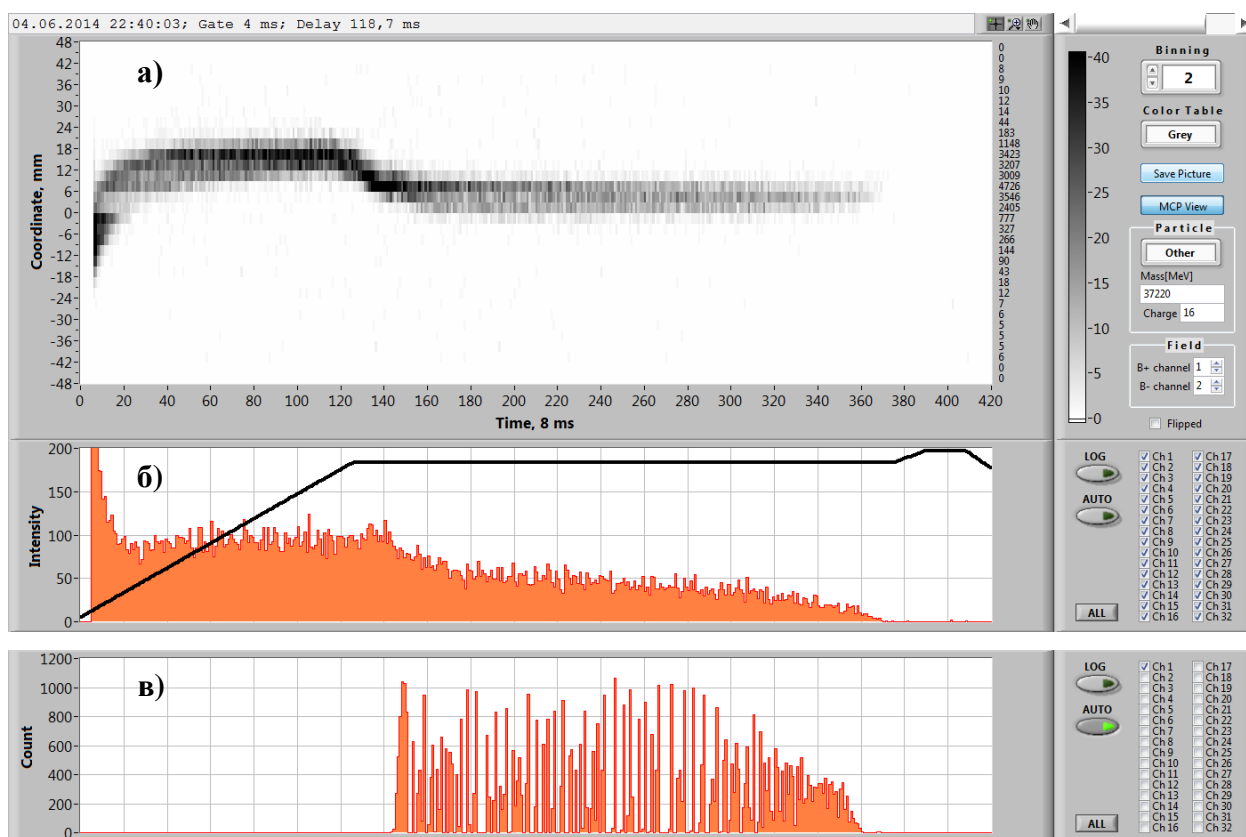


Рисунок 4 – Цикл ускорения и вывода пучка ионов аргона Ar^{16+} . Радиальный профиль (а) и относительная интенсивность (б) циркулирующего пучка ионов аргона Ar^{16+} при ускорении до энергии 500 МэВ/нуклон. (в) – интенсивность выведенного пучка ионов аргона в месте облучения исследуемых образцов.

В главе описаны разработанные методики облучений, а также результаты калибровки детекторов стенда на основе ионизационных камер и ядерных фотоэмульсий. 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 систем мониторинга выведенного пучка и 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, сбои 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.

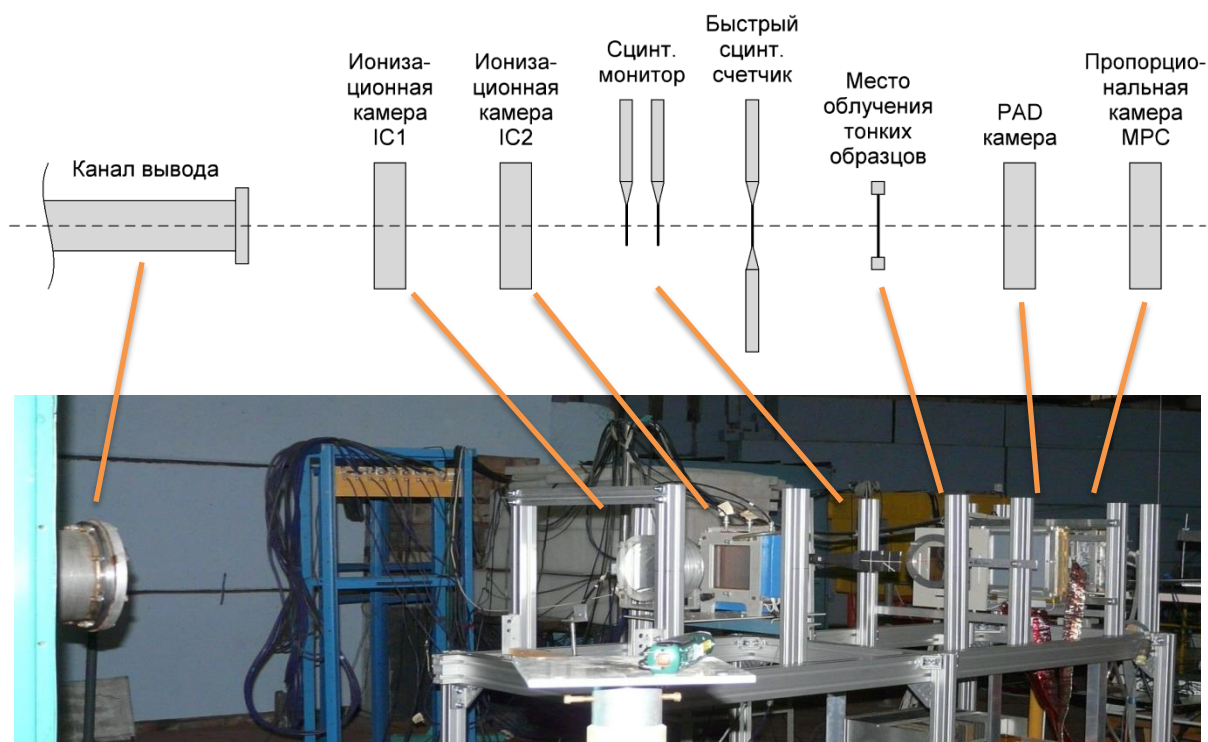


Рисунок 5 – Система мониторинга выведенных пучков Нуклотрона для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация».

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 отклонения положения 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 система 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, состав выведенного пучка и положение центра тяжести пучка относительно облучаемого объекта с точностью 1 мм.

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 мониторинга 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 внесением малого количества вещества на пути пучка.

10) Исследовано влияние на системы мониторинга 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., Браднова 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. 2015 (принято к публикации).
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.* Мониторинг выведенных пучков ускорительного комплекса Нуклотрон для экспериментов «Энергия + Трансмутация» // Письма в ЭЧАЯ. 2015 (принято к публикации).
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 // PoS (Baldin ISHEPP XXI). 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 // PoS (Baldin ISHEPP XXI). 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. и др.* Координатно-чувствительная система диагностики циркулирующего пучка ускорителя Нуклотрон // Труды конференции ОМУС-2011.
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», 2013.

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. *Верхогуров 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.