

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ им. В.И. ВЕКСЛЕРА и
А.М. БАЛДИНА

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Балдин А.А.

Дубна, 2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	8
1.1 Методы неразрушающего контроля пространственно-временных характеристик пучков в ускорителях.....	8
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ НУКЛОТРОН	20
2.1 Особенности работы с пучками Нуклотрона. Постановка задачи	20
2.2 Конструкция детектора.....	23
2.3 Испытания детектора на вакуумном стенде	26
2.4 Описание системы диагностики циркулирующего пучка	29
2.5 Результаты работы	32
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИРОВАНИЯ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	41
3.1 Прикладные исследования и особенности работы на выведенных пучках Нуклотрона	41
3.2 Описание облучательного стенда для прикладных исследований.....	44
3.3 Результаты испытаний стенда.....	52
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИРОВАНИЯ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ЭНЕРГИЯ+ТРАНСМУТАЦИЯ».....	60
4.1 Постановка задачи и описание системы мониторинга.....	60
4.2 Результаты работы	64
4.3 Калибровка ионизационных камер.....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73
ПРИЛОЖЕНИЕ А	76
А.1 Оценка времени дрейфа ионов остаточного газа в вакуумной камере Нуклотрона в месте расположения МКП-детектора	76
А.2 Расчет поправочной функции для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	84

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ускорители заряженных частиц применяются не только для фундаментальных исследований в области ядерной физики, но все более находят применение в прикладных исследованиях, медицине и промышленности. Важнейшей задачей, решаемой при проектировании и эксплуатации любого ускорительного комплекса, является разработка и создание современных систем диагностики, мониторинга и управления пучками заряженных частиц.

В зависимости от типа ускорителя и решаемых задач детекторные системы зачастую должны удовлетворять противоречивым требованиям: минимальное воздействие на пучок (работу ускорителя) и при этом высокая чувствительность и эффективность регистрации. Как правило, совокупность требований и условий работы для конкретного ускорительного комплекса уникальна, поэтому разработка систем мониторинга и диагностики пучков требует оригинальных решений, как с точки зрения конструкции детектора, так и вспомогательной электроники и оборудования обеспечения их работы. Системы диагностики и мониторинга не должны влиять на работу ускорителя и в тоже время сами, как правило, подвержены различным воздействиям со стороны ускорителя: радиационная нагрузка, электромагнитные наводки, температурные режимы, кроме того зачастую предъявляются требования работы в вакууме, ограниченном пространстве и т.п.

Настоящая диссертация посвящена разработке, созданию, пучковым испытаниям и вводу в эксплуатацию систем диагностики и мониторинга внутренних (циркулирующих) и выведенных пучков ускорительного комплекса Нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ. Обзор литературы по методам и особенностям диагностики и мониторинга пучков ускорителей представлен в **Главе 1** диссертации.

Актуальность работы. В рамках реализации проекта NICA [1] и экспериментов с выведенными пучками ускорительного комплекса Нуклотрон в 2011 г. была поставлена задача по созданию новых детекторов для диагностики и мониторинга 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. **Глава 2** диссертационной работы посвящена решению этой актуальной задачи – создание системы неразрушающего контроля пространственных и временных характеристик циркулирующих пучков Нуклотрона в процессе ускорения и вывода из ускорителя.

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 космических исследований [3,4,5]. Наиболее подходящий диапазон энергии пучков ионов для проведения таких исследований соответствует интервалу 100 – 2000 МэВ/нуклон, что согласуется с проектными параметрами выведенных пучков Нуклотрона. Разработке, созданию и пучковым испытаниям специализированного облучательного стенда (ОС) для прикладных исследований посвящена **Глава 3** настоящей диссертации.

На выведенных пучках Нуклотрона в рамках проекта «Энергия + Трансмутация» [6,7,8] 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 **Глава 4** диссертации.

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.

Этим целям 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».

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.

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 инжекции.

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 инжекции пучка 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 облучательного стенда; разработка и создание 16-ти канального сцинтилляционного годоскопа и тонких сцинтилляционных счетчиков прототипа ОС; разработка ПО для управления системой позиционирования и визуализации данных с системы мониторинга ОС; калибровка системы мониторинга ОС 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.

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты выполненных работ.

В **Приложении А** приведена методика расчетов поправочных функций для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка, а также представлены оценки точности измерения пространственно-временных характеристик пучков для созданной системы диагностики на основе МКП.

ГЛАВА 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Методы неразрушающего контроля пространственно-временных характеристик пучков в ускорителях

Для диагностики пучков линейных ускорителей и выведенных пучков циклических ускорителей с целью обеспечения достаточной чувствительности системы диагностики, как правило, необходимо внесение дополнительного активного вещества детектора в пучок. Недостатком данного метода, очевидно, является разрушающее воздействие на пучок. Для минимизации данного воздействия в качестве активного вещества детектора широко применяются газы и тонкие фольги из различных, как правило, радиационно-стойких материалов.

Одним из наиболее востребованных направлений диагностики и контроля является неразрушающий метод, при котором на пути пучка не вносится дополнительного вещества. Такой метод широко применяется для диагностики циркулирующих пучков синхротронов, где в процессе ускорения пучок многократно проходит место расположения детектора в вакуумной камере ускорителя.

Условно методы неразрушающего контроля пучков заряженных частиц можно подразделить на две группы: электромагнитный и ионизационный.

К основным детекторам неразрушающего контроля электромагнитного метода можно отнести pick-up электроды [9], индукционные датчики (трансформаторы тока) [10] и детекторы синхротронного излучения пучка, генерируемого в поворотных магнитах [11]. Детекторы, основанные на pick-up электродах, регистрируют заряд, наведенный от циркулирующего пучка. Данная методика позволяет определять положение центра тяжести пучка, а также его относительную интенсивность. Принцип работы трансформаторов тока основан на измерении наведенной электромагнитной индукции при прохождении пучка через индуктивный элемент. Как правило, индукционные детекторы используются для измерения интенсивности пучка. Детекторы синхротронного излучения используются для определения временной структуры пучка. К недостаткам электромагнитного метода неразрушающей диагностики можно отнести слабую чувствительность, что ограничивает его применение по интенсивности. Обычно такие методы используются для измерения достаточно интенсивных пучков заряженных частиц, начиная от 10^9 однозарядных ионов и выше.

Неразрушающий ионизационный метод основан на результате взаимодействия (возбуждения и ионизации) остаточного газа в вакуумной камере ускорителя. Данный метод основан на регистрации продуктов ионизации остаточного газа, а также регистрации фотонного

излучения при возбуждении молекул остаточного газа [12]. Ионы и электроны, образовавшиеся в результате взаимодействия циркулирующего пучка с остаточным газом в вакуумной камере ускорителя, транспортируются при помощи электростатических систем на детекторы, расположенные вне области циркуляции пучка. Для регистрации ионов и электронов могут быть использованы диодные и проволочные вторичные электронные умножители (ВЭУ) [13], МКП [14], металлические коллекторные электроды [15] и другие типы детекторов. В зависимости от конструкции детектора данный метод может быть использован, как для регистрации пространственно-временной структуры пучка в месте расположения детектора, так и для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка во времени. Для регистрации фотонного излучения при возбуждении молекул остаточного газа [12,16,17] широко используются фото-электронные умножители (ФЭУ) и фотодиоды. К недостаткам ионизационного метода неразрушающей диагностики относится проблема точности измерения вакуума и состава остаточного газа в месте расположения детектора в вакуумной камере ускорителя. В случае недостаточного количества остаточного газа применяется метод дозированного впрыскивания газа в камеру ускорителя в месте расположения детектора, что, конечно, усложняет процедуру измерений и систему контроля всех параметров. В любом случае, для функционирования данной методики необходимо измерение вакуума и контроль состава газа остаточного газа внутри вакуумной камеры ускорителя в месте расположения детектора.

Существует альтернативный метод определения пространственно-временных характеристик циркулирующих пучков основанный на регистрации рассеяния мощного лазерного излучения на ионах ускоряемого пучка [18]. Данный метод был экспериментально изучен в Стэнфордском центре линейных ускорителей и Лаборатории физики высоких энергий (КЕК, Япония) [19].

Одним из перспективных направлений является ионизационный метод диагностики пучка ускорителя, в котором для регистрации продуктов ионизации остаточного газа используется детектор на основе МКП. Детектор такого типа используется, например, для регистрации профиля циркулирующего пучка на синхротроне SIS в GSI [20,21]. На рисунке 1.1 схематически показана конструкция данного детектора, где шевронная сборка из двух МКП используется для регистрации электронной составляющей ионизированного газа. Коэффициент усиления сигнала шевронной сборки при регистрации каждого электрона может достигать 10^8 [14,22,23].

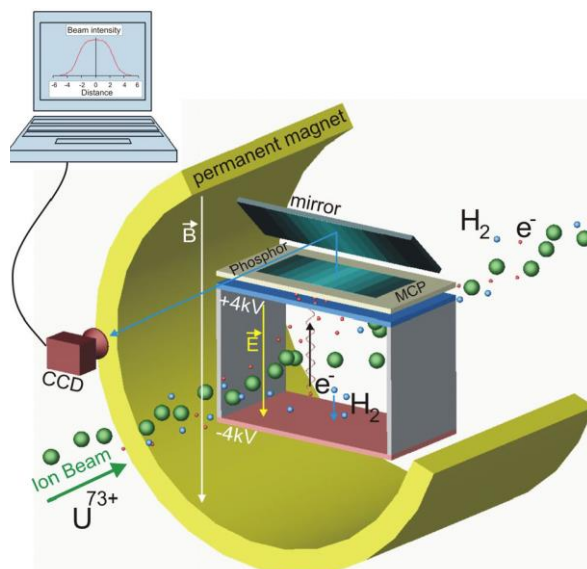


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение конструкции детектора для регистрации профиля циркулирующего пучка на синхротроне SIS в GSI.

Для транспортировки электронов на поверхность МКП используется электростатическое поле с градиентом 0,5 кВ/см, что не оказывает существенного влияния на ускоряемый пучок. Так как масса электрона в 3670 раз меньше массы иона H_2^+ , он имеет большую подвижность, и тем самым, использование электронной составляющей дает преимущество в быстродействии системы. Однако, после ионизации молекулы остаточного газа, образовавшийся электрон имеет начальную энергию в широком диапазоне углов вылета и соответственно импульс, перпендикулярный направлению дрейфа в электростатическом поле. Это приводит к отклонению начальной координаты электронов и ионов от места ионизации и тем самым ухудшает пространственное разрешение детектора. Для ионов данное отклонение является несущественным и зачастую им можно пренебречь. Проблему использования электронной составляющей также усложняет наличие свободных электронов в вакуумной камере, которые также могут быть зарегистрированы детектором. В описываемой конструкции для уменьшения влияния данных факторов используют постоянное магнитное поле величиной 0,1 Тл, направленное параллельно электростатическому полю дрейфа. Таким образом, электроны движутся к поверхности детектора по спирали, циклотронный радиус которой определяется величиной магнитного поля и начальной энергией электрона. Принимая во внимание, что более 90 % электронов ионизации имеют начальную энергию менее 50 эВ, то указанное магнитное поле обеспечивает циклотронный радиус электронов 0,1 мкм, что соответствует разрешению шевронной сборки на основе МКП [12,20,21,24]. Магнитное поле также препятствует попаданию малоэнергетичных электронов, образовавшихся вне активной области детектора, на рабочую область МКП. Методика использования магнитного поля применяется, как правило, только для сбора электронной составляющей продуктов ионизации. Необходимо также

учитывать, что приложенное магнитное поле не должно оказывать существенного влияния на сам диагностируемый (ускоряемый) пучок. В противном случае применяют компенсирующее магнитное поле. Важно отметить, что для мониторинга высокоинтенсивных пучков с большой зарядностью пространственный заряд пучка существенно влияет на результаты измерений даже в случае регистрации ионной компоненты ионизированного остаточного газа и в таком случае более предпочтительным является использование электронной составляющей с коррекцией траектории при помощи магнитного поля [12].

На рисунке 1.2 изображен пример оптической схемы детектора, используемый в работе [21]. Пластина люминофора расположена за МКП и служит для конвертирования электронных лавин, образованных МКП в результате усиления, в фотонное излучение видимого диапазона. За люминесцентным экраном следует система линз и поворотное зеркало. Положение зеркала определяет режим работы детектора: использование CCD-камеры (Charge-Coupled Device) или фотодиодной матрицы. Особенностью данного детектора является использование двух различных механизмов регистрации профиля пучка: для регистрации с пространственным разрешением до 0,1 мм используется CCD видекамера с характерным временем измерения 10 мс; для скоростей измерения на уровне 1 мкс используется фотодиодная матрица, при этом пространственное разрешение составляет 1 мм. Такого типа детекторы планируется также использовать для регистрации профилей пучков на строящихся в настоящее время ускорителях в GSI.

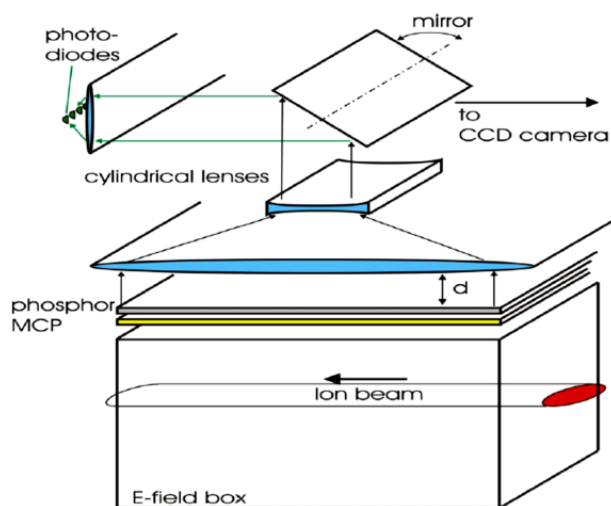


Рисунок 1.2 – Оптическая схема детектора для регистрации профиля циркулирующего пучка на синхротроне SIS в GSI.

Для неразрушающей диагностики двумерного профиля и относительной интенсивности пучка на циклотроне У400М в ЛЯР ОИЯИ создано устройство устойчивое к высоким радиационным нагрузкам [15]. Детектор показал свою работоспособность в вакуумной камере ускорителя в диапазоне давлений $10^{-6} - 10^{-3}$ мБар при минимальном токе пучка порядка десяти

наноампер. Особенность условий эксплуатации профилометра обусловлена его расположением в непосредственной близости от мишени, где нейтронный поток составляет более 10^6 нейтрон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Авторы [15] основное внимание уделили вопросам надежности и долговременной эксплуатации детектора, поэтому отказались от использования элемента регистрации на основе МКП, обосновав это процессами старения МКП в условиях длительной работы при высоких радиационных нагрузках.

Принцип работы данного детектора основан на регистрации ионной составляющей остаточного газа. Оригинальная конструкция детектора, позволяющая определять двумерный профиль пучка, изображена на рисунке 1.3. Детектор состоит из трех основных частей: экстрактор; сканер и анализатор. Экстрактор используется для извлечения и ускорения образовавшихся ионов, которые приобретают кинетическую энергию пропорционально пройденному пути. Сканер и анализатор используются для выделения заданной энергии, приобретаемой ионами в процессе движения от места ионизации до коллектора. Прохождение ионов с заданной энергией через анализатор и узкую щель коллектора (1 мм) позволяет выделить ионы, образовавшиеся в заданной координате вдоль одного выбранного направления. Сканирование всей анализируемой области достигается путем изменения напряжений на сканере и анализаторе. Профилометр имеет два независимых анализатора, размещенных последовательно, что позволяет измерять профили пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях. Профили пучка по горизонтальной и вертикальной осям определяются функциональной зависимостью от сигнала с коллектора и величин напряжений на сканере и анализаторе.

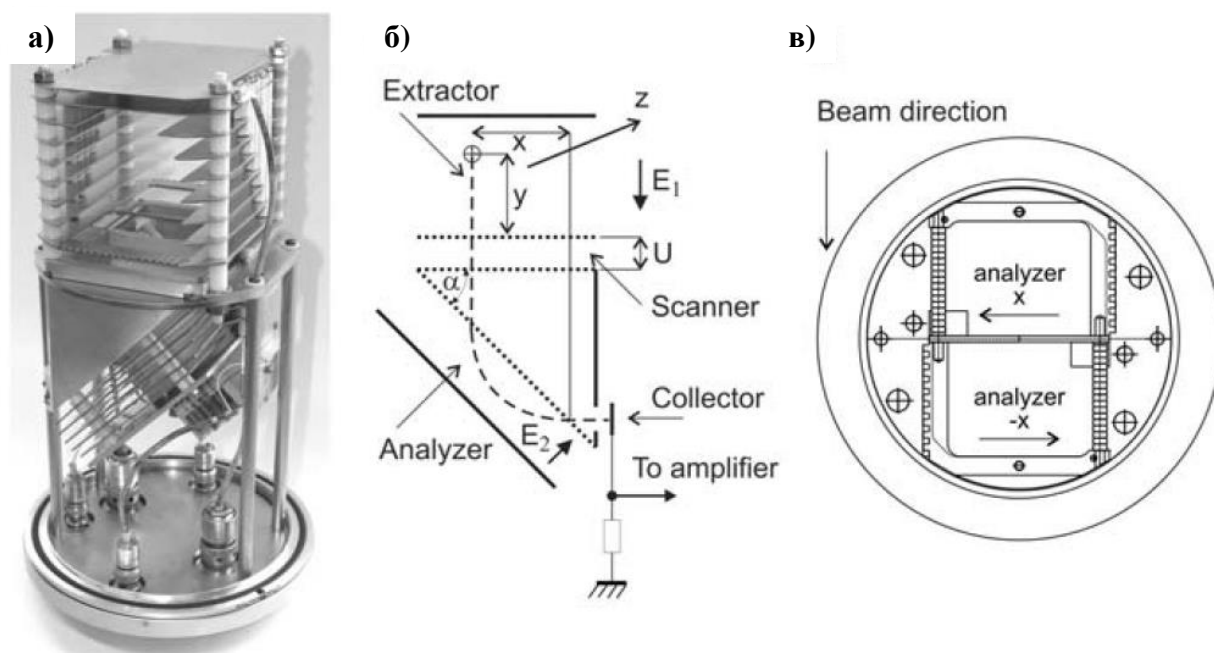


Рисунок 1.3 – Конструкция детектора для регистрации профиля циркулирующего пучка на циклотроне У400М в ЛЯР ОИЯИ. (а) – конструкция профилометра; (б) – схематическое изображение профилометра; (в) – схематическое изображение нижней части профилометра.

Данная конструкция детектора предполагает использование высокочувствительной электроники для измерения токов коллектора с плотностью в диапазоне от 10^{-13} до 10^{-11} А/мм². При этом, в силу упомянутых высоких радиационных нагрузок, усилители тока и источники высокого напряжения обычно располагаются на расстоянии не менее 0,5 м от профилометра, либо за защитой, что создает дополнительные трудности в эксплуатации детектора (электромагнитные наводки и т.п.). Используя сканирующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на базе микропроцессора, детектор позволяет регистрировать 10 профилей пучка за 100 мс. Профилометр использовался для диагностики пучков ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{32}\text{S}$ с энергиями 30 – 50 МэВ/нуклон и ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{86}\text{Kr}$, ${}^{132}\text{Xe}$ с энергиями 4 – 5 МэВ/нуклон в диапазоне токов пучка от 5 нА до 15 мкА. Регистрируемый ток ионизации данного детектора зависит от: давления в вакуумной камере ускорителя; интенсивности, энергии и зарядового состояния ионов пучка; размера щели анализатора. Таким образом, данный детектор позволяет регистрировать двумерный профиль пучка с пространственным разрешением 1 мм.

Оригинальная конструкция трехмерного профилометра на основе МКП создана на ускорителе CRYRING в Швеции [25,26]. Профилометр расположен в зазоре дипольного поворотного магнита ускорителя, что обеспечивает наличие магнитного поля 0,6 – 0,7 Тл в активной области детектора. На рисунке 1.4 схематически показана конфигурация и принцип работы детектора. Профилометр состоит из двух детекторов на основе шевронной сборки МКП (диаметром 40 мм), расположенных сверху и снизу от циркулирующего пучка. Особенностью данного профилометра является возможность регистрации как электронной, так и ионной компоненты продуктов ионизации. Для восстановления горизонтального профиля пучка используется электронная составляющая продуктов ионизации остаточного газа. Под действием электростатического поля, а также параллельного ему магнитного поля электроны транспортируются на поверхность МКП. Детектор электронной составляющей остаточного газа оснащен двумерным резистивным анодом для регистрации электронных лавин с МКП. Детектор ионной составляющей использует сплошной анод для регистрации усиленного МКП сигнала. Подобная конструкция профилометра позволяет восстанавливать вертикальный профиль пучка, измеряя разницу времени дрейфа электронов и ионов, вычисляя тем самым место возникновения ионизации. При этом для ионной составляющей требуется лишь регистрация события прихода иона безотносительно к его координате ионизации. К тому же, так как время дрейфа электрона много меньше времени дрейфа иона, можно считать, что электроны достигают детектора мгновенно. Авторы отмечают, что времяпролетный спектр ионов показывает также различные компоненты состава остаточного газа.

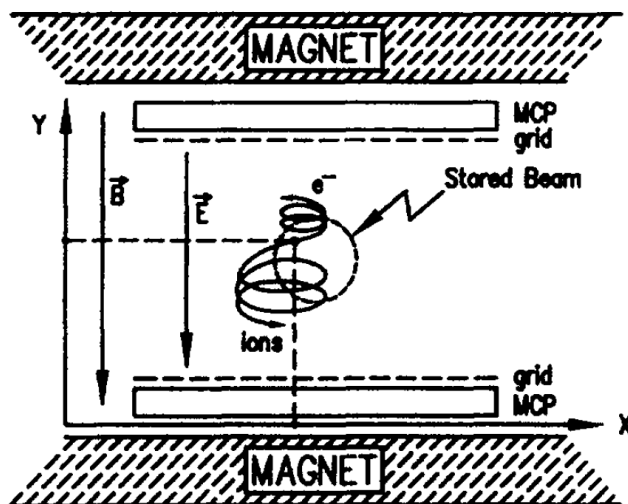


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение конфигурации детектора для регистрации профиля циркулирующего пучка синхротрона CRYRING.

Конструкция двумерного резистивного анода профилометра позволяет регистрировать распределение плотности циркулирующего пучка вдоль его оси на протяженности 40 мм. На рисунке 1.5 показано трехмерное изображение циркулирующего пучка, восстановленное при помощи распределения Гаусса, где величины среднего и ширины измерены при помощи профилометра. Профилометр был испытан на пучках D^+ с энергией 8 МэВ/нуклон, интенсивностью порядка 10^7 частиц.

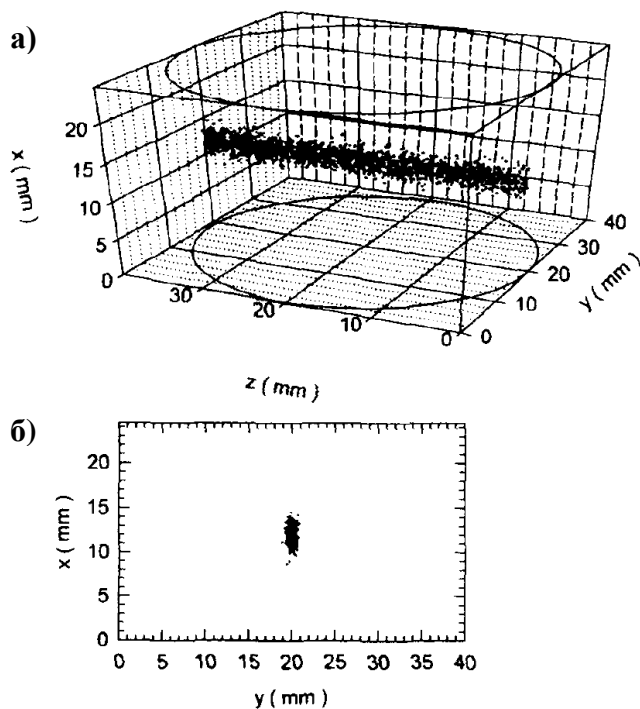


Рисунок 1.5 – Трехмерное изображение пучка D^+ 8 МэВ/нуклон (а), восстановленное как два распределения Гаусса в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Величины среднего и ширины распределений измерены с помощью профилометра. Проекция трехмерного изображения (б).

Эффективная конструкция ионизационного монитора поперечного сечения пучка, работающая на ионной компоненте остаточного газа, создана для линейного ускорителя ИЯИ РАН [27,28,29]. Профилومتر располагается на выходе из ускорителя и регистрирует пучки протонов с энергиями 74 – 209 МэВ при импульсном токе пучка 0,1 – 15 мА. На рисунке 1.6 показано схематическое изображение и трехмерная модель профилометра.

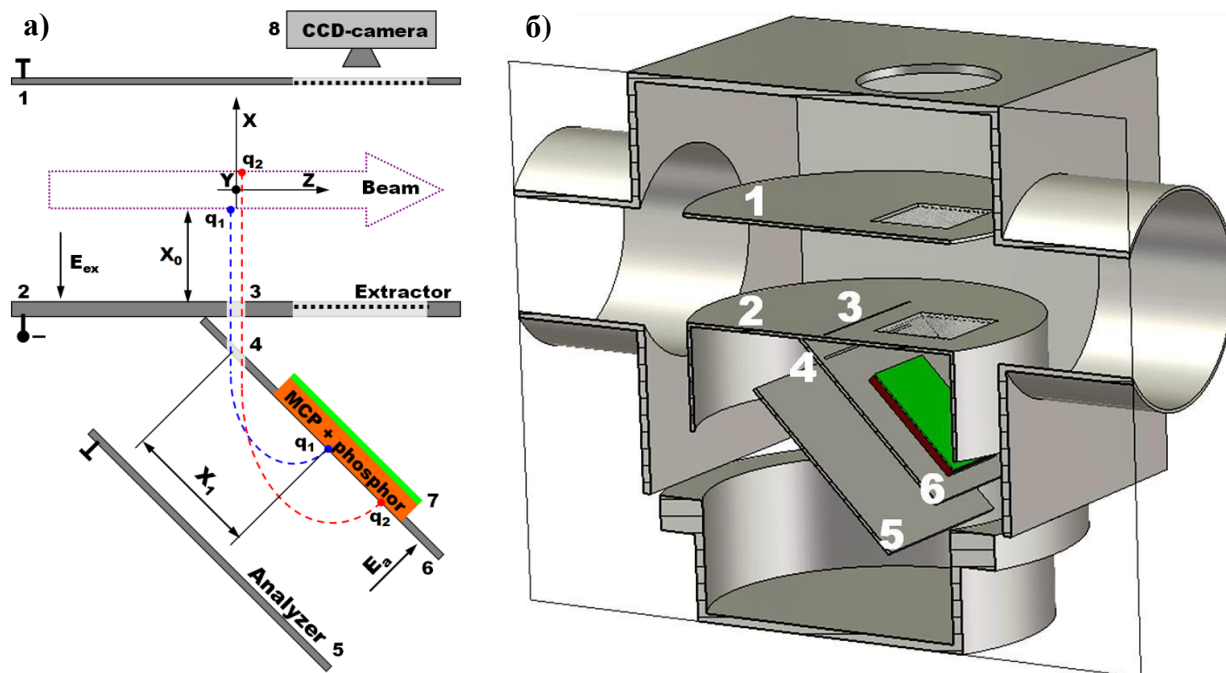


Рисунок 1.6 – Схематическое изображение (а) и трехмерная модель (б) профилометра.

Образовавшиеся под воздействием пучка ионы ускоряются в электростатическом поле и проходят через щель шириной 1 мм по оси Z, образуя «ленточный пучок». При этом ионы q_1 и q_2 , образовавшиеся с разными координатами по оси X, приобретают разную порцию энергии. Поэтому распределение ионов по энергиям в ленточном пучке соответствует распределению частиц по оси X в исследуемом первичном пучке. При этом распределение по координате Y совпадает с распределением плотности частиц в первичном пучке, как в одномерных ионизационных профилометрах. Далее ленточный пучок попадает в электростатическое поле анализатора, где ионы распределяются по энергиям вдоль поверхности регистрирующего детектора (шеvronная сборка МКП). Таким образом, на люминесцентном экране, расположенном за МКП, формируется двумерное изображение поперечного сечения первичного пучка. При этом координата регистрации иона на МКП не зависит от его массы и заряда, следовательно, все сорта ионов молекул остаточного газа дают вклад в формирование профиля пучка. Пространственное разрешение профилометра авторы оценивают на уровне 0,3 мм.

Интересный метод борьбы с перегрузками МКП представлен в работе [30]. По два однотипных профилометра расположены на обоих кольцах коллайдера RICH, где ускоряются ионы – от протонов с энергией 250 ГэВ до полностью «ободранного» иона золота с энергией 100 ГэВ/нуклон. На рисунке 1.7 показано схематическое изображение и фотография профилометра. Для регистрации электронной составляющей продуктов ионизации используется шевронная сборка МКП.

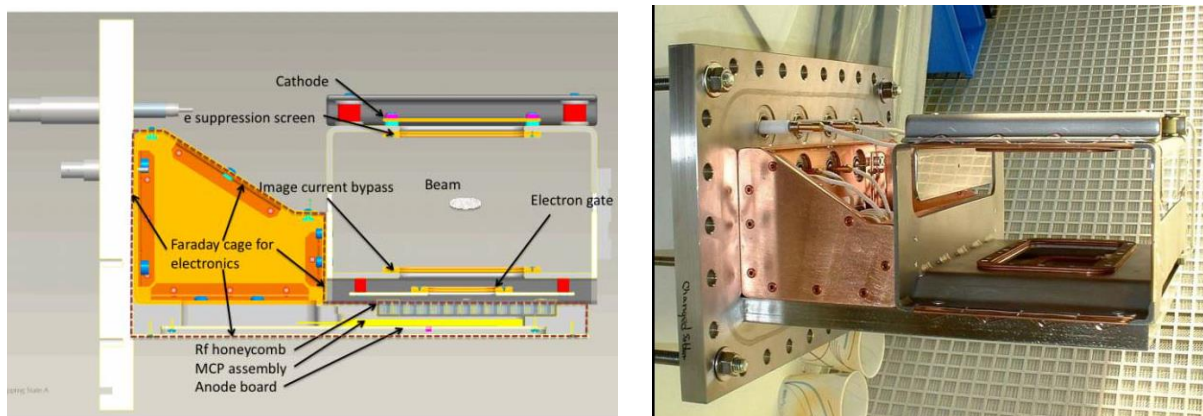


Рисунок 1.7 – Схематическое изображение и фотография профилометра коллайдера RICH.

Особенность данной конструкции заключается в использовании запирающей сетки. Для предотвращения попадания электронов на МКП сетка запирается потенциалом -6 кВ. Во время измерения на сетку подается потенциал земли в течение 12 мкс (один оборот пучка), после чего сетка снова запирается на время 1,2 мс (100 оборотов пучка). После проведения 100 циклов измерения и запираения сеткой, полученные данные усредняются. Данную технику авторы используют для предотвращения перегрузки МКП, так как каждый канал МКП имеет мертвое время около 1 мс. Для сбора электронных лавин с выхода МКП используется 64-сегментный коллектор, расположенный на керамической печатной плате. Следует отметить, что МКП и коллектор располагаются в специальном металлическом боксе для защиты от радиочастотных помех, наводимых в том числе и от циркулирующего пучка.

Существуют также более сложные конструкции профилометров. В работе [17] представлена система регистрации профиля протонного пучка главного кольца синхротрона J-PARC. На рисунке 1.8 изображено схематическое изображение системы регистрации профиля пучка.

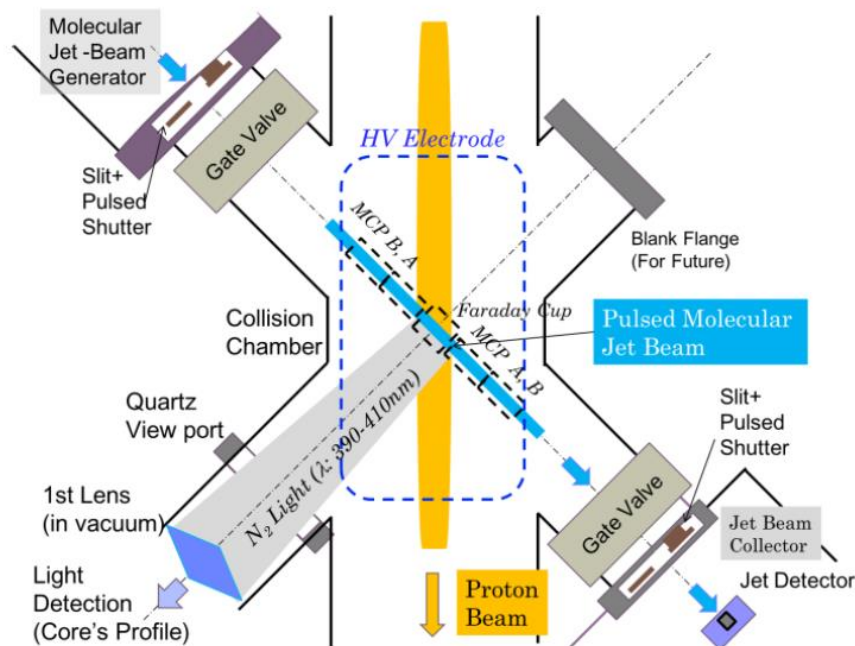


Рисунок 1.8 – Схематическое изображение системы регистрации профиля пучка синхротрона J-PARC.

Особенностью созданной системы является раздельная регистрация центральной области пучка и гало вокруг неё, а также применение напускаемой струи молекул азота в качестве мишени. Для двумерной регистрации центральной области пучка используется свет от возбужденных молекул струи азота. В тоже время, электроны при ионизации того же азота используются для регистрации гало пучка. Для регистрации электронов ионизации и усиления сигнала используются МКП. В качестве коллектора вторичных электронов применяется фосфорный экран, свет с которого при помощи световолокна передается на многоканальный ФЭУ. Используя оба метода, система регистрации имеет широкий динамический диапазон работы по интенсивности – 6 порядков!

На основе регистрации остаточного газа могут быть сконструированы также детекторы неразрушающей диагностики продольных характеристик пучка. В работе [31] представлен ионизационный детектор неразрушающего типа на основе МКП для регистрации продольного распределения плотности сгруппированного пучка тяжелых ионов линейного ускорителя в GSI. Методика основана на когерентном преобразовании временной структуры исследуемого пучка в пространственное распределение вторичных электронов, образовавшихся в процессе ионизации молекул остаточного газа, посредством модуляции ВЧ-полем с частотой равной или кратной частоте следования сгустков. Схема и фотография детектора представлены на рисунке 1.9. Детектор состоит из следующих функциональных частей: экстрактор для извлечения и ускорения образовавшихся электронов; две щели для выделения электронов в узком интервале вдоль пучка; электростатический анализатор по энергиям электронов; щель

для выделения электронов в вертикальной области первичного пучка; ВЧ-дефлектор для преобразования временного распределения электронов в пространственное; шевронная сборка МКП с люминесцентным экраном и CCD-камерой для регистрации и отображения электронов.

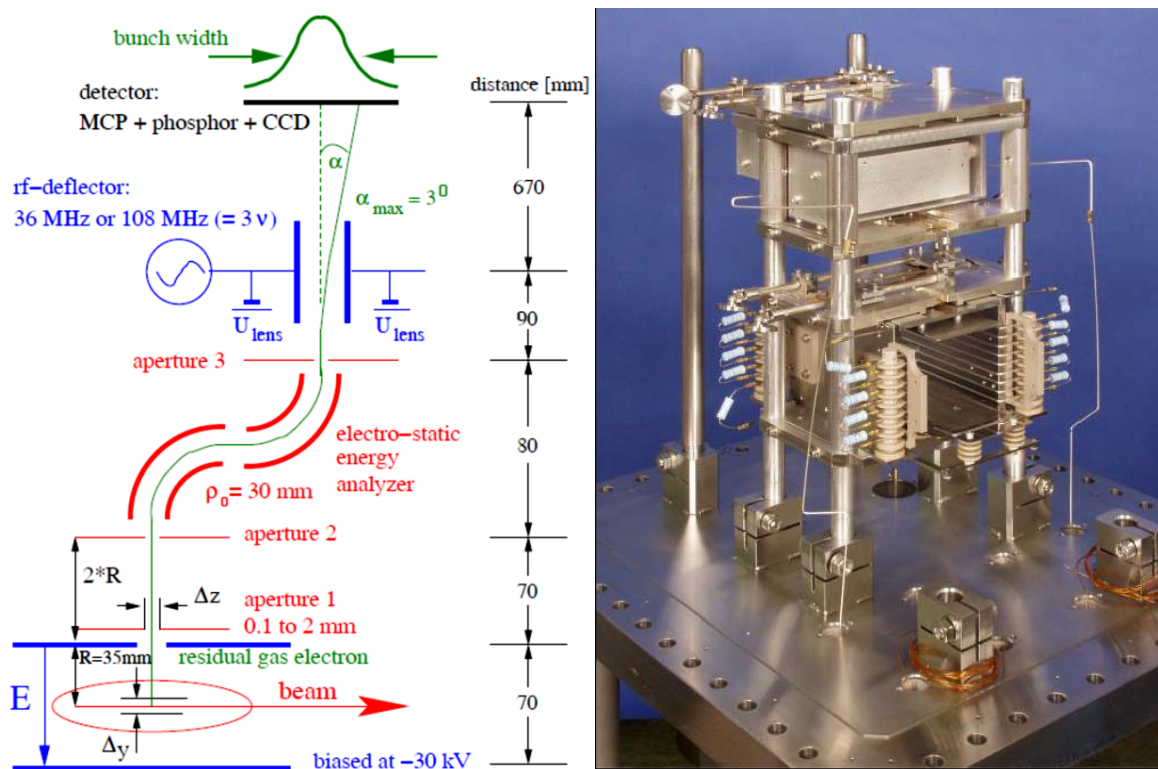


Рисунок 1.9 – Схема и фотография детектора для регистрации продольного распределения плотности сгруппированного пучка тяжелых ионов линейного ускорителя в GSI.

Из рассмотренных выше работ видно, что для регистрации электронных лавин с выхода МКП широко используется пластины люминофора и многосегментные коллекторы. В работе [32] для регистрации электронных лавин после усиления МКП используется трехэлектродный анод, конструкция которого изображена на рисунке 1.10. По соотношению зарядов с электродов можно определить место положения центра электронной лавины и, следовательно, место возникновения ионизации. Далее, путем математической обработки восстанавливается профиль пучка. Другие методы регистрации электронных лавин с выхода МКП рассмотрены в работах [14,33].

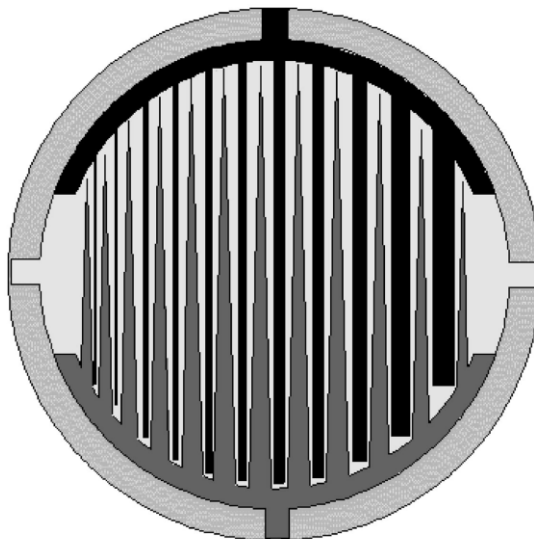


Рисунок 1.10 – Конструкция трех-электродного анода для определения положения центра масс электронной лавины с МКП (для наглядности количество полос электродов уменьшено).

В рамках проекта FAIR [34] для получения высокого пространственного разрешения используется ионная составляющая остаточного газа, МКП-сборка, фосфорное окно и ССД камера. В тоже время, для измерений профиля пучка в однооборотных режимах используется электронная составляющая, МКП-сборка и многоканальный ФЭУ. Также интересной особенностью данной разработки является наличие ультрафиолетовой лампы для контроля неоднородности коэффициента усиления МКП по всей площади вследствие её старения.

На инжекторе ускорителя ISIS [35] для регистрации профиля пучка ионов Н- (70 МэВ, 50 Гц, 200 мкс длительность) также используется детектор на основе МКП. Особенностью данной конструкции является возможность поворота МКП на 90 градусов, так что все 32 канала начинают регистрировать одинаковый поток ионов остаточного газа. Данная техника позволяет откалибровать каналы детектора, разница счета которых вызвана радиационным старением МКП и может достигать 20 % и более.

Таким образом, в различных типах детекторов, применяемых как на линейных, так и на циклических ускорителях, в качестве одного из основных регистрирующих элементов широко и успешно используется МКП благодаря их уникальным характеристикам.

Рассмотрев различные конструкции детекторов неразрушающей диагностики, можно сделать вывод, что каждый из них разрабатывался под специфические задачи для конкретного ускорительного комплекса. При этом выбор метода регистрации и конструкции детектора зависит не только от параметров пучков: интенсивность, энергия и тип ускоряемых частиц, но также и от условий работы в заданном месте ускорительного комплекса. Здесь существенным является наличие внешних электромагнитных и радиационных полей, условия работы детектора в вакууме и т.п.

ГЛАВА 2

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ НУКЛОТРОН

2.1 Особенности работы с пучками Нуклотрона. Постановка задачи

Ускоритель Нуклотрон в ЛФВЭ ОИЯИ является сверхпроводящим синхротроном, основанным на миниатюрных сверхпроводящих магнитах с железным ярмом и сверхпроводящей обмоткой возбуждения, что позволяет реализовать быстроциклирующий режим работы. Магнитная система Нуклотрона способна работать как с частотой повторения циклов ускорения до 0,5 – 1 Гц, так и в режиме с длинным плато магнитного поля («столом»), обеспечивая медленный вывод пучка из Нуклотрона длительностью от 0,1 до 10 с и более [36].

Линейный ускоритель ЛУ-20 производит однооборотную инжекцию в Нуклотрон протонов с энергией 20 МэВ или ядер (многозарядных ионов) с отношением заряда к массовому числу $0,33 \leq Z/A \leq 0,5$ с энергией 5 МэВ/нуклон. Максимальная энергия ядер с отношением заряда к массовому числу $q/A = 0,5$, ускоряемых в Нуклотроне, составляет 6 ГэВ/нуклон. В таблице 1 приведены ускоренные на Нуклотроне пучки и их интенсивности [36].

Таблица 1 – Ускоренные на Нуклотроне пучки и их интенсивности.

Пучок	Интенсивность, частиц/цикл	Пучок	Интенсивность, частиц/цикл
p	1×10^{11}	^{12}C (6+)	2×10^9
d	5×10^{10}	^{16}O	7×10^8
$\uparrow\text{d}$	2×10^8	^{24}Mg	1×10^8
^4He (2+)	3×10^9	^{40}Ar (16+)	3×10^7
^7Li (3+)	1×10^9	^{56}Fe (24+)	$1,2 \times 10^6$

Поскольку на Нуклотроне планируется ускорять тяжелые ионы вплоть до золота, то возникла необходимость создания системы неразрушающего контроля пространственно-временных характеристик пучка в кольце ускорителя с учетом необходимости регистрации низких интенсивностей пучков. В данном случае под низкими интенсивностями понимается диапазоне до 10^8 однозарядных ионов в кольце ускорителя или тяжелых ионов ($A > 100$ с зарядом $Z/A = 1/3$) с интенсивностями до 10^6 . Отметим, что данный диапазон не доступен для регистрации штатными детекторами Нуклотрона.

В настоящее время, положение пучка в ускорительной камере Нуклотрона измеряется с помощью pickup-электродов. Данный тип детекторов не обладает достаточной чувствительностью при малых интенсивностях пучка (менее 10^8 однозарядных частиц, циркулирующих в камере ускорителя). В процессе эксплуатации ускорителя применяется детектор ионизационного типа на основе диодных ВЭУ-6. В частности, данный детектор был использован для регистрации циркулирующего низкоинтенсивного пучка ионов ксенона [37,38]. Принимая во внимание поперечные размеры пучка в Нуклотроне на уровне нескольких миллиметров, и входное окно ВЭУ-6 – 10 мм, было принято решение о разработке нового ионизационного датчика на основе МКП, который позволит получить на порядок лучшее пространственное разрешение.

В рамках реализации проекта NICA [1], а также ускорения и вывода пучков тяжелых ионов из Нуклотрона [2,36-39] в 2011 г. была поставлена задача по созданию новых детекторов для диагностики и мониторинга циркулирующих пучков тяжелых ионов. Кроме того, для ряда фундаментальных и прикладных задач, некоторые из которых представлены в главе 3 и главе 4 настоящей диссертации, необходимо обеспечить надежный контроль и диагностику режима ускорения и вывода из ускорителя пучков тяжелых ионов в широком диапазоне интенсивностей.

Таким образом, постановка задачи состояла в разработке системы неразрушающей диагностики пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка тяжелых ионов (с массовым числом больше 100) в диапазоне интенсивностей от 10^3 до 10^6 ионов, циркулирующих в камере ускорителя, либо для однозарядных ионов – от 10^6 до 10^9 . Данные диапазоны обусловлены тем, что для обеспечения диагностики и мониторинга при более высоких интенсивностях на Нуклотроне имеются адекватные системы, обеспечивающие его работу. Детектор должен располагаться внутри вакуумной камеры ускорителя на «теплом» участке, где характерная величина давления составляет $2 \cdot 10^{-6}$ Па. На рисунке 2.1 показан график состава остаточного газа на «теплом» участке Нуклотрона: H_2O – 62 %; N_2 – 20 %; H_2 – 11 %.

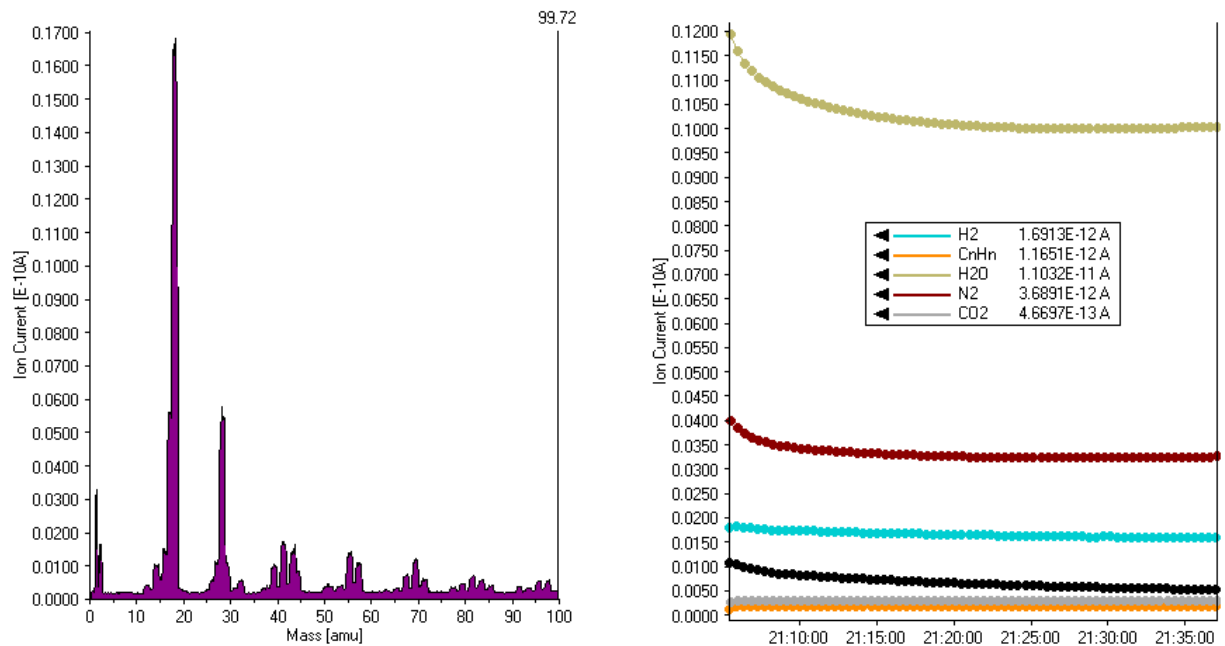


Рисунок 2.1 – График состава остаточного газа на «теплом» участке Нуклотрона.

Система также должна отвечать следующим требованиям:

- Отсутствие конструктивных элементов в апертуре ионопровода 100×90 мм, при этом, допускается введение электростатического поля напряженностью до 1 кВ/см;
- Все элементы детектирующей системы, расположенные в вакуумной камере ускорителя, должны быть выполнены из негазящих материалов;
- Временной шаг регистрации одного профиля пучка должен варьироваться от 500 нс до 100 мс, обеспечивая при этом полное время измерения в течение всего цикла ускорения и вывода пучка – до 15 с;
- Область регистрации положения пучка не менее 90 мм по горизонтальной координате;
- Пространственное разрешение не более 5 мм с возможностью уменьшения до 1 мм без принципиального изменения конструкции детектора;
- Система измерений должна обеспечивать компьютерную обработку и передачу данных на пульт ускорителя в режиме реального времени;
- Система сбора и обработки данных должна быть синхронизирована с циклом магнитного поля ускорителя, и обеспечивать возможность пересчета измеренных данных в относительную интенсивность циркулирующего пучка;
- Система высоковольтного питания и другие системы обеспечения работы детектора должны иметь удаленное управление;
- Система должна обеспечивать непрерывную работу в течение длительного времени, не менее месяца без возможности доступа в вакуумную камеру ускорителя.

Разработка, настройка и испытание системы предполагала создание специализированного вакуумного стенда. Стенд предназначен для проверки и настройки детектирующей части, электроники съема и обработки информации, а также для испытаний детектора перед установкой в вакуумную камеру ускорителя. Разработанные и испытанные на стенде рабочие образцы системы диагностики должны быть взаимозаменяемы и иметь возможность установки в существующий корпус на «теплом» участке вакуумной камеры Нуклотрона и оперативной замены при необходимости.

2.2 Конструкция детектора

За основу разработки была выбрана система детектирования на основе ионизационного метода регистрации с применением в качестве детектора МКП. Такие характеристики данной методики, как высокая эффективность регистрации ионов остаточного газа (до 90 %, определяется коэффициентом прозрачности МКП), отсутствие дополнительного вещества на пути пучка, максимально высокое быстродействие, а также возможность работы в вакууме при давлении от 10^{-3} Па и ниже удовлетворяют поставленным требованиям.

Выбрана относительно простая конструкция детектора, которая, тем не менее, по проведенным оценкам, в полной мере удовлетворяет поставленным задачам. Принцип работы детектора состоит в регистрации ионов остаточного газа, образованных под воздействием пучка, в вакуумной камере ускорителя. На рисунке 2.2 схематически показано устройство и принцип работы детектора. Как описано в главе 1 настоящей диссертации, идея метода регистрации пространственно-временных характеристик пучка состоит в следующем: пучок ускоряемых частиц ионизирует остаточный газ в камере ускорителя; образовавшиеся ионы движутся на поверхность МКП под действием однородного электрического поля, создаваемого ускоряющим электродом; шевронная сборка из двух МКП, расположенная вне области циркуляции пучка, обеспечивает пространственно-временную регистрацию иона. В качестве коллектора электронных лавин используются электрически изолированные друг от друга контактные площадки (ламели), расположенные на печатной плате. Запирающий электрод предполагается использовать для ограничения потока ионов, регистрируемых МКП, что позволит предотвратить перегрузку детектора, расширив диапазон работы по интенсивностям.

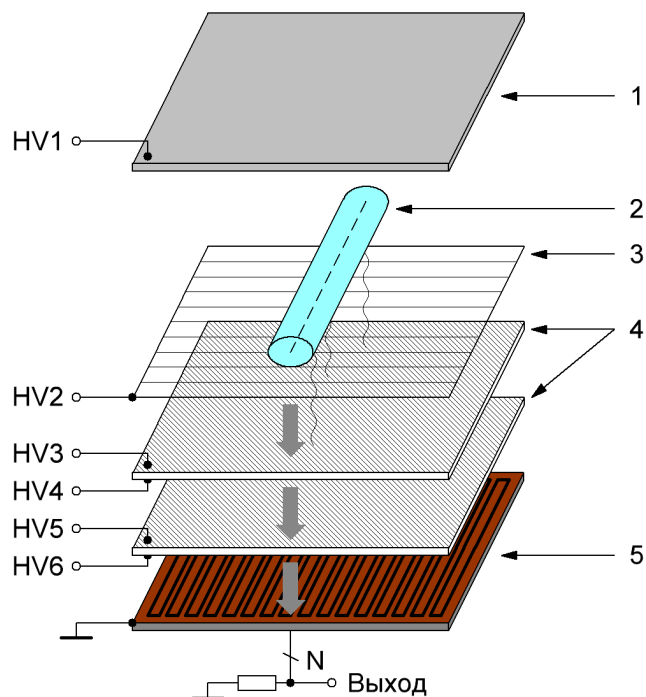


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение детектора на основе МКП. 1 – ускоряющий электрод; 2 – пучок; 3 – запирающий электрод; 4 – МКП; 5 – печатная плата с многоканальным коллектором электронных лавин.

Первые тестовые испытания детектора с использованием МКП, на «теплом» участке Нуклотрона, были апробированы в работе [40]. Испытания показали необходимость модернизации конструкции детектора, системы высоковольтного питания, а также определили необходимые требования к регистрирующей электронике и системе сбора и передачи данных. На базе проведенных испытаний был создан новый детектор с увеличенным размером чувствительной области и лучшим пространственным разрешением. Кроме того, был учтен опыт эксплуатации системы высоковольтного питания детектора и предложено оригинальное решение независимого питания каждой МКП в шевронной сборке. Трехмерное изображение нового детектора, сделанное при помощи программного пакета SolidWorks, показано на рисунке 2.3.

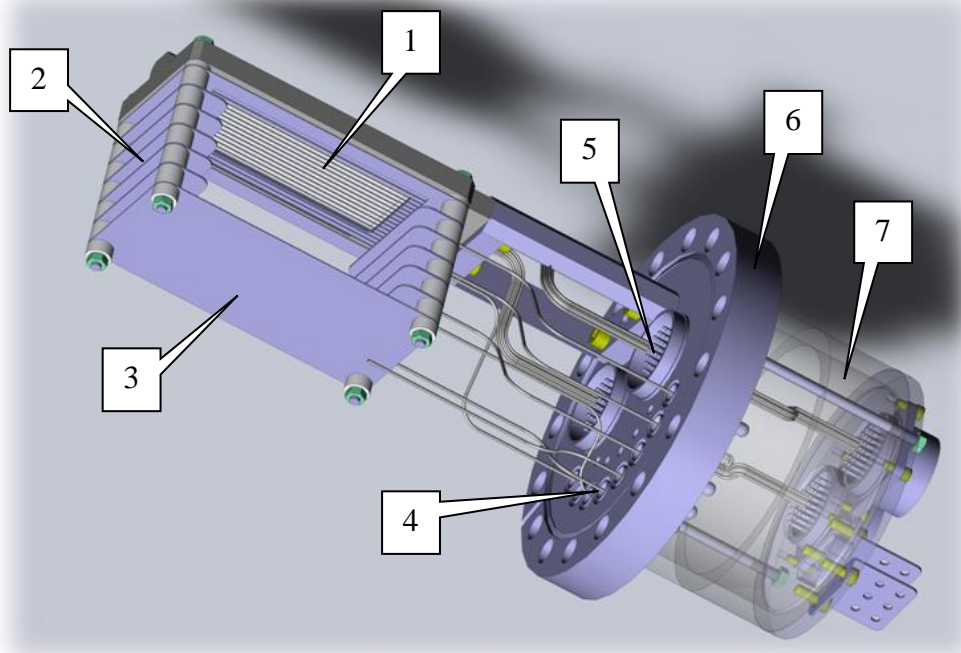


Рисунок 2.3 – Трехмерная модель детектора для диагностики радиальной координаты пучка Нуклотрона. 1 – запирающий электрод, шевронная сборка МКП и печатная плата с многоканальным коллектором; 2 – электроды, выравнивающие электростатическое поле транспортировки ионов; 3 – ускоряющий электрод; 4 – высоковольтные вакуумные разъемы; 5 – сигнальные вакуумные разъемы; 6 – вакуумный фланец; 7 – короб для защиты вакуумных разъемов.

В детекторе используются МКП компании «Баспик»¹ размером 96×33 мм с диаметром каналов 15 мкм. В качестве коллектора электронных лавин используются 32 электрически изолированные друг от друга контактные площадки, расположенные на печатной плате с шагом 3 мм. Расстояние между двумя МКП, а также между второй МКП и печатной платой составляет 150 мкм. Новизной данной конструкции является система раздельного высоковольтного питания каждой МКП в шевронной сборке, которая позволяет оптимизировать работу детектора, и в сочетании с запирающим электродом подбирать оптимальные режимы в зависимости от загрузки детектора. Наиболее характерная причина выхода из строя детектора с использованием МКП – перегрузка последней пластины в шевронной сборке, что приводит к выгоранию группы микроканалов МКП. Варьируемый щадящий режим работы второй МКП, с заданным коэффициентом усиления первой МКП, позволяет сохранить приемлемый общий коэффициент усиления и предотвратить перегрузку детектора.

¹ URL: <http://www.baspik.com>

2.3 Испытания детектора на вакуумном стенде

Для испытания и изучения режимов работы детектора был сконструирован и подготовлен специализированный вакуумный стенд, принципиальная схема и фотография которого показаны на рисунке 2.4. Вентили В1 и В2 служат для отсечки (перекрытия) вакуумной камеры с детектором от откачной вакуумной станции Pfeiffer Vacuum HiCube_Classic и форвакуумного насоса соответственно. Объем вакуумной камеры стенда составляет 35 литров. Форвакуумный насос используется для проверки системы на герметичность при первом запуске после разгерметизации (напуска атмосферы). Для получения давления 10^{-3} Па используется откачная вакуумная станция (которая содержит в себе форвакуумный и турбомолекулярный насосы). Для визуального контроля давления используются вакуумметры ВИТ2 и ВМБ14, которые измеряют давление в диапазоне от 10^{+2} до 10^{-1} Па и от 10^{-2} до 10^{-7} Па соответственно. Для напуска атмосферы используется стандартный вакуумный натекагель В3.

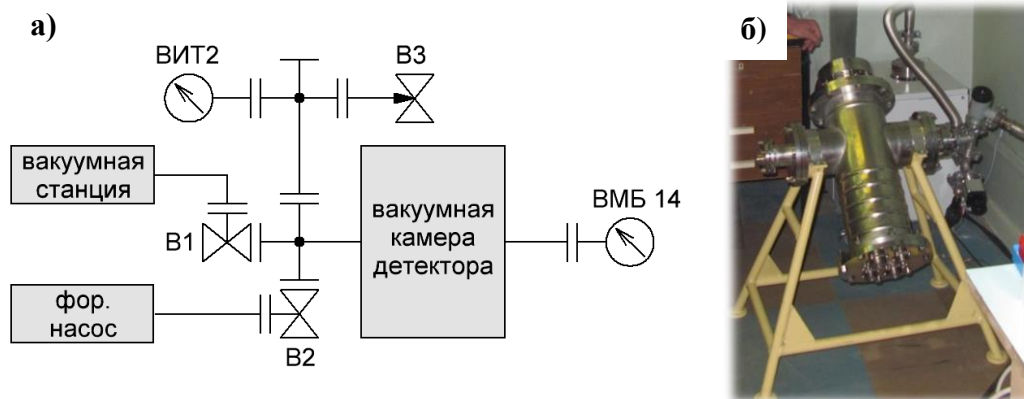


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема (а) и фотография (б) вакуумного стенда для испытания детектора на основе МКП.

При полной разгерметизации и установке опытных образцов детекторов рабочая камера стенда откачивается за 35 – 40 мин до приемлемого для работы с МКП давления 10^{-3} Па. При отключении насосов на 1 – 2 суток без разгерметизации камеры стенда скорость откачки до приемлемого давления увеличивается, что позволяет выйти на рабочий режим через 15 мин после включения насосов.

Для подбора режимов высоковольтного питания и изучения характеристик сигналов с детектора на стенде использовался коллимированный α -источник ионов с интенсивностью 10^4 Бк и энергией ионов 4 МэВ. Источник располагался на расстоянии 4 см над шевронной сборкой МКП внутри вакуумной камеры. Схема испытания детектора на вакуумном стенде показана на рисунке 2.5. В процессе испытания ускоряющий электрод не использовался (имел потенциал земли).

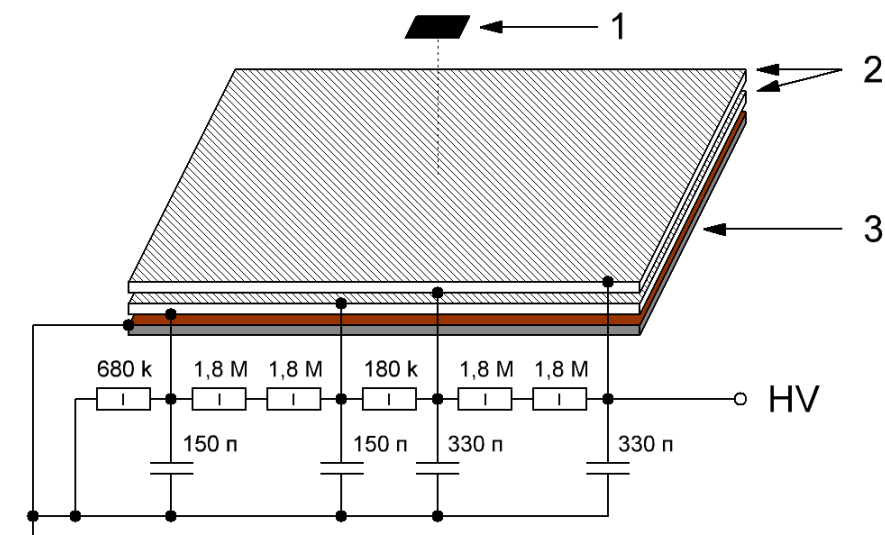


Рисунок 2.5 – Схема испытания детектора на вакуумном стенде. 1 – α -источник; 2 – МКП; 3 – многоканальный коллектор.

На стенде изучены характеристики сигнала с детектора в зависимости от напряжения питания обоих МКП в шевронной сборке в диапазоне от 900×900 до 1150×1150 В (в записи 900×900 первое число обозначает падение напряжения на ближней к пучку МКП, второе число – на дальней от пучка МКП). Сигналы с детектора измерены при помощи осциллографов Tektronix TDS3034C (300 МГц) и LeCroy WaveSurfer10R (1 ГГц). При изменении напряжения в указанном диапазоне амплитуда сигнала увеличивается в 10 раз; ширина сигнала по основанию составляет 5 – 7 нс; длительность переднего фронта не зависит от напряжения и составляет менее 1 нс, что обеспечивает временное разрешение шевронной сборки МКП на уровне 100 пс. На рисунке 2.6 изображен сигнал с детектора при напряжении питания МКП 1080×1080 В.

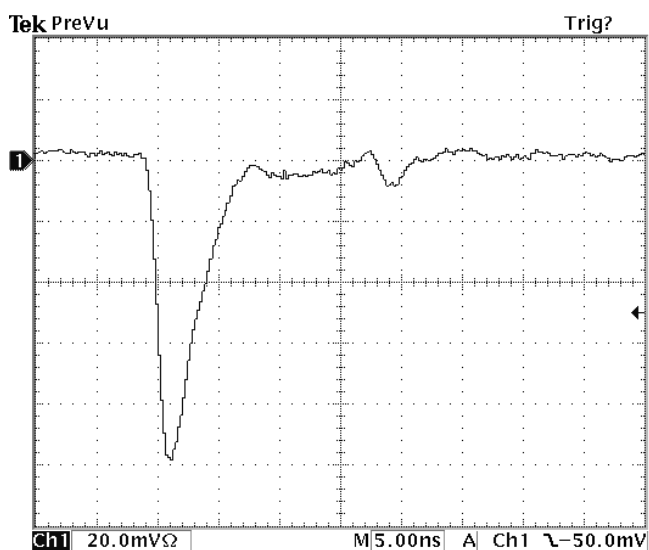


Рисунок 2.6 – Сигнал с детектора, полученный при помощи осциллографа с полосой пропускания 300 МГц. Напряжение питания МКП 1080×1080 В.

После основного сигнала на рисунке 2.6 заметен характерный послеимпульс с амплитудой в 10 раз меньшей основного импульса. Данный импульс обусловлен характерным для МКП явлением выбивания ионов со стенок микроканалов, которые движутся против направления движения электронной лавины и успевают приобрести энергию, достаточную для выбивания электрона внутри микроканала [23]. Данное свойство работы МКП необходимо учитывать при подборе усилителей и порогов дискриминации сигналов. Очевидно, что при относительно больших коэффициентах усиления шевронной сборки МКП (более 10^7) основной сигнал может достигать амплитуды более одного вольта, и при этом могут быть зарегистрированы и паразитные послеимпульсы.

На рисунке 2.7 показаны зарядовые спектры единичных сигналов с детектора, измеренные при помощи зарядо-цифрового преобразователя, для разных режимов питания шевронной сборки. Из рисунка видно увеличение коэффициент усиления сборки МКП с ростом напряжения. Для определения спектра фона проведены измерения без α -источника при максимальном напряжении питания. Показано, что количество событий фоновой составляющей мало по сравнению с сигналом от α -источника (менее 1 %).

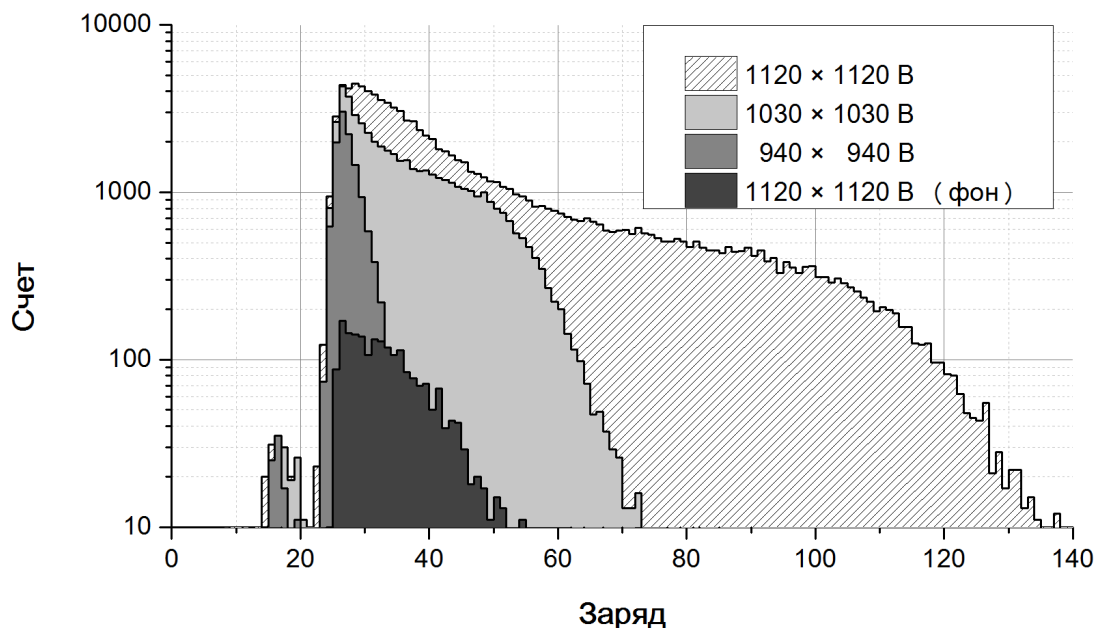


Рисунок 2.7 – Гистограммы площади сигнала (зарядовые спектры) для различных режимов питания шевронной сборки МКП. Время набора каждого спектра 15 мин; порог дискриминатора -20 мВ.

Испытания детектора на стенде показали, что в рабочем диапазоне напряжений от 900×900 до 1150×1150 В амплитуды сигналов при нагрузке 50 Ом лежат в диапазоне -25 – -300 мВ, что позволяет надежно регистрировать сигналы с детектора с порогом дискриминации -15 – -20 мВ без использования предварительных усилителей.

2.4 Описание системы диагностики циркулирующего пучка

Очевидно, что условия, при которых детектор проходил испытания на вакуумном стенде, отличаются от условий работы детектора в камере ускорителя (загрузка детектора, уровень вакуума, регистрируемые частицы, радиационная нагрузка и др.). На рисунке 2.8 показана фотография, сделанная в процессе монтажа детектора на Нуклотроне. Детектор располагается в общем вакуумном объеме ионопровода на «теплом» участке ускорителя.



Рисунок 2.8 – Фотография монтажа детектора на «теплом» участке Нуклотрона.

Для работы детектора на пучке была создана система, обеспечивающая: удаленное высоковольтное питание; регистрацию сигналов с детектора, а также сигнала магнитного поля ускорителя; сбор, обработку и визуализацию информации о пространственно-временных характеристиках и относительной интенсивности циркулирующего пучка. На рисунке 2.9 показана функциональная схема системы контроля пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка Нуклотрона, основанная на МКП-детекторе.

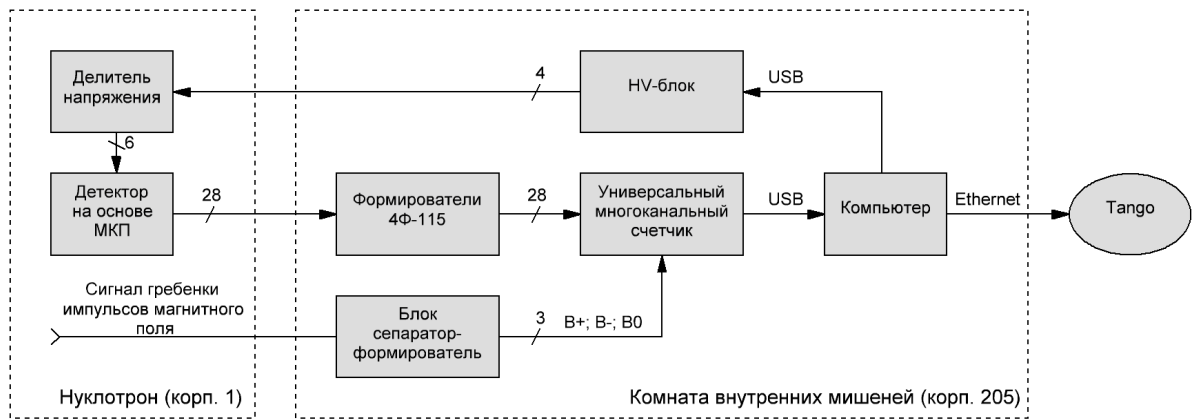


Рисунок 2.9 – Функциональная схема системы контроля пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка Нуклотрона.

Питание детектора осуществляется при помощи четырехканального высоковольтного источника питания компании «Высоковольтные системы»². Для питания сборки МКП используется два канала с регулировкой напряжения от 0 до -3000 В. Напряжение запирающего электрода регулируется в диапазоне от 0 до +1000 В, напряжение ускоряющего электрода – от 0 до +2000 В. Для распределения потенциалов на каждую сторону МКП используется пассивный делитель, расположенный рядом с детектором вне вакуумного объема. Особенностью высоковольтной системы детектора является независимое питание каждой МКП в шевронной сборке. Это позволяет гибко настраивать детектор для работы на различных режимах циркуляции пучка. Управление блоком высоковольтного питания осуществляется удаленно при помощи специального ПО.

Аналоговые сигналы с детектора, а также сигнал «гребенки импульсов магнитного поля» передаются по экранированным коаксиальным кабелям длиной 60 м к месту оператора в 205 корпус ускорительного комплекса. Для преобразования аналоговых сигналов с детектора в цифровые импульсы стандарта NIM использовались формирователи 4Ф-115 с порогом дискриминации от -15 мВ.

Для анализа цифровой информации была разработана специализированная электроника и ПО для удаленного считывания, записи и отображения регистрируемых данных в режиме реального времени. Блок электроники считывания и передачи данных представляет из себя универсальный многоканальный счетчик с буферной памятью. Блок имеет 32 входа, на которые подаются сформированные сигналы с детектора, а также сигналы «V+» и «V-», обозначающие рост и падение магнитного поля ускорителя. В качестве стартового сигнала измерения используется сигнал «V0», который обозначает начало цикла ускорения и вырабатывается при заданной величине магнитного поля ускорителя (обычно 100 Гс).

² URL: <http://www.hvsys.ru>

Данная электроника позволяет регистрировать количество сигналов с детектора в заданном временном окне. Временное окно состоит из 1024 интервалов измерений и задается программно двумя параметрами: задержкой относительно стартового сигнала и длительностью интервалов (шагом) измерений от 50 нс до 40 мс. Таким образом, после прихода одного стартового импульса формируется матрица 32×1024 целых положительных чисел, содержащая пространственно-временную информацию о циркулирующем пучке и магнитном поле для заданного интервала циклов ускорения.

Доступ и контроль информации о пучке осуществляется при помощи системы «Tango»³ [41,42], где для визуализации данных используется специальное клиентское приложение. Использование системы «Tango» обусловлено общей организацией систем сбора и отображения данных, принятой в настоящее время на ускорительном комплексе Нуклотон⁴. На рисунке 2.10 изображено окно программы-клиента отображения данных с новой системы регистрации на основе МКП. В окне отображается динамический профиль, относительная интенсивность пучка и магнитное поле ускорителя. Вертикальная ось графика профиля – координата горизонтального положения пучка (0 соответствует центру вакуумной камеры ускорителя в месте расположения детектора на «теплом» участке), горизонтальная – время с шагом 7 мс (полное время измерения – 7 с).

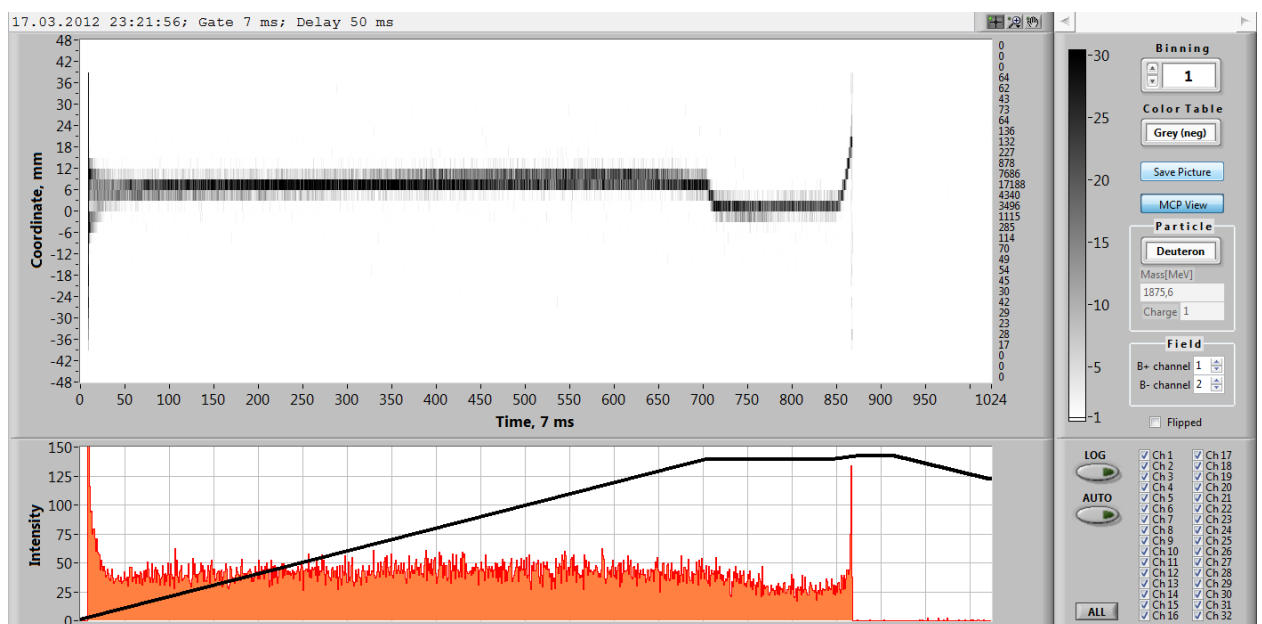


Рисунок 2.10 – Окно программы-клиента отображения данных в системе «Tango». Верхний график – радиальный профиль циркулирующего пучка; Нижний график – интенсивность (оранжевый цвет) и магнитное поле ускорителя (черная кривая). Ускорение пучка дейтронов до энергии 4 ГэВ/нуклон.

³ URL: <http://www.tango-controls.org>

⁴ URL: <http://nuclotango.jinr.ru>

2.5 Результаты работы

Показанные на рисунке 2.10 измерения соответствуют режиму ускорения (диапазон 0 – 5 с) дейтронов до энергии 4 ГэВ/нуклон без вывода пучка из Нуклотрона. В конце «стола» («стол» – постоянное магнитное поле, что соответствует временному интервалу 5 – 6 с) применялся режим увеличения магнитного поля для сбрасывания пучка на внутреннюю поверхность камеры ускорителя. В данном режиме проводились работы по настройке положения орбиты ускоренного пучка, что проявляется в смещении орбиты пучка на «столе». Подобные измерения пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка особенно важны для экспериментов с внутренними мишенями. Отметим, что станция внутренних мишеней расположена непосредственно за детектором на основе МКП, что позволяет настраивать и контролировать положение и размеры пучка при проведении экспериментов с внутренними мишенями.

На рисунке 2.11 показаны измеренные зависимости положения центра тяжести и ширины пучка для цикла ускорения, соответствующего рисунку 2.10. На графиках указаны лишь статистические ошибки, обусловленные количеством отсчетов с детектора. При повышении энергии пучок сжимается и за первые 500 мс его ширина уменьшается с 10 до 4 мм (FWHM). Принимая во внимание, что пространственное разрешение данной конструкции детектора 3 мм (ширина ламелей многоканального коллектора), система позволяет измерять положение центра тяжести пучка и его ширину с точностью около 1 мм (в предположении Гауссового распределения пучка), при этом для измерений ширины минимальная её величина составляет 3 мм. После отметки времени 500 мс пучок продолжает сжиматься в процессе ускорения, чего не видно на рисунке 2.11, так как разрешения системы не достаточно для регистрации ширины пучка меньше 3 мм. Отметим, что при необходимости получения лучшего пространственного разрешения можно увеличить число каналов детектора или применить другую конструкцию коллектора.

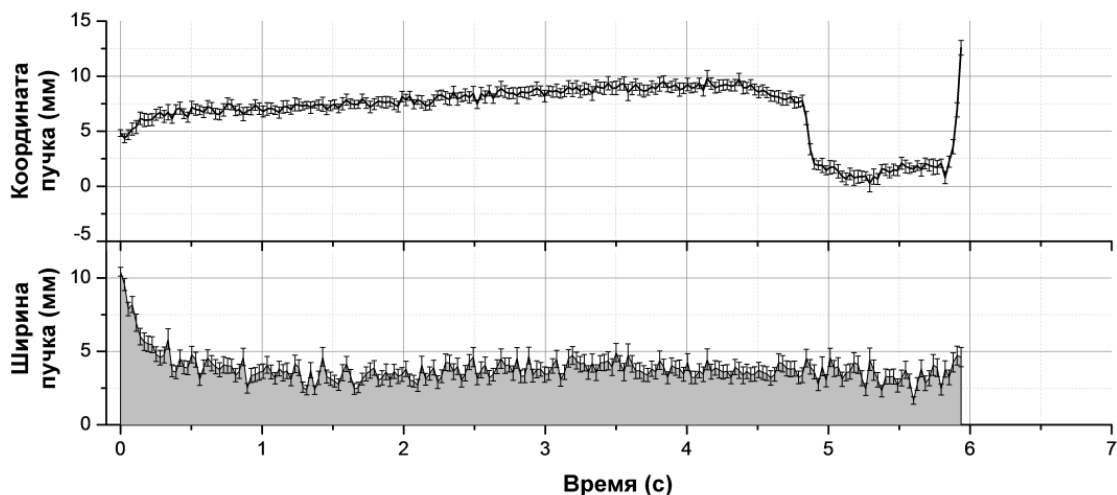


Рисунок 2.11 – Горизонтальная координата (верхний график) и ширина пучка (нижний график).
Графики соответствуют циклу ускорения на рисунке 2.10.

На рисунке 2.12 построен график относительной интенсивности (числа отсчетов с детектора) циркулирующего пучка дейтронов за первую секунду после инжекции в кольцо Нуклотрона.

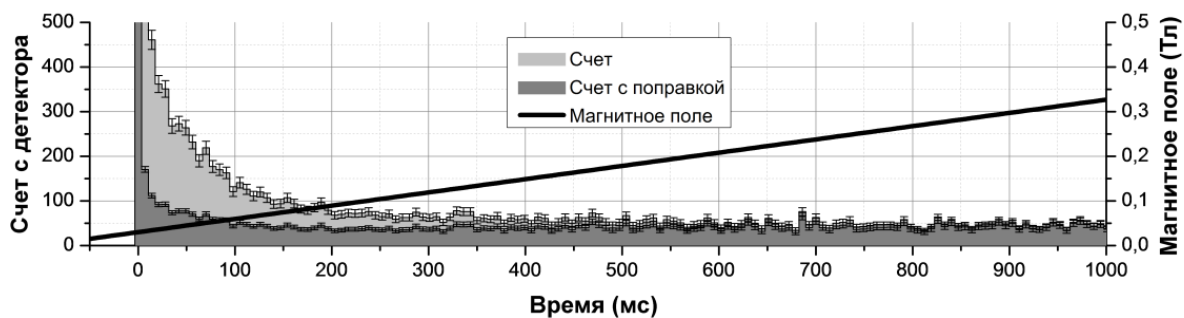


Рисунок 2.12 – График относительной интенсивности (числа отсчетов с детектора) ускоряемого пучка дейтронов. Светло серый цвет – без поправки на изменение энергии пучка; темно серый – с поправкой; черная кривая – магнитное поле ускорителя.

Очевидно, что для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка в процессе ускорения необходимо корректировать число отсчетов с детектора для заданного момента измерения на частоту обращения пучка в кольце ускорителя и энергию (соответствующую функцию ионизационных потерь от энергии) для этого момента времени. Обе эти поправки жестко привязаны к величине магнитного поля ускорителя, показанного на рисунке 2.12, которое измеряется и записывается синхронно с информацией о пространственно-временных характеристиках пучка с детектора на основе МКП. Расчеты и графики поправочных функций для пучков, ускоряемых на Нуклотроне, представлены в приложении А к настоящей диссертации. На рисунке 2.12 показана относительная интенсивность пучка с учетом и без учета поправочных функций.

Измерения с помощью детектора на основе МКП в пяти сеансах Нуклотрона при работе на пучках дейтронов, альфа частиц, ядер углерода и ионов аргона показали, что основные потери пучка (до 90 %) происходят на первых оборотах после инжекции. Таким образом, созданный детектор полезен для решения важной задачи настройки ускорителя – минимизация потерь пучка от момента инжекции до вывода.

Известным недостатком детекторов на основе МКП является длительное время восстановления участка МКП (группы сработавших каналов) в точке попадания регистрируемого иона [43]. Каждый канал МКП работает как ФЭУ, поэтому происходит зарядовое обеднение области сработавших каналов, обеспечивающих режим электронного усиления сигнала. Изучения при разных режимах работы детектора на пучках Нуклотрона показали, что время восстановления детектора после перегрузок составляет ~ 100 мс. Поскольку число каналов МКП составляет 10^6 см^{-2} , можно оценить загрузочные возможности детектора, полагая, что область обеднения шевронной сборки из двух МКП включает в себя порядка десяти соседних каналов для каждой зарегистрированной частицы. Таким образом, максимальное количество ионов, которое МКП-сборка данного детектора способна усилить без перегрузок $\sim 2 \cdot 10^4 \text{ ион} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, при условии равномерного облучения. На практике, увеличение быстродействия детектора можно достичь, используя МКП с меньшим диаметром каналов (до 4 мкм) [44].

Однако, используя уникальные временные характеристики детектора на основе МКП, есть возможность регистрации интенсивного пучка в коротком временном интервале на начальном этапе ускорения пучка непосредственно после инжекции. Это дает возможность использовать детектор для регистрации пространственно-временных характеристик пучка на первых оборотах. Принимая во внимание, что на начальном этапе ускорения в Нуклотроне пучок совершает один оборот за 8 мкс (энергия инжекции 5 МэВ/нуклон), детектор позволяет адекватно регистрировать сотни первых оборотов пучка до момента перегрузки детектора при интенсивностях значительно превышающих многооборотный режим работы. Практика эксплуатации детектора на протяжении четырех сеансов в условиях перегрузки (сотни часов непрерывной работы) показала возможность долговременного использования детектора в таком режиме работы.

В марте 2013 г. на Нуклотроне проводилось ускорение пучка α -частиц. На рисунке 2.13 изображен профиль циркулирующего пучка α -частиц в момент инжекции (первые десятки оборотов) на этапе настройки ускорителя. Полное время измерения – 500 мкс (временной бин – 500 нс). В данном режиме ускорителя пучок циркулировал в кольце Нуклотрона около 500 мкс, затем терялся (высаживался на камеру ускорителя). Заполнение орбиты кольца составляло 50 % (половинная инжекция), что наблюдается в виде прерывистой структуры пучка. Фурье анализ

данного распределения пучка показал характерную частоту 120 кГц – частота обращения пучка в кольце ускорителя при поле инжекции.

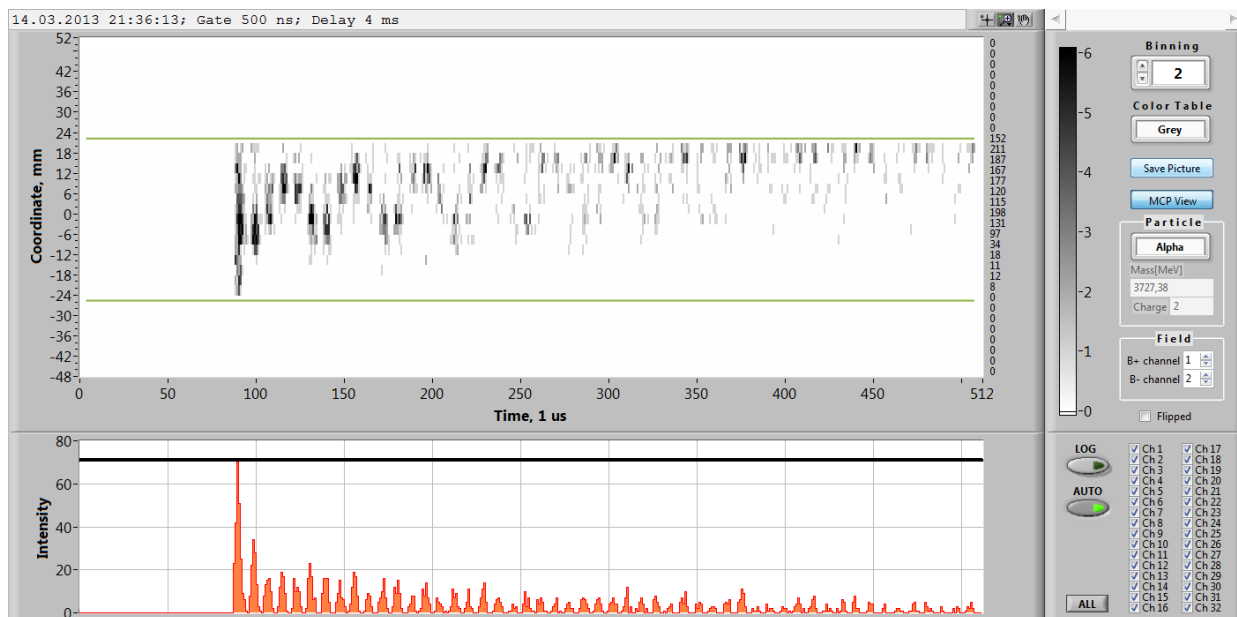


Рисунок 2.13 – Радиальный профиль циркулирующего пучка α -частиц при регистрации в однооборотном режиме в первые моменты времени после инжекции. Заполнение орбиты кольца – 50 %. Задействованы только 15 центральных каналов детектора.

Однооборотные режимы регистрации пучка дейтронов от момента инжекции были изучены с использованием интервалов измерения от 100 до 800 мкс (с бином 100 – 800 нс), что соответствует 10 – 100 первым оборотам пучка. Очевидно, что число регистрируемых оборотов до перегрузки детектора зависит от интенсивности пучка. В настоящее время на Нуклотроне характерный диапазон интенсивностей инжектируемого пучка дейтронов $10^8 - 10^{11}$, при этом детектор дает возможность регистрации от тысячи до нескольких десятков первых оборотов пучка без перегрузки. Таким образом, показана возможность применения данного детектора для настройки и оптимизации начального этапа ускорения.

На рисунке 2.14 изображен профиль пучка в цикле ускорения с быстрым (50 мс) выводом пучка из ускорителя при интенсивности, соответствующей верхней границе рабочего диапазона детектора (10^8 однозарядных ионов). В начале ускорения (первые полсекунды от момента инжекции) видна перегрузка детектора, соответствующая центральной области пучка. После перехода на «стол» производился вывод пучка из ускорителя (момент времени 3 секунды после инжекции) и далее регистрировались остатки циркулирующего пучка (светло серый цвет на графике профиля). Отношение счета с детектора до вывода пучка к счету после вывода составляет 60, что определяет динамический диапазон работы детектора по интенсивности без применения запирающего электрода.

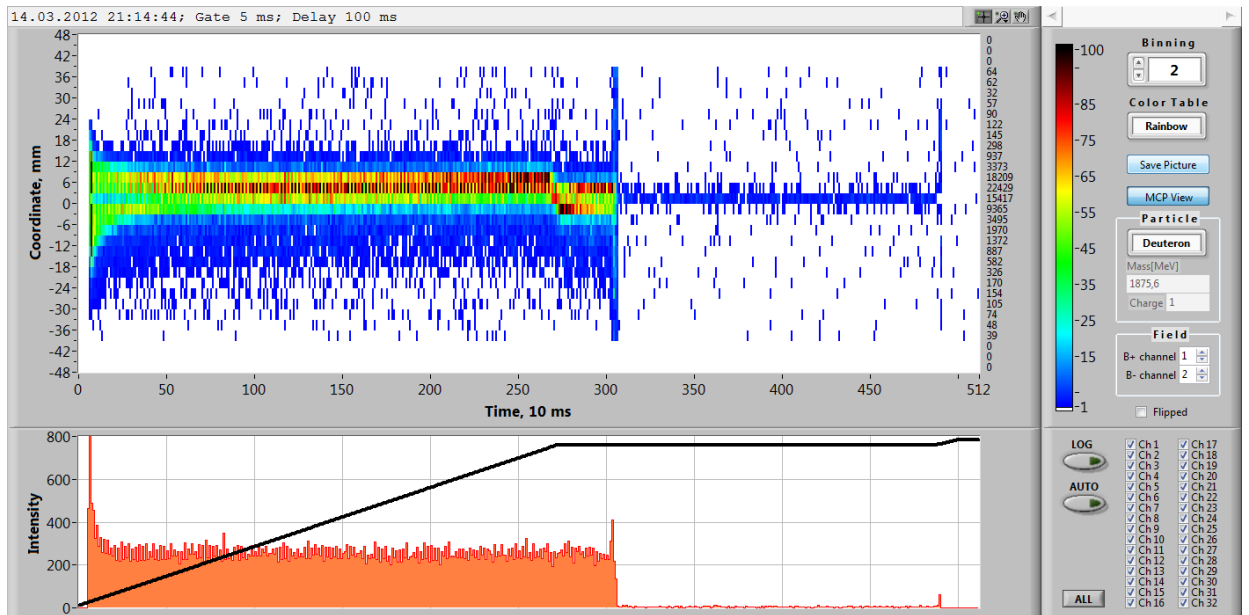


Рисунок 2.14 – Радиальный профиль циркулирующего пучка дейтронов при ускорении до энергии 2 ГэВ/нуклон. Режим быстрого вывода (50 мс).

В завершении данной главы приведем графики регистрации циркулирующих пучков ядер углерода и ионов аргона Ar^{16+} . На рисунке 2.15(a) показан профиль циркулирующего пучка ионов аргона Ar^{16+} при ускорении до энергии 500 МэВ/нуклон. В данном режиме после перехода на «стол» производился медленный вывод пучка (для прикладных исследований) из ускорителя. При этом параллельно с регистрацией циркулирующего пучка, проводилась диагностика выведенного пучка при помощи специально созданной для этого системы [45]. Данная система создана для проведения облучений компонентов и изделий электронной техники и описана в главе 3 настоящей диссертации.

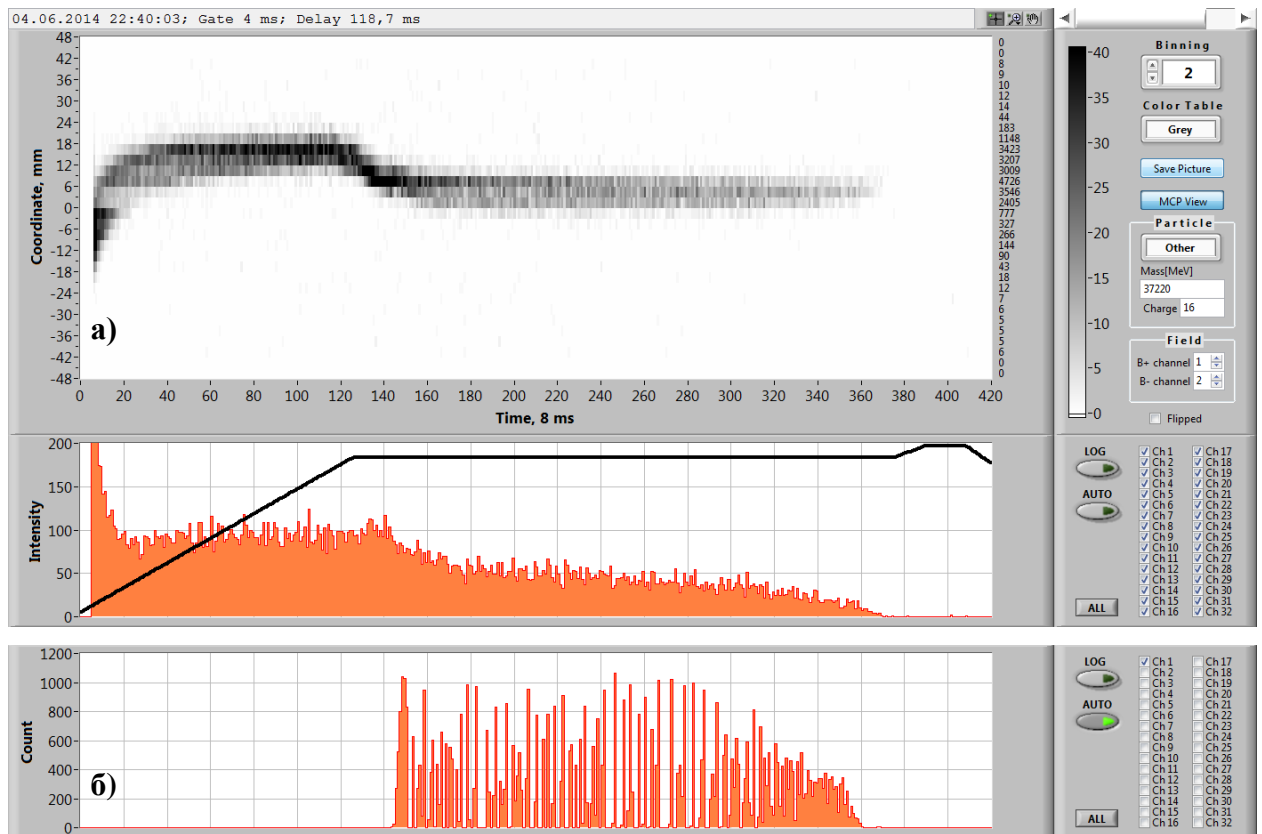


Рисунок 2.15 – Цикл ускорения и вывода пучка ионов аргона Ar^{16+} : (а) – радиальный профиль и относительная интенсивность циркулирующего пучка ионов аргона при ускорении до энергии 500 МэВ/нуклон; (б) – абсолютная интенсивность выведенного пучка ионов аргона в процессе вывода из ускорителя.

Система диагностики выведенного пучка позволяет определять абсолютную интенсивность и пространственно-временные характеристики пучка. На рисунке 2.15(б) показана абсолютная интенсивность выведенного пучка, зарегистрированная при помощи сцинтилляционных счетчиков. Данный цикл вывода пучка, а также временной интервал измерения соответствует циклу ускорения на рисунке 2.15(а). Таким образом, продемонстрирована синхронная работа систем диагностики циркулирующего и выведенного пучков Нуклотрона. В проведенных измерениях и испытаниях системы одновременной регистрации циркулирующего и выведенного пучков сопоставление информации проводилось в off-line режиме. В силу востребованности данной возможности планируется доработка ПО для on-line визуализации информации как о циркулирующем, так и о выведенном пучке в едином временном окне.

В приведенном на рисунке 2.15 режиме ускорения и вывода ионов аргона проводилась диагностика циркулирующего пучка также и при помощи штатного детектора ускорителя на основе диодных ВЭУ-6, о котором было сказано в начале данной главы. Для сравнения работы систем диагностики (на основе МКП и диодных ВЭУ) на рисунке 2.16 показан

зарегистрированный системой на основе диодных ВЭУ профиль, положение центра тяжести и относительная интенсивность циркулирующего пучка.

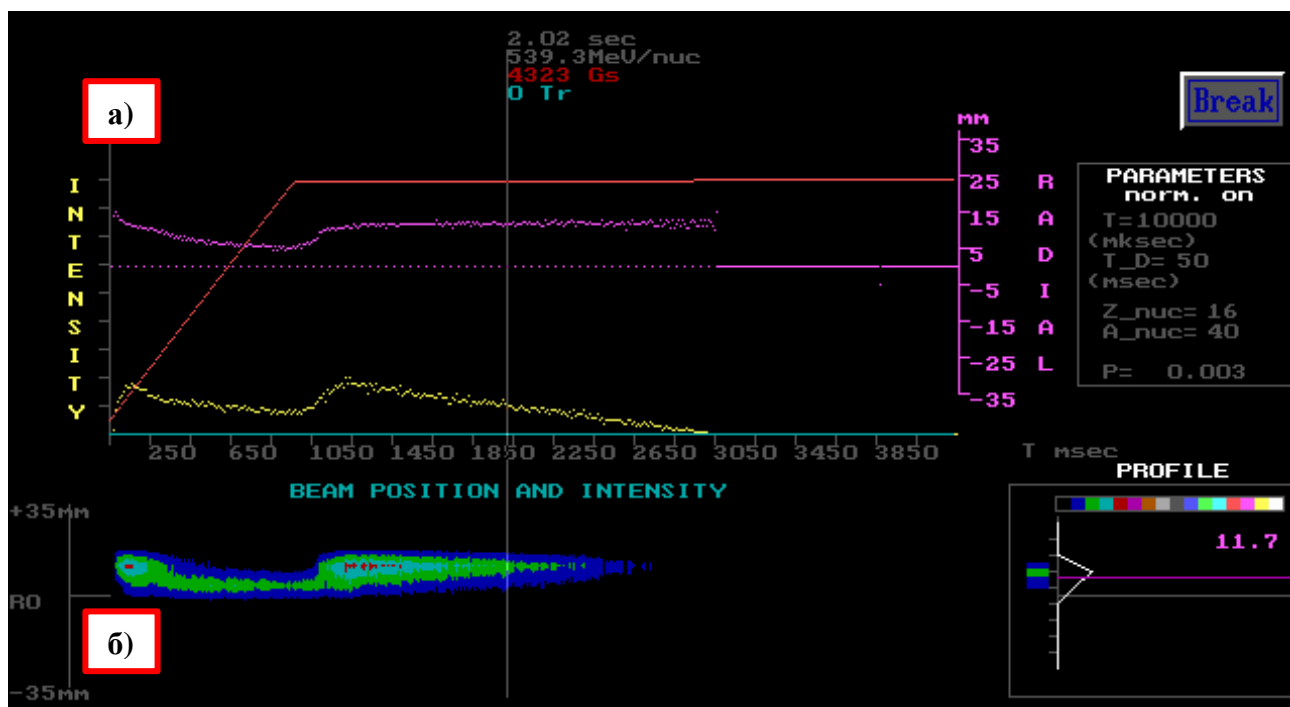


Рисунок 2.17 – Цикл ускорения и вывода пучка ионов аргона Ar^{16+} с регистрацией параметров циркулирующего пучка при помощи штатной системы диагностики на основе диодных ВЭУ: (а) – магнитное поле ускорителя (красная кривая), координата центра тяжести пучка (фиолетовая кривая) и относительная интенсивность пучка (желтая кривая); (б) – горизонтальный профиль пучка.

На рисунке 2.18(а) заметна связь между зарегистрированной координатой центра тяжести пучка и его интенсивностью. При этом показания интенсивности скачкообразно изменяются при смещении положения центра тяжести пучка от одного канала детектора к другому, что говорит о разной чувствительности каналов. Чувствительность диодных электронных умножителей сильно зависит от напряжения питания, что, как правило, требует калибровки и установки напряжения питания на каждый умножитель индивидуально. В данной конфигурации детектора на все ВЭУ подано одно (единое) напряжение питания.

Сравнивая рисунки 2.15 и 2.19, заметно их зеркальное отображение профиля пучка: в системе на основе МКП увеличению координаты соответствует смещение пучка внутрь вакуумной камеры ускорителя; в системе на основе диодных ВЭУ – наоборот. Обе системы зарегистрировали смещение пучка к наружной стороне вакуумной камеры ускорителя на 10 мм после перехода на постоянное магнитное поле. Время от момента инжекции до полного вывода пучка по обоим системам составило около 2,9 с. Таким образом, подтверждена согласованная (в пределах точностей измерений) регистрация пространственно-временных характеристик пучка при помощи двух систем диагностики.

На рисунке 2.17 показан профиль циркулирующего пучка ядер углерода при ускорении до энергии 4 ГэВ/нуклон. В данном режиме после ускорения производился частичный вывод пучка из ускорителя для эксперимента коллаборации «Энергия+Трансмутация». Диагностика и контроль вывода пучка в данном режиме обеспечивался при помощи созданной системы мониторинга циркулирующего пучка на основе МКП. Параллельно с регистрацией циркулирующего пучка, проводилась диагностика выведенного пучка при помощи системы мониторинга [46], созданной для эксперимента коллаборации «Энергия+Трансмутация». Данная система описана в главе 4 настоящей диссертации.

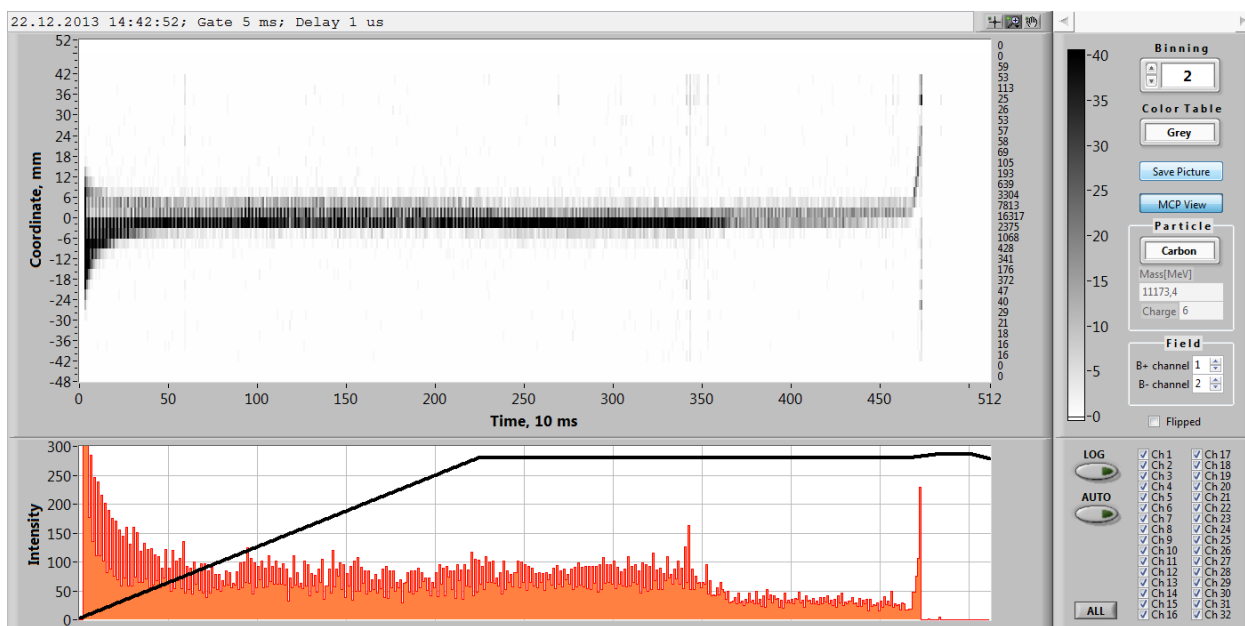


Рисунок 2.20 – Радиальный профиль циркулирующего пучка ядер углерода при ускорении до энергии 4 ГэВ/нуклон.

Поскольку ряд измерений в экспериментах коллаборации «Энергия+Трансмутация» чувствителен к стабильности, однородности и временной структуре выведенного пучка, по требованию коллаборации подобран специальный режим вывода, при котором «остатки» ускоренного пучка гасятся на внутренней стенке вакуумной камеры ускорителя (рисунок 2.20). На графике профиля в конце «стола» магнитного поля отчетливо видна динамика отклонения пучка на внутреннюю стенку вакуумной камеры ускорителя, что достигается небольшим подъемом магнитного поля. В противном случае (ровного «стола» магнитного поля) сгусток оставшихся ускоренных частиц неконтролируемым образом выводился из ускорителя, что приводило к серьезному ухудшению качества экспериментального материала.

В момент принудительного гашения пучка возникает дополнительная нагрузка системы диагностики на основе МКП вторичными частицами, что приводит к характерному пику (скачкообразному росту отсчетов с детектора) на графике интенсивности (рисунок 2.20,

нижний график). Аналогичные всплески отсчетов наблюдались при настройке ускорителя как в процессе ускорения, так и в момент перехода на «стол» магнитного поля, что обусловлено взаимодействием пучка с элементами вакуумной камеры ускорителя. Таким образом, система диагностики на основе МКП позволяет оператору ускорителя иметь дополнительную информацию о динамике пучка (моментах взаимодействия пучка с элементами камеры ускорителя) во время настройки режимов ускорения и вывода.

ГЛАВА 3

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИРОВАНИЯ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Прикладные исследования и особенности работы на выведенных пучках Нуклотрона

Прикладные исследования справедливо занимают значительное место в физической программе ускорительных комплексов в любом крупном научном центре мира. Аналогичные возможности имеются и реализуются на ускорительном комплексе Нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ, а также планируемом бустере ускорительного комплекса NICA [1]. Выведенные пучки Нуклотрона представляют уникальные возможности проведения широкого круга исследований с набором как легких, так и тяжелых ядер в области промежуточных энергий от сотен МэВ до нескольких ГэВ на нуклон.

Данная глава диссертации описывает цикл работ по созданию и испытанию системы мониторинга выведенных пучков Нуклотрона для прикладных исследований, с учетом особенностей работы ускорительного комплекса. Рассматриваются два основных направления прикладных исследований:

– Особенности радиационных испытаний ИЭТ, в том числе для космической промышленности (Роскосмос, завод «Интеграл» Беларусь, и другие центры производители радиационно-стойкой электронной техники);

– Облучение биологических объектов пучками релятивистских ионов.

Защита от радиационного воздействия как легких элементарных частиц, так и тяжелых ядер становится все более важным фактором в реализации национальных программ для космических исследований, разработки надежной радиационно-стойкой электроники летательных аппаратов [3-5]. В рамках данного направления в мире интенсивно проводятся исследования воздействия пучков релятивистских тяжелых ионов на биологические объекты и материалы, включая микросхемы, элементы микросхем, а также на работу электронных модулей в режиме реального времени. Анализ модификации материалов под воздействием релятивистских тяжелых ионов, как в режиме однократных попаданий, так и облучения с высокой радиационной дозой представляют приоритетные физические задачи данного направления [47]. Изучение радиационной стойкости материалов под воздействием высоких доз облучения, в том числе тяжелыми ионами, необходимо для разработки радиационной защиты космических станций, спутников, других летательных аппаратов. Особую актуальность в последнее время приобрели задачи, связанные с изучением разовых отказов в работе больших

интегральных микросхем и процессоров при воздействии единичных тяжелых ионов, проходящих через тело микросхемы в заданном месте.

Особое внимание в космических исследованиях уделяется обеспечению радиационной защиты космонавтов [48]. Известно, что даже незначительные дозы тяжелых ионов способны вызвать серьезные необратимые повреждения живых тканей. Тяжелые заряженные частицы (и, в первую очередь, многозарядные ионы) являются эффективным инструментом при решении фундаментальных вопросов, связанных с выяснением механизмов биологического действия ионизирующей радиации. ЛРБ ОИЯИ активно ведет радиобиологические исследования на ускорителях тяжелых ионов [49]: фазотроне ЛЯП, циклотронах ЛЯР, Нуклотроне [50] и планируется расширение таких исследований на пучках ускорительного комплекса ЛФВЭ. Отметим, что и на ускорительном комплексе ЛФВЭ имеются проблемы с отказами и сбоями электронной аппаратуры, размещенной вблизи кольца ускорителя, под действием радиационного фона.

К специфическим требованиям к пучкам в рамках данного направления следует отнести создание системы сканирования пучка относительно биологической мишени. Необходимо также создание специфических радиационно-защищенных условий для подготовки и хранения образцов биологических объектов вблизи зоны облучения.

Ключевыми пунктами для проведения рассматриваемых прикладных исследований являются: обеспечение заданного температурного режима в процессе облучения; прецизионное дистанционное перемещения облучаемых образцов относительно пучка и динамическое неразрушающее мониторинговое наблюдение пучка ионов в процессе облучения. Комплекс для проведения прикладных исследований должен включать различные дистанционно управляемые мишенные станции для заданных типов облучаемых объектов (живые объекты и ИЭТ). Кроме того, поскольку некоторые электронные компоненты и изделия необходимо облучать и исследовать в процессе их работы, это накладывает специальные требования к подключению и размещению дополнительного электронного оборудования (источники питания, шины заземления, компьютеры и т. д.) в зоне пучковых испытаний.

Прикладные исследования предполагают специфические требования к измеряемым и контролируемым характеристикам пучка как со стороны оператора, проводящего измерения (заказчика исследования), так и оператора ускорителя, обеспечивающего стабильность и контроль заданных параметров пучков (энергий, типов и зарядов ионов, возможность получения различных интенсивностей и временных структур пучка). Очевидно, что проведение таких исследований требует не только динамического контроля и визуализации основных параметров выведенных пучков в процессе облучения, но и согласованной с заказчиком паспортизации накопленных данных для последующего анализа.

Простейшие расчеты ионизационных потерь показывают, что для изучения единичных эффектов как в биологических образцах, так и ИЭТ, наиболее подходящий диапазон энергии пучков ионов соответствует интервалу 100 – 2000 МэВ/нуклон. В данном диапазоне энергий имеется возможность исследования облучаемых образцов вне вакуумной камеры, что также упрощает мониторинг пучков в процессе облучения.

Одной из проблем получения пучков тяжелых ионов низкой интенсивности для изучения единичных эффектов является необходимость разработки специализированных детекторов для надежного измерения и контроля интенсивности пучка не только в месте облучаемого объекта, но и в процессе ускорения и вывода из ускорителя. Проведение вышеописанных прикладных исследований предполагает также создание специализированного облучательного стенда (ОС), расположенного в зоне вывода пучка из ускорителя. При этом для минимизации вещества на пути пучка до облучаемого объекта стенд должен располагаться в непосредственной близости от выводного окна ускорителя.

С целью развития прикладных исследований на ускорительном комплексе ЛФВЭ в 2011 г. начаты работы по созданию новых систем диагностики и мониторинга циркулирующих и выведенных пучков Нуклотрона. На рисунке 3.1 обозначены места расположения систем мониторинга пучка, созданных нашей группой, на ускорительном комплексе ЛФВЭ [45,46,51].

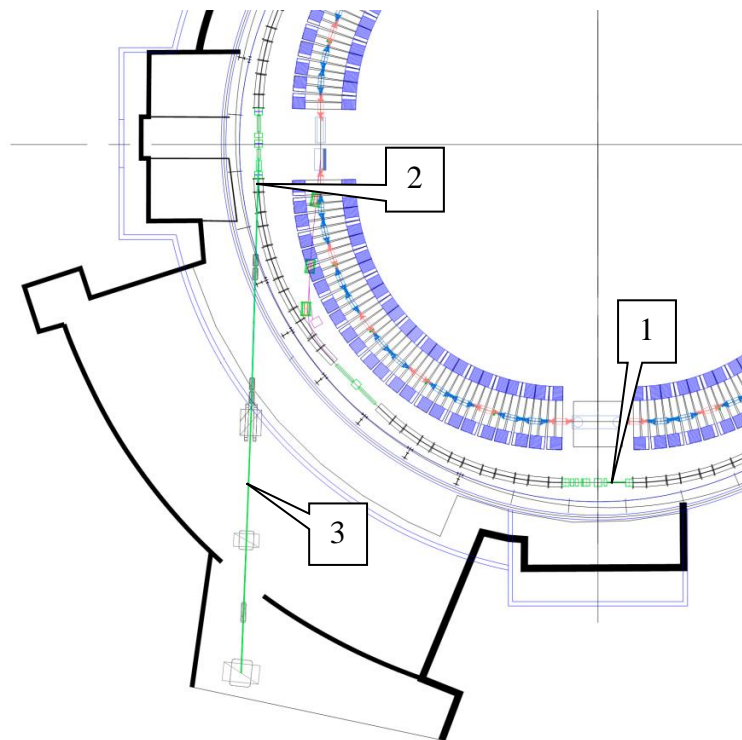


Рисунок 3.1 – Расположение систем мониторинга циркулирующего и выведенного пучков на ускорительном комплексе ЛФВЭ ОИЯИ. 1 – место расположения системы диагностики циркулирующего пучка; 2 – место вывода пучка из ускорителя; 3 – фокус Ф-3 в экспериментальном зале ускорительного комплекса.

Система диагностики циркулирующего пучка, описанная в главе 2 настоящей диссертации, располагается на «теплом» участке Нуклотрона (ионизационный детектор на основе МКП размещен внутри вакуумной камеры ускорителя) [51]. Элементы ОС, включающие в себя систему мониторингования выведенного пучка, а также СП детекторов и образцов, располагаются как в непосредственной близости от места вывода пучка из ускорителя, так и на расстоянии 35 м от места вывода в экспериментальном зале (фокус Ф-3) [45]. Для диагностики выведенных пучков в фокусе Ф-3 дополнительно использовалась система мониторингования, созданная в рамках коллаборации «Энергия+Трансмутация» (данная система описана в главе 4 настоящей диссертации) [46].

3.2 Описание облучательного стенда для прикладных исследований

На рисунке 3.2 представлена схема размещения элементов и оборудования ОС в месте вывода пучка из Нуклотрона. Система дистанционного позиционирования и перемещения детекторов и образцов (СП) располагается непосредственно за окном, через которое пучок выводится из ускорителя, что обеспечивает минимизацию вещества на пути пучка до облучаемых образцов.

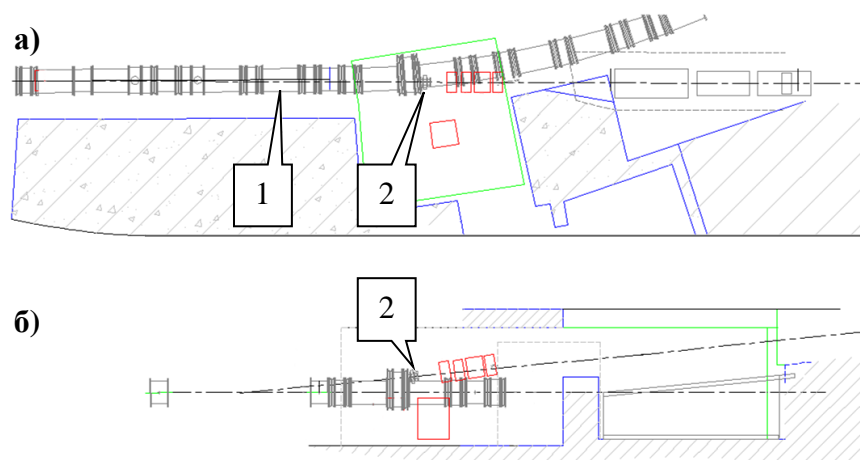


Рисунок 3.2 – Схема размещения элементов и оборудования ОС в месте вывода пучка из Нуклотрона: (а) – вид сверху; (б) – вид сбоку. 1 – кольцо Нуклотрона; 2 – окно вывода пучка; красным обозначено оборудование ОС.

На рисунке 3.3 показана фотография прототипа СП детекторов и облучаемых образцов. Калиброванная ионизационная камера используется для измерения интенсивностей более 10^5 частиц за цикл вывода из ускорителя. Методика и результаты абсолютной калибровки ионизационных камер описаны в главе 4 настоящей диссертации.

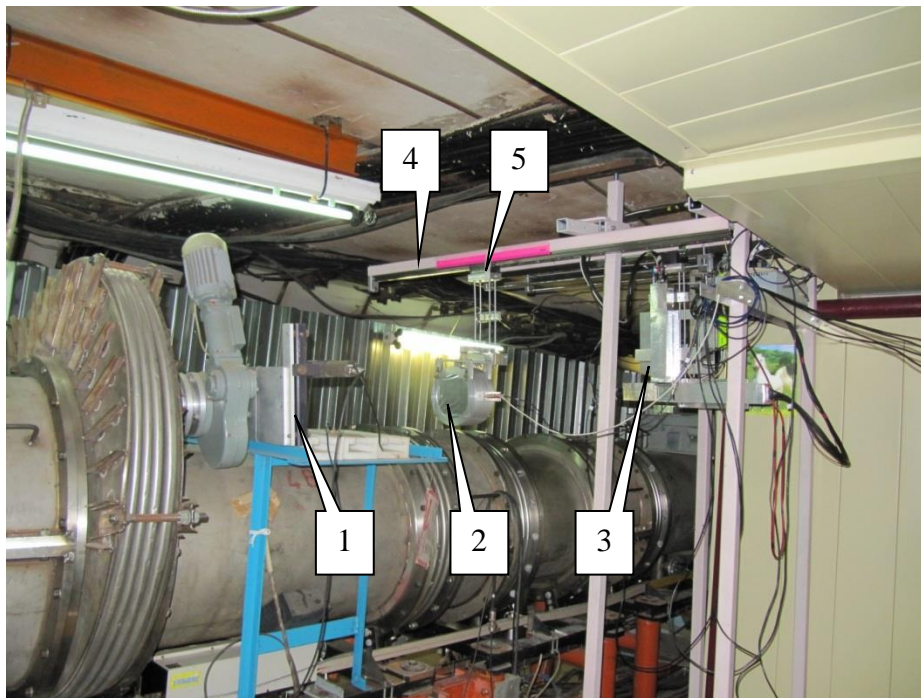


Рисунок 3.3 – Фотография прототипа СП детекторов и облучаемых образцов. 1 – окно вывода пучка; 2 – ионизационная камера; 3 – сцинтилляционный профилометр (в положении «выведен из пучка»); 4 – направляющая станции перемещения детекторов; 5 – каретка перемещения для крепления детекторов и образцов.

СП предназначена для перемещения облучаемых образцов и детекторов системы мониторинга с целью обеспечения однородности облучения заданных областей образца требуемой интенсивностью пучка. Под однородностью облучения понимается относительно равное (заранее заданное) число ионов, прошедших через все площади с размерами, например, $1 \times 1 \text{ мм}^2$ для заданной области облучения ($200 \times 200 \text{ мм}^2$). Очевидно, что само понятие «однородность» определяется не только числом ионов, но и гранулярностью площади на которой рассматривается это понятие. Однородность облучения объекта испытаний пучком ускоренных ядер может быть достигнута как перемещением объекта испытаний по заданной траектории в плоскости перпендикулярной оси пучка, так и с использованием специализированных систем развертки пучка на неподвижном объекте. На выведенных пучках Нуклотрона с энергиями 500 – 2000 МэВ/нуклон предпочтительным является метод перемещения образца относительно пучка. Данная методика требует синхронную работу системы динамического позиционирования и системы измерения пространственно-временных характеристик пучка в процессе облучения.

На рисунке 3.4 показана схема расположения четырех дистанционно управляемых станций ввода/вывода и перемещения пучковых детекторов и облучаемых образцов.

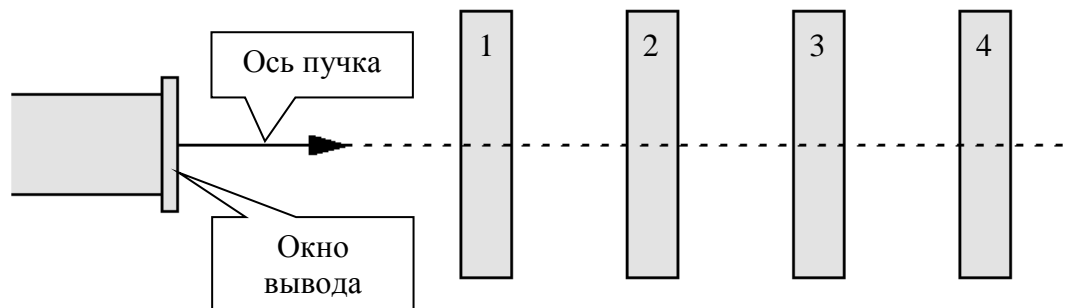


Рисунок 3.4 – Схема расположения четырех станций ввода/вывода СП детекторов и облучаемых образцов. 1 – станция размещения ионизационной камеры и ядерных фотоэмульсий; 2 – станция «тонкого» сцинтилляционного детектора и сцинтилляционного профилометра; 3 – станция облучаемых образцов фотопластин Polaroid; 4 – станция «толстого» сцинтилляционного детектора и пропорциональной камеры.

Измерение и контроль пространственно-временных характеристик и интенсивности пучка (для интенсивности не более 10^6 ионов в секунду) осуществляется при помощи «тонкого» сцинтилляционного детектора и многоканального сцинтилляционного профилометра. С целью минимизации количества вещества на пути пучка «тонкий» сцинтилляционный детектор имеет толщину 1,4 мм по пучку. Сцинтилляционный профилометр состоит из 16 сцинтилляционных световодов диаметром 1 мм, расположенных с шагом 3 мм. Таким образом, два профилометра (вертикальный и горизонтальный) перекрывают $48 \times 48 \text{ мм}^2$ площади перпендикулярной оси пучка. Для измерения абсолютной интенсивности и положения центра тяжести пучка при интенсивностях выше 10^6 ионов в секунду (начиная от интенсивности 10^5) используются секционированные ионизационные камеры [46]. В случае изучения единичных эффектов (низкие интенсивности пучков до 10^5 ионов в секунду) контроль состава пучка осуществляется на основе измерения амплитудных спектров с «тонкого» и «толстого» сцинтилляционных детекторов. Таким образом, в зависимости от постановки задачи применяются разные комбинации детекторов с возможностью их дистанционного ввода/вывода.

Для регистрации сигналов с детекторов разработана система сбора и передачи данных, основанная на многоканальном блоке интенсивности счета ТИС-32 [51], который обеспечивает регистрацию сигналов со всех детекторов в едином временном формате.

В качестве альтернативного измерения пространственных характеристик и абсолютной интенсивности пучка, а также для калибровки профилометра и «тонкого» сцинтилляционного детектора применялась методика на основе ядерных фотоэмульсий. Фотопластины быстрого проявления Polaroid применялись для подтверждения положения пучка в месте размещения образцов непосредственно перед началом облучения.

СП обеспечивает перемещение детекторов и образцов в плоскости перпендикулярной выведенному пучку ускорителя. Поскольку ответственным за создание электроники, ПО, монтаж и тестирование работоспособности СП был автор настоящей диссертации, кратко представим основные элементы данной работы.

СП включает в себя механическую, электрическую, метрологическую части и ПО. Функциональная схема электрической части СП показана на рисунке 3.5.

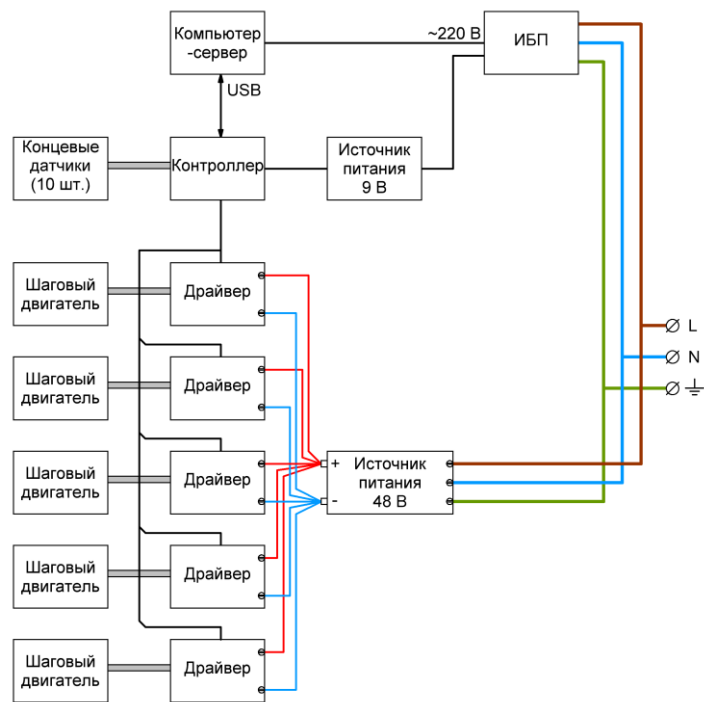


Рисунок 3.5 – Функциональная схема электрической части СП.

Электрическая часть рассчитана на работу с пятью шаговыми двигателями: по одному для каждой детекторной станции СП (станции 1, 2 и 4) и два двигателя для перемещения облучаемого объекта (станция 3) в горизонтальном и вертикальном направлениях. Механическая часть созданного прототипа ОС предназначена для перемещения третьей станции только в горизонтальном направлении. Для предотвращения потери данных и обеспечения надежной связи устройств при возникновении сбоев в электросети ~ 220 В компьютер-сервер и контроллер СП запитывается от источника бесперебойного питания Pilot UPS e500.

Для управления драйверами шаговых двигателей и контроля состояния концевых датчиков используется контроллер на базе модуля Freeduino Mega 2560. На рисунке 3.6 показана схема подключения одного шагового двигателя, драйвера и концевого датчика к контроллеру.

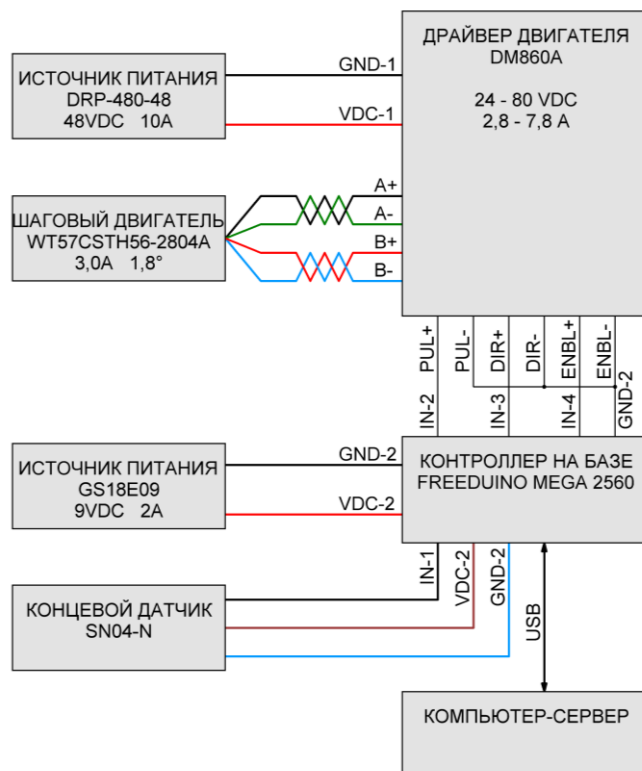


Рисунок 3.6 – Схема подключения шагового двигателя, драйвера и концевого датчика к контроллеру.

Электрическое оборудование ОС размещено в распределительном шкафу, расположенном на расстоянии около 3 м от зоны облучения. Электрическая принципиальная схема распределительного шкафа показана на рисунке 3.7.

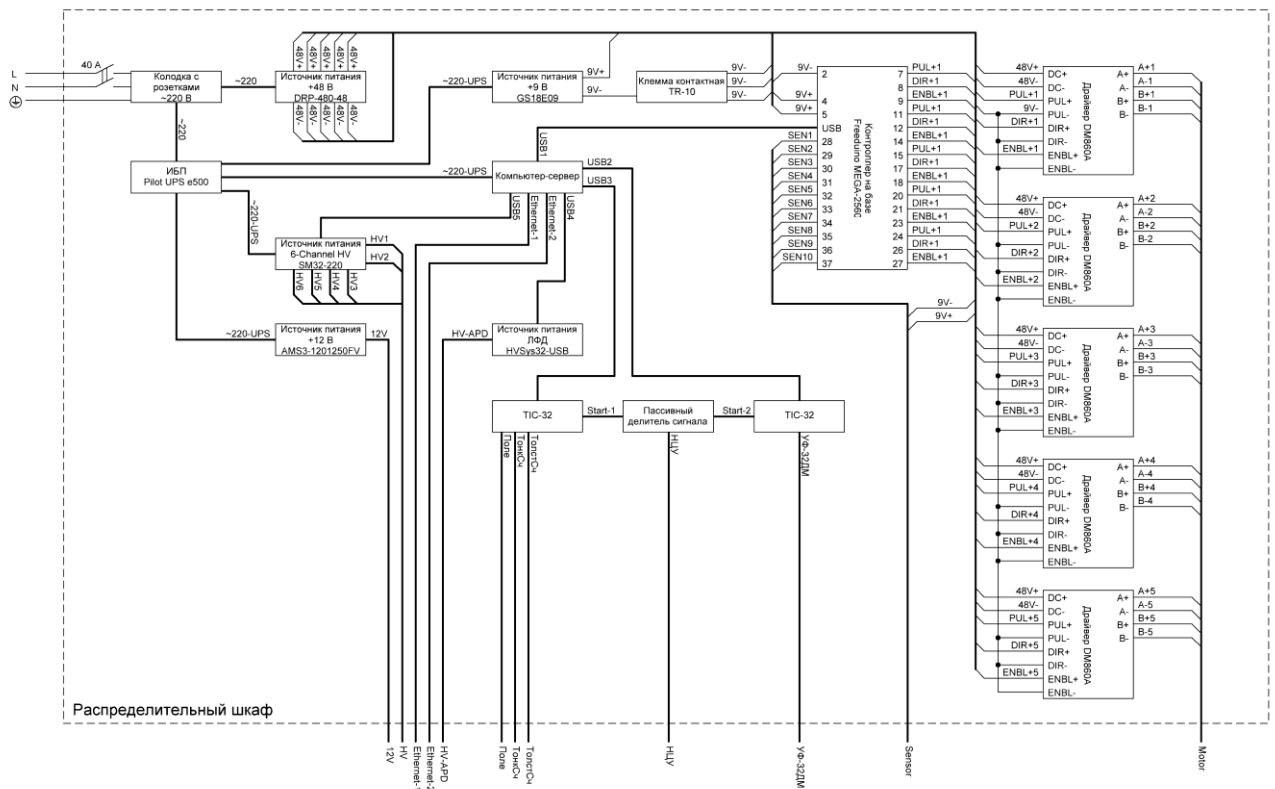


Рисунок 3.7 – Электрическая принципиальная схема распределительного шкафа для размещения оборудования облучательного стэнда.

Управление СП и контроль положения детекторов и образцов должно производиться удаленно оператором ОС при помощи специализированного ПО. Для связи и обмена данными с контроллером СП в среде программирования LabVIEW создано специализированное ПО, выполняющее следующие функции:

- управление перемещением детекторов диагностики выведенного пучка ускорителя по одной оси в плоскости перпендикулярной направлению выведенного пучка;
- управление перемещением облучаемого объекта по двум осям в плоскости перпендикулярной направлению пучка;
- отображение состояния магнитных концевых датчиков для определения крайних положений перемещаемых объектов;
- контроль координатной привязки перемещаемых объектов на основе информации с магнитных концевых датчиков.

Блок-схема алгоритма работы программы показана на рисунке 3.8.

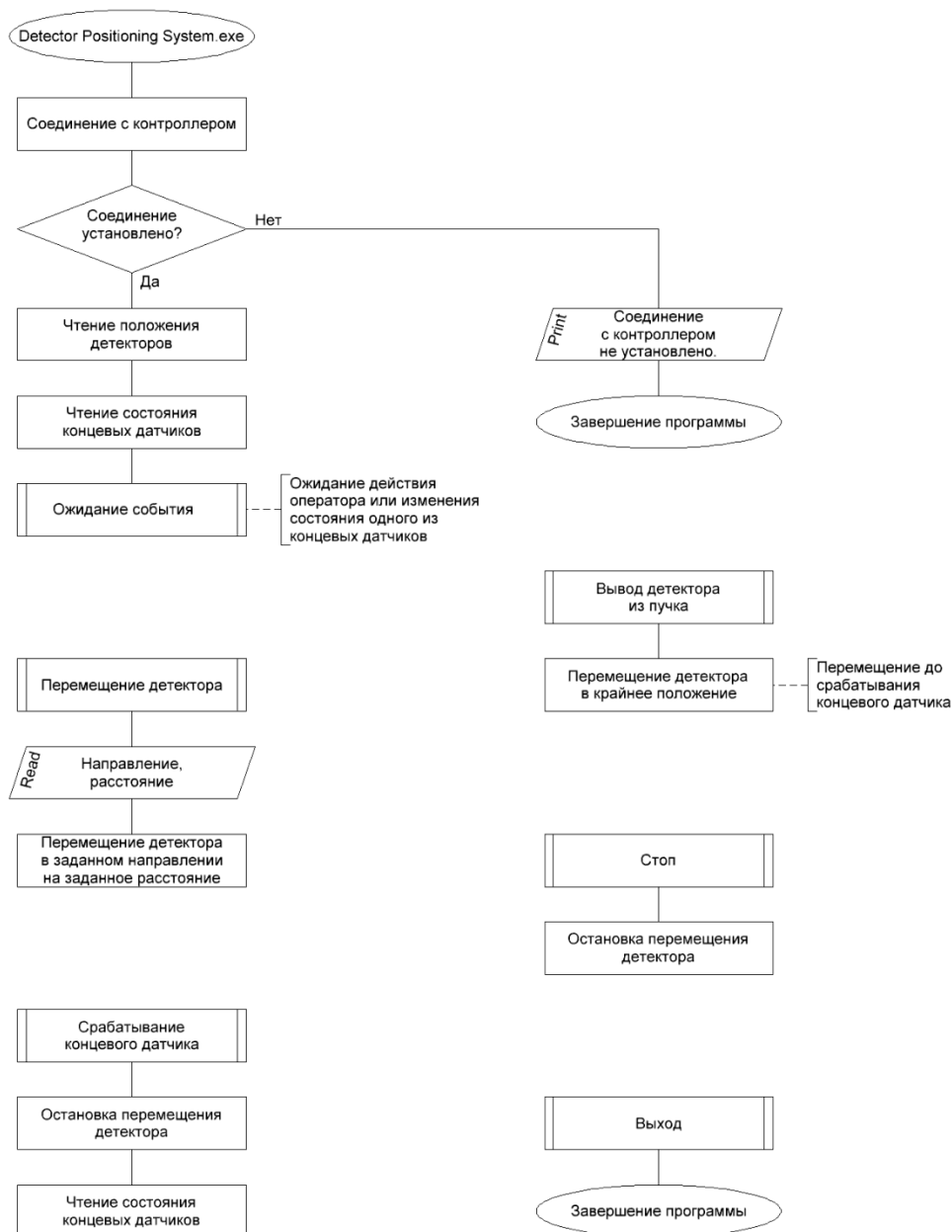


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма работы программы управления СП.

После запуска программа выполняет инициализацию соединения с контроллером. При отсутствии соединения программа выдает соответствующую ошибку и завершает работу. При отсутствии ошибки соединения программа считывает текущее положение детекторов и состояние концевых датчиков. При срабатывании (изменении состояния) одного из концевых датчиков перемещение на всех станциях СП приостанавливается и происходит опрос всех концевых датчиков. При нажатии кнопки «Вывести детектор из пучка» происходит перемещение детектора/образца в заданное крайнее положение до срабатывания концевого датчика. Кнопка «Стоп» останавливает перемещение. На рисунке 3.9 изображено окно программы управления СП.

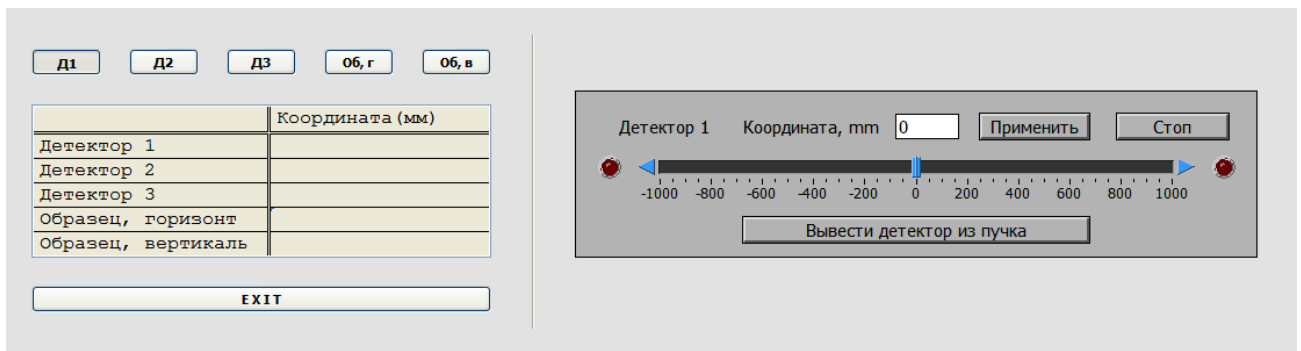


Рисунок 3.9 – Окно программы управления СП.

При проведении испытаний ОС и облучения образцов на пучке ускорителя разработана специальная методика. До начала работ с выведенным пучком ускорителя проводятся следующие работы:

- проверка системы электропитания и заземления всех узлов стенда;
- проверка системы сбора и передачи данных;
- монтаж и геодезическая юстировка детекторов на стенде;
- проверка системы перемещения и позиционирования детекторов;
- проверка системы дистанционного видеонаблюдения зоны размещения детекторов и образцов и проверка компьютерной связи ОС;
- проверка сигнальных кабелей и соединения испытываемых детекторов и аппаратуры сбора данных;
- проверка системы высоковольтного и низковольтного питания детекторов.

Для настройки выведенного пучка с требуемыми характеристиками проводятся следующие работы:

- определение энергии пучка по магнитному полю ускорителя;
- измерение интенсивности и временной структура выведенного пучка с помощью «тонкого» сцинтилляционного детектора;
- измерение профиля пучка с помощью многоканального сцинтилляционного профилометра;
- определение состава пучка с помощью «толстого» сцинтилляционного детектора;
- независимое контрольное измерение интенсивности и профиля выведенного пучка при помощи ядерных фотоэмульсий;
- для подтверждения координат и стабильности пространственного положения пучка проводится контрольный ввод/вывод (от одного до пяти раз) фотопластины быстрого проявления Polaroid, устанавливаемой в месте размещения образца (на станции 3).

Во время облучения образца проводится измерение и контроль следующих параметров пучка:

– измерение и контроль интенсивности выведенного пучка и интегрального потока выведенных ионов с помощью «тонкого» сцинтилляционного детектора;

– измерение и контроль положения центра тяжести пучка (относительно центра облучаемого образца) и ширины пучка с помощью многоканального сцинтилляционного профилометра;

– контроль стабильности параметров орбиты и интенсивности ускоренного пучка с помощью системы диагностики циркулирующего пучка на основе МКП.

После набора необходимого интегрального потока выведенных частиц для заданных координат облучения образец дистанционно выдвигается из зоны облучения. Процедура ввода/вывода и перемещения образцов заранее согласуется с действиями оператора ускорителя и корректируется оператором стенда в зависимости от измеренных параметров пучка в процессе облучения.

3.3 Результаты испытаний стенда

Испытания прототипов элементов ОС для прикладных исследований на ускорительном комплексе Нуклотрон были проведены в 2013 – 2014 гг. Измерения и контроль параметров выведенных пучков проводились на пучках дейтронов, ионов лития, углерода, аргона в диапазоне энергий 500 – 2000 МэВ/нуклон и широком диапазоне интенсивностей от единиц до 10^{10} ионов в секунду. Также произведено пробное облучение образцов ИЭТ на пучках ионов аргона Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон.

С помощью «тонкого» сцинтилляционного детектора проводилось измерение и контроля структуры и интенсивности выведенного пучка. На рисунке 2.15(б) была показана абсолютная интенсивность и структура вывода пучка ионов аргона Ar^{18+} с энергией 500 МэВ/нуклон. При этом детектор регистрирует каждый прошедший ион. Просуммировав счет с детектора по времени, получаем интенсивность выведенного пучка в данном цикле вывода. Необходимо учитывать, что интенсивность выведенного пучка может изменяться в разы от цикла к циклу. Очевидно, что временная структура пучка измеряется и записывается для каждого цикла ускорителя и учитывается как в процессе облучения, так и в последующем off-line анализе.

На рисунке 3.10 представлены вертикальный и горизонтальный динамические профили выведенного пучка, зарегистрированные при помощи сцинтилляционного профилометра, для цикла ускорения, соответствующего рисунку 2.15. Видно, что вертикальное положение пучка стабильно во времени, тогда как по горизонтали пучок постепенно смещался слева направо в начальные моменты в процессе вывода. Причинами данного смещение пучка могут быть

неравномерная работа септума ускорителя, а также смещение орбиты циркулирующего пучка в процессе вывода, что заметно на рисунке 2.15.

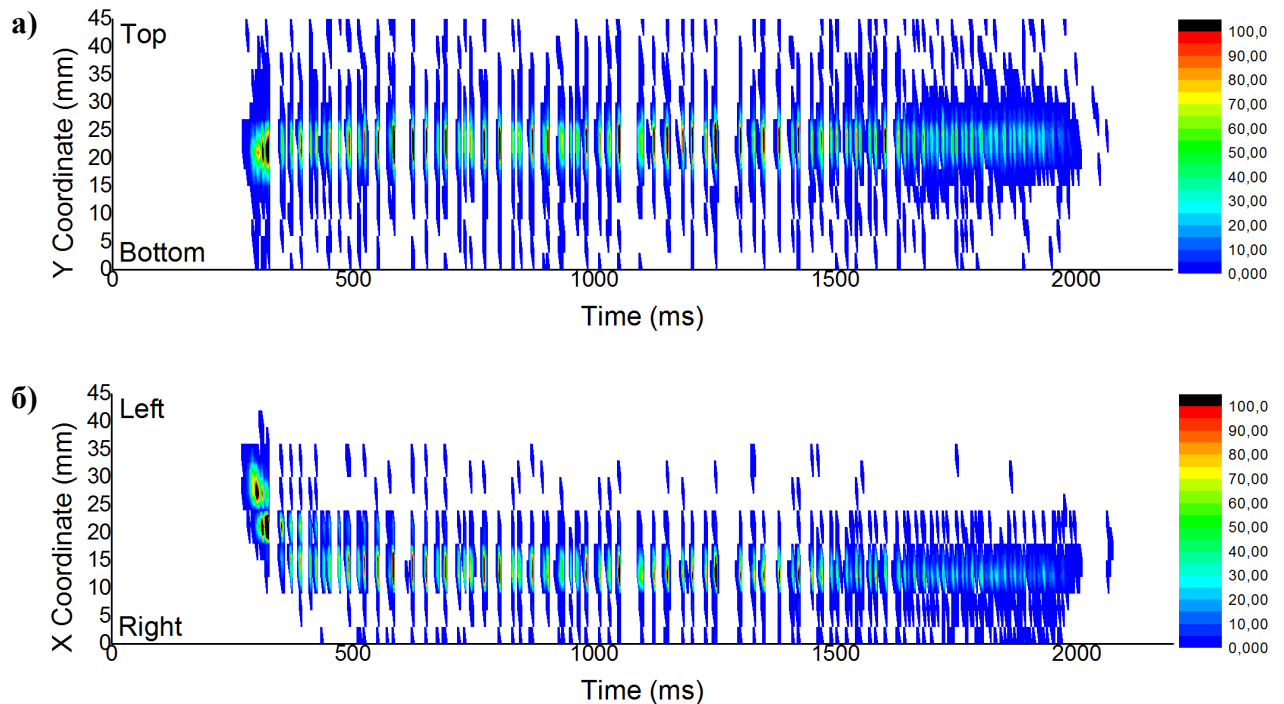


Рисунок 3.10 – Вертикальный (а) и горизонтальный (б) динамические профили выведенного пучка Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон, зарегистрированные при помощи сцинтилляционного профилометра.

Просуммировав показания профилометра по времени, получим вертикальный и горизонтальный профили пучка (рисунок 3.11). При помощи аппроксимации функцией Гаусса для горизонтальной составляющей определены: положение центра тяжести пучка на второй станции СП – 22,7 мм; ширина пучка – 4,7 мм.

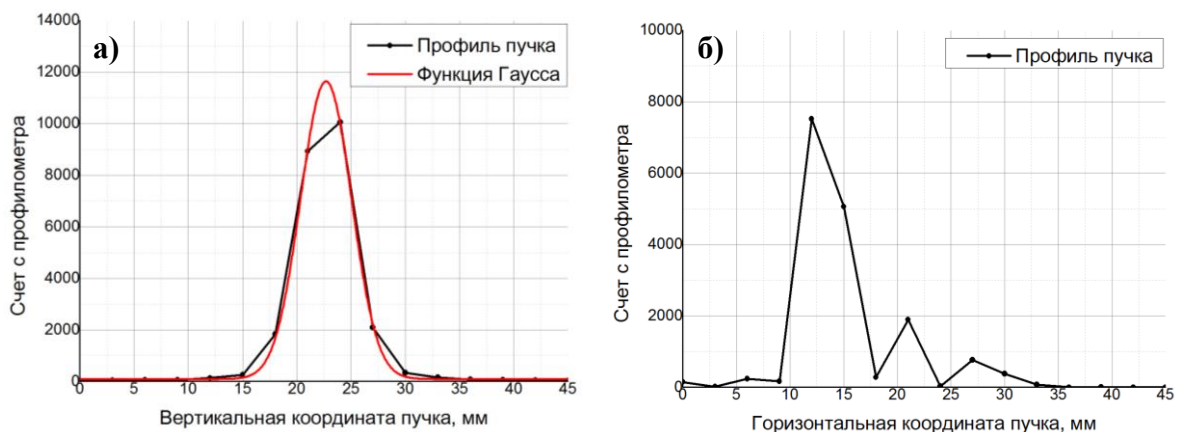


Рисунок 3.11 – Вертикальный (а) и горизонтальный (б) профили выведенного пучка Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон, зарегистрированные при помощи сцинтилляционного профилометра.

Из рисунков 3.10 и 3.11 заметна неравномерная работа каналов профилометра горизонтальной составляющей. Каналы, соответствующие координатам 18 и 24 мм, имеют меньшую эффективность регистрации. Следует отметить, что профилометры, регистрирующие вертикальную и горизонтальную координаты, изготовлены по разным технологиям. В горизонтальном профилометре применялись сцинтилляторы с размерами $3 \times 3 \times 45$ мм, при этом свет передавался через световоды диаметром 1 мм, приклеенные оптическим клеем к торцам сцинтилляторов (3×3 мм). В вертикальном профилометре использовалась сцинтиллирующая нить диаметром 1 мм, которая одновременно является рабочим телом детектора и светопередатчиком. Из результатов измерений, приведенных выше, принято решение использовать профилометры на основе сцинтиллирующих нитей.

Для калибровки «тонкого» сцинтилляционного детектора и сцинтилляционного профилометра проводилось независимое контрольное измерение интенсивности и профиля выведенного пучка при помощи ядерных фотоэмульсий. Данные измерения позволяли также уточнить положение облучаемых образцов относительно центра тяжести выведенного пучка. На рисунке 3.12 показана фотография проявленной ядерной фотоэмульсии, а также её увеличенное изображение под микроскопом при облучении ионами Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон.

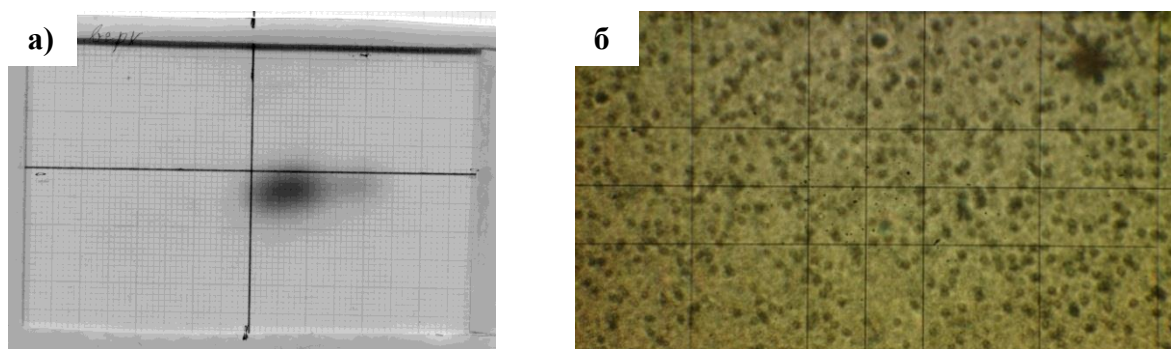


Рисунок 3.12 – Фотография проявленной ядерной фотоэмульсии при облучении ионами Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон в течение 30 мин. (а) – эмульсия на миллиметровой бумаге; (б) – эмульсия под микроскопом с 200 кратным увеличением.

Эмульсия размещалась на первой станции СП и облучалась в течение 30 мин. При этом одновременно производилась регистрация интенсивности и профиля выведенного пучка при помощи сцинтилляционных детекторов, а также контроль стабильности параметров орбиты и интенсивности ускоряемого циркулирующего пучка при помощи системы диагностики на основе МКП. Под микроскопом, на ядерной фотоэмульсии видны взаимодействия от отдельных ионов. Принимая эффективность регистрации эмульсии равной 100 %, имеется возможность пересчитать все ионы, прошедшие через эмульсию и тем самым провести калибровку абсолютной интенсивности «тонкого» сцинтилляционного детектора.

В результате подсчетов количества треков на площади 70×70 мкм с шагом 2 мм получен профиль выведенного пучка (рисунок 3.13), а также интегральный поток частиц, прошедших через эмульсию. Данный профиль соответствует эмульсии на рисунке 3.12. Интегральный поток частиц, зарегистрированных ядерной фотоэмульсией составил $4,5 \cdot 10^6 \pm 1\%$ частиц. За тоже время, интегральный поток частиц, зарегистрированный «тонким» сцинтилляционным детектором, составил $4,47 \cdot 10^6$ частиц, что лежит в пределах точности подсчета частиц, зарегистрированных эмульсией. Таким образом, эффективность регистрации «тонкого» сцинтилляционного детектора можно принять близкой к 100 %, учитывая обычные требования к точности измерения потока частиц, прошедших через образец – на уровне 5 %.

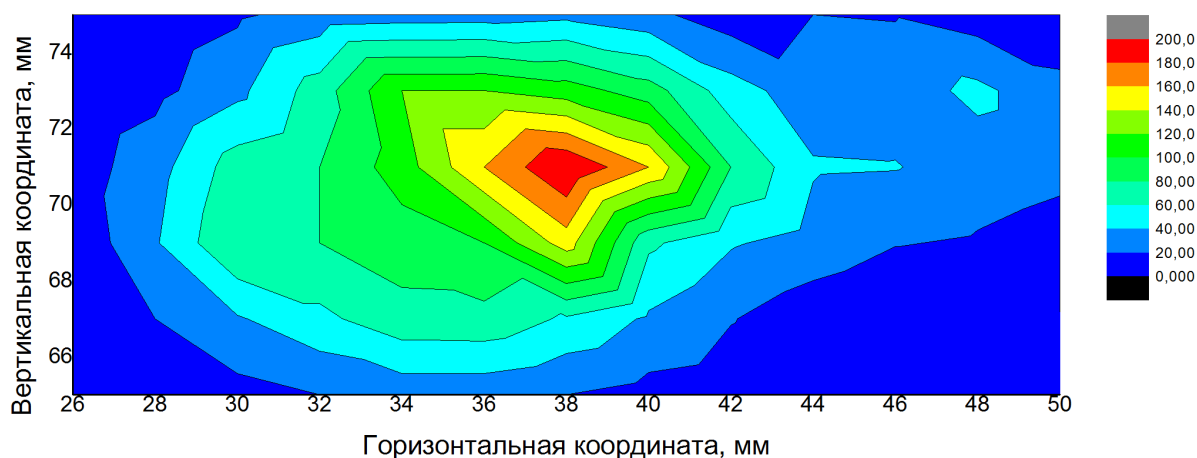


Рисунок 3.13 – Профиль выведенного пучка, зарегистрированный при помощи ядерной фотоэмульсии, при облучении ионами Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон в течение 30 мин.

На рисунке 3.13 справа от центра выведенного пучка заметно второе менее яркое пятно, что обусловлено смещением пучка в процессе вывода. Данное смещение зарегистрировано также сцинтилляционным профилометром, и описано выше (рисунки 3.10 и 3.11).

Для калибровки сцинтилляционного профилометра из рисунка 3.13 определена ширина пучка в вертикальной и горизонтальной плоскости. Ширина пучка в вертикальной плоскости составила 4,6 мм, что согласуется с шириной, зарегистрированной профилометром на рисунке 3.11. В горизонтальной плоскости ширина составила 8,0 мм, но необходимо помнить, что пучок смещался в процессе вывода.

Для определения состава выведенного пучка производились наборы амплитудных спектров сигналов с «толстого» и «тонкого» сцинтилляционных детекторов при помощи четырехканального быстрого АЦП DRS4 [52]. АЦП DRS4 удобны для работ, связанных с настройкой и калибровкой систем, требующих высокого временного разрешения. Для работы с таким АЦП была написана специализированный программный код для математического анализа и визуализации регистрируемых данных. Программирование проводилось на основе

стандартного пакета LabVIEW. На рисунке 3.14 показан характерный спектр сигналов со сцинтилляционного детектора при регистрации пучка ионов Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон. Основному пику амплитуд от 340 до 480 мВ соответствуют ионы Ar^{18+} . Интегральное количество ионов с меньшим, чем Ar^{18+} зарядом (фрагментов) составляло не более 7 % в месте расположения исследуемых образцов.

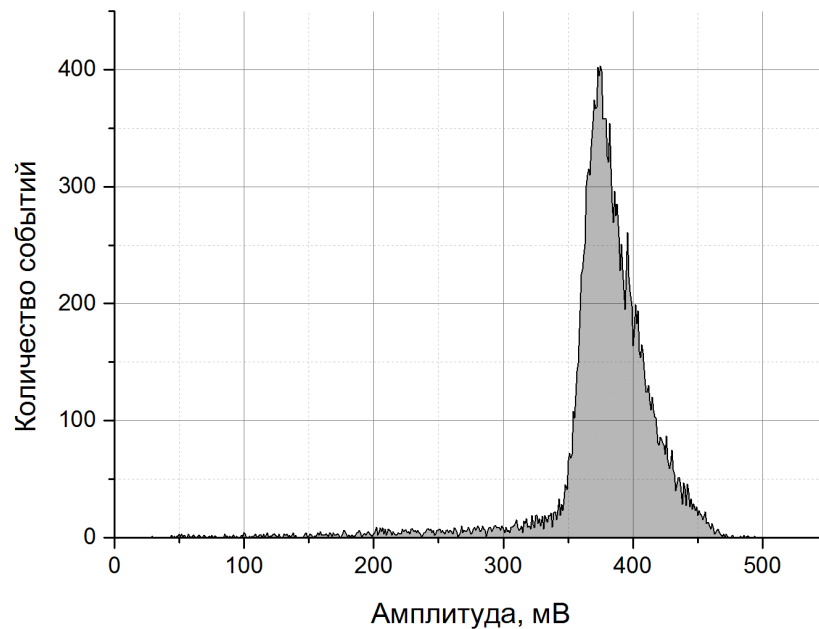


Рисунок 3.14 – Амплитудный спектр со сцинтилляционного детектора при регистрации выведенного пучка Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон.

Для сравнения на рисунке 3.15 изображен амплитудный спектр сигналов со сцинтилляционного детектора в момент настройки вывода пучка ионов Ar^{18+} на энергии 1200 МэВ/нуклон. На рисунке отмечен пик сигналов, соответствующий ионам Ar^{18+} . При этом количество ионов Ar^{18+} в месте размещения исследуемых образцов составляет около 15 % от общего количества выведенных частиц.

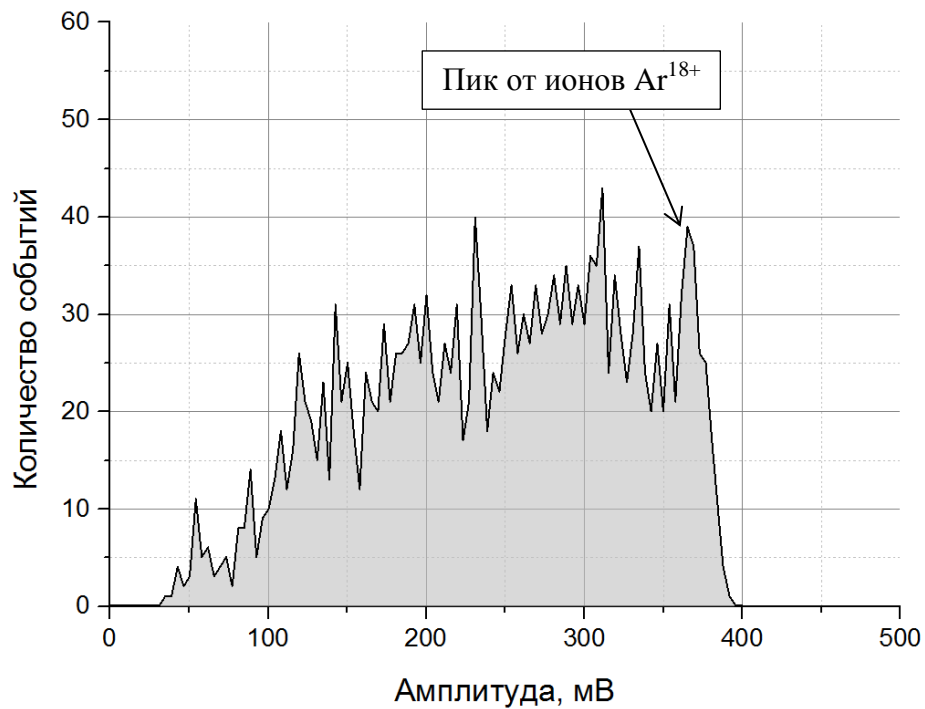


Рисунок 3.15 – Амплитудный спектр со сцинтилляционного детектора при регистрации выведенного пучка Ar^{18+} 1200 МэВ/нуклон.

В процессе вывода пучка при таком режиме работы ускорителя были облучены стопки ядерных фотоэмульсий в эксперименте Беккерель. В последствие, сопоставление данных, полученных после обработки эмульсий, подтвердили наши измерения состава выведенного пучка ядер аргона при энергии 1200 МэВ/нуклон. Очевидно, что при таком режиме вывода пучка не представляется возможным провести качественное облучение образцов.

Тестовые испытания компонентов электронной техники проводились с пучком ядер аргона 500 МэВ/нуклон. Непосредственно перед проведением облучения образцов ИЭТ на месте их расположения (третья станция СП) производились контрольные измерения профиля и положения пучка при помощи фотопластин быстрой проявки Polaroid, при этом центр фотопластин совпадал с центром исследуемых образцов. Фотопластина облучалась в течение нескольких циклов вывода пучка из ускорителя на настроенном режиме, после чего ускорение снималось, производилась проявка фотопластины и по фотографии определялся центр пучка относительно центра исследуемых образцов ИЭТ. На рисунке 3.16 показана проявленная фотопластина Polaroid при определении центра выведенного пучка Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон.

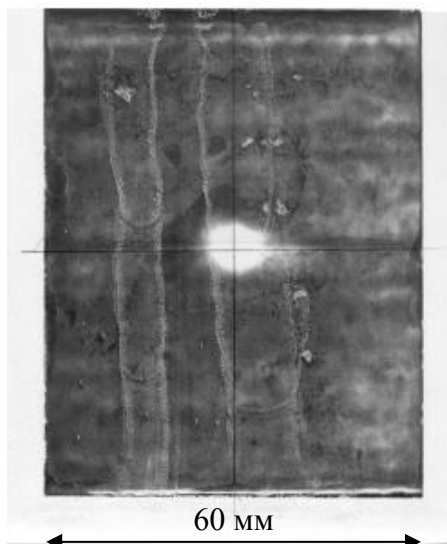


Рисунок 3.16 – Фотография проявленной фотопластины Polaroid при контрольном определении центра пучка Ag^{18+} 500 МэВ/нуклон перед облучением образцов ИЭТ.

Перед установкой образца ИЭТ для проверки воспроизводимости всех характеристик пучка и надежной работы СП, каретка, на которой крепились фотопластины Polaroid (а затем образцы ИЭТ) дистанционно выводилась и вводилась в пучок перед каждым облучением. Работа СП и стабильность вывода пучка в настроенном режиме ускорителя показали, что центр пучка, аналогичный представленному на рисунке 3.16, воспроизводится с точностью 1 мм.

В процессе тестовых облучений ИЭТ проводилось on-line измерение и контроль интенсивности, положения центра тяжести и ширины выведенного пучка. На рисунке 3.17 показаны графики измерения параметров выведенного пучка в процессе облучения ИЭТ пучком Ag^{18+} 500 МэВ/нуклон. Для наглядности на рисунке изображены номера сеансов облучения ИЭТ. Из рисунка видны значительные изменения интенсивности пучка от цикла к циклу ускорения и вывода, а также изменение положения центра тяжести пучка в горизонтальной плоскости на уровне 2 мм. При этом ширина пучка стабильна в пределах 1 – 2 мм.

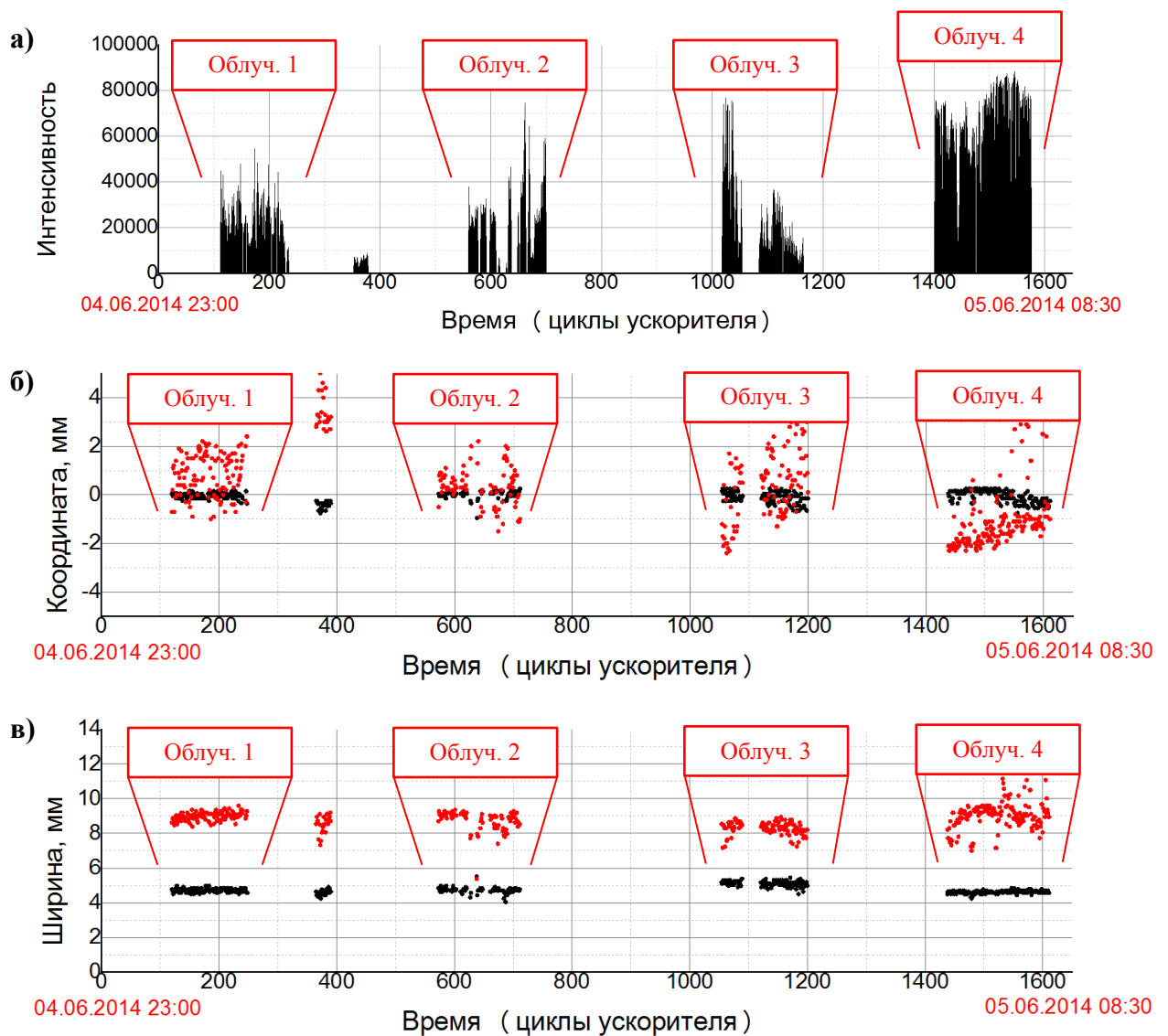


Рисунок 3.17 – Графики измерения параметров выведенного пучка в процессе облучения ИЭТ пучком Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон: (а) – интенсивность; (б) – положение центра тяжести; (в) – ширина пучка. Черные точки – вертикальная составляющая; красные точки – горизонтальная составляющая.

На основе проведенных испытаний прототипа ОС на пучках ускорительного комплекса Нуклотрон можно сделать следующие выводы. Все системы стенда показали адекватность выбранных решений для обеспечения контроля требуемых параметров выведенного пучка при заданной однородности облучения. СП дает возможность облучать объекты испытаний с однородностью не хуже 10 % на площади размером $200 \times 200 \text{ мм}^2$.

Дальнейшая разработка ПО для управления СП в сочетании с динамическим контролем пространственных характеристик пучка позволит более эффективно использовать пучковое время и проводить облучения заданных координат образцов с точностью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ (на площади $200 \times 200 \text{ мм}^2$) с однородностью облучения не хуже 5 %.

ГЛАВА 4

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИРОВАНИЯ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ЭНЕРГИЯ+ТРАНСМУТАЦИЯ»

4.1 Постановка задачи и описание системы мониторинга

Проблема переработки долгоживущих радиоактивных ядерных отходов, включая плутоний, минорные актиниды и другие продукты деления, представляет важную задачу в ядерной технологии и в настоящее время широко изучается практически во всех ускорительных центрах в мире. Исследования, проведенные в ядерных центрах России и других стран, указывают на принципиальную возможность уничтожения долгоживущих радиоактивных отходов в интенсивных потоках нейтронов, а также на перспективности электроядерного способа производства энергии с одновременной трансмутацией долгоживущих радиоактивных отходов. Данный способ заключается в создании подкритического реактора с внешним источником в виде нейтронопроизводящей мишени, которая облучается пучком частиц, выведенным из ускорителя [53]. Подобного типа системы называются Accelerator Driven Systems (ADS) и в настоящее время рассматриваются как в качестве самостоятельных энергетических установок, так и в качестве перспективных дополнений к существующим конструкциям ядерных реакторов.

ADS-системы привлекательны прежде всего своими возможностями трансмутации младших актинидов (в первую очередь, изотопы нептуния, америция и кюрия), которые вызывают наибольшие проблемы из-за большого периода полураспада. По состоянию на 2006 год, в мире было накоплено около 110 тонн младших актинидов в хранилищах отработанного ядерного топлива, а также 40 тонн младших актинидов в составе высокоактивных отходов переработки отработанного ядерного топлива. В случае сохранения тенденции накопления младших актинидов, их общее количество удвоится к 2020 году.

Для создания полномасштабной реакторной установки, управляемой ускорителем, с целью трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов, необходимы экспериментальные данные по сечениям ядерных реакций в области энергий до нескольких ГэВ/нуклон. В этом интервале энергий зачастую отсутствуют экспериментальные данные по сечениям деления тяжелых металлов релятивистскими ядрами, а теоретические модели не дают корректного описания.

На выведенных пучках ускорительного комплекса Нуклотрон ОИЯИ в зоне фокуса Ф-3 традиционно проводятся эксперименты по облучению тяжелых мишеней, а также облучение биологических объектов. Особенность проведения таких исследований требует контроля как интенсивности, так и пространственно-временных характеристик выведенных пучков в

процессе облучения с паспортизацией накопленных данных для последующего анализа экспериментов.

В 2010 году в ОИЯИ принят проект «Энергия и Трансмутация РАО», в рамках которого проводятся эксперименты по облучению подкритической урановой сборки «КВИНТА» релятивистскими частицами [6-8]. Для экспериментов в данной области представляют интерес как облучение больших мишеней из тяжелых элементов, так и исследование процессов деления в тонких образцах, располагаемых непосредственно в выведенном пучке релятивистских ионов. И те и другие эксперименты требуют особого внимания к качеству мониторинга выведенных пучков. Кроме того, в ряде работ, выполненных в рамках коллаборации «Энергия+Трансмутация» по исследованию выхода запаздывающих нейтронов из толстой мишени, облучаемой релятивистскими дейтронами, необходимо измерения временной структуры выведенных пучков [8].

На начальном этапе проведения этих экспериментов в основном использовался активационный метод для определения интегрального потока выведенного пучка. К недостаткам данного метода относятся прежде всего необходимость дополнительной информации о временной структуре облучения от цикла к циклу ускорителя, а также невозможность контроля положения и формы пучка в процессе облучения. Очевидно, что данная методика не применима к изучению запаздывающих нейтронов и других постановок экспериментов, требующих информацию о временной структуре пучка в процессе вывода из ускорителя.

В стандартной активационной методике, применяемой в экспериментах «Энергия+Трансмутация» [6], используются алюминиевые фольги с последующим анализом при помощи ППД гамма спектрометров на основе чистого германия. Метод основан на известной реакции преобразования алюминия в изотоп натрия $^{27}\text{Al}(d,x) \rightarrow ^{24}\text{Na}$. Подробно методика и анализ факторов, влияющих на точность измерения, изложены в работе [7].

Погрешность данного метода в основном определяется точностью знания величины сечения реакции для данного пучка с алюминием. Однако, в процессе измерений наблюдалось, что в разных группах коллаборации «Энергия+Трансмутация», использующие активационную методику, полученные результаты для одного и того же облучения (имея одни величины сечений реакции, эффективности конкретного спектрометра и методику анализа данных) отличаются на величину до 40 %, что в несколько раз выше предполагаемых погрешностей самой методики. Отклонения такого же масштаба наблюдались и в сравнении с показаниями интенсивности на основе штатных детекторов, расположенных непосредственно на выводе пучка из ускорителя.

Данное обстоятельство стимулировало развитие систем мониторинга выведенных пучков в зоне облучения мишеней и проведение абсолютных измерений интенсивностей пучков альтернативными методами. Кроме того, расчеты и моделирования процессов в тяжелых мишенях показали необходимость измерения и контроля пространственных характеристик пучка в процессе облучения.

Эксперименты с установкой «КВИНТА» показали необходимость в создании системы мониторинга выведенных пучков Нуклотрона в диапазоне интенсивностей от 10^5 – 10^{11} частиц за цикл вывода с определением абсолютной величины интенсивности с точностью 10 % и контроля пространственно-временного распределения пучка на облучаемой мишени с точностью 1 мм для положения центра тяжести и дисперсии в плоскости перпендикулярной направлению выведенного пучка. Таким образом, в экспериментах 2012 – 2015 гг. создана и успешно использована система диагностики на основе ионизационных камер, сцинтилляционных счетчиков, PAD-камеры и проволочных пропорциональных камер [46].

В данной главе диссертации описана часть данной системы, разработанная нашей группой, которая включает в себя ионизационные камеры и сцинтилляционные счетчики для определения интенсивности и пространственно-временных характеристик пучка. Проведен также сравнительный анализ работы детекторов всей системы в целом.

На рисунке 4.1 приведена схема системы мониторинга, включающая в себя следующий набор детекторов: восьмизорная ионизационная камера IC1; координатно-чувствительная ионизационная камера IC2; многопроволочная пропорциональная камера MPC; PAD-камера; набор калибровочных сцинтилляционных счетчиков. Сцинтилляционные счетчики используются для измерений низких интенсивностей (менее 10^7 частиц в секунду), а также для абсолютной калибровки ионизационных детекторов при пониженной интенсивности.

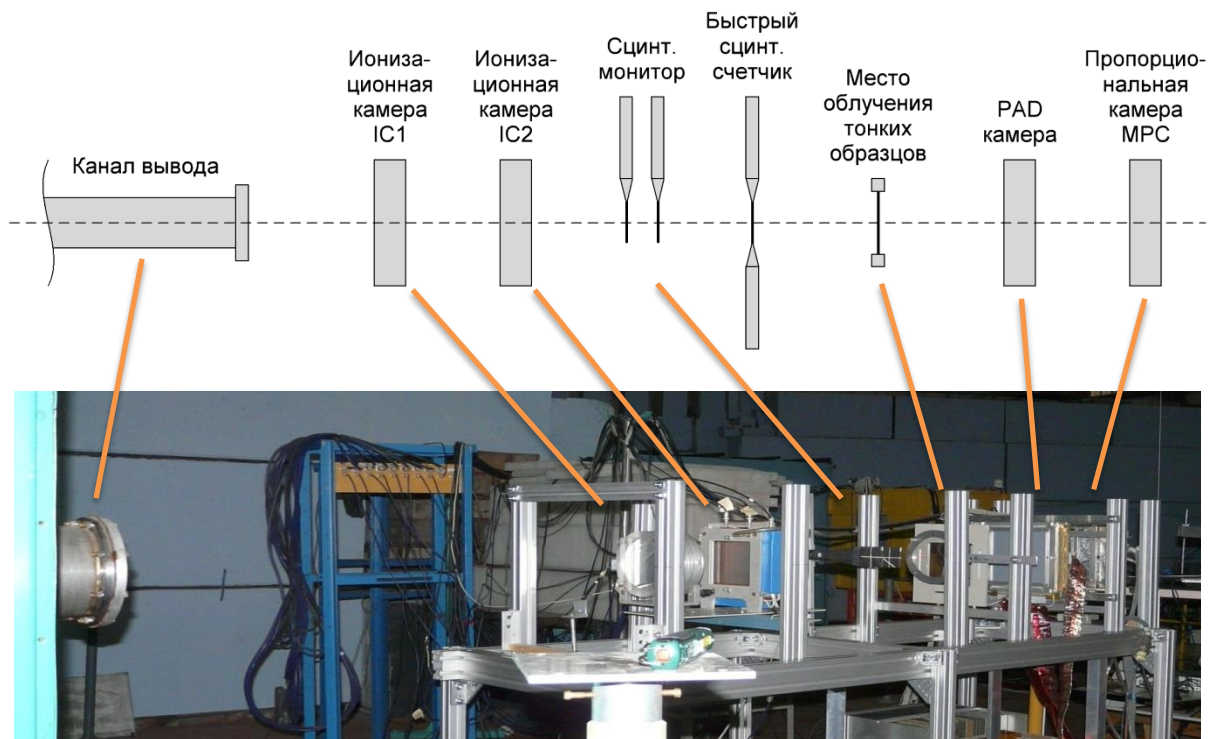


Рисунок 4.1 – Система мониторинга выведенных пучков Нуклотрона в экспериментальном зале фокуса Ф-3.

Ионизационная камера IC1 состоит из восьми секций диаметром 200 мм и толщиной по 10 мм по пучку. Секции разделены майларовой пленкой толщиной 10 мкм с двухсторонним алюминиевым напылением. В качестве активного вещества использовался воздух при атмосферном давлении (возможно использование аргона и других газов). Рабочее напряжение камеры +800 В. Камера работает в режиме сбора ионов, где заряд со всех восьми секций объединяется в общий зарядовый сигнал.

Ионизационная камера IC2 (проволочного типа) состоит из двух независимых рабочих газовых объемов толщиной по 8 мм по пучку. Сигнальные и потенциальные плоскости камеры выполнены из проволок золоченого вольфрама толщиной 30 мкм, натянутых во взаимно перпендикулярных направлениях с шагом 2 мм. Рабочий газ – аргон. Камера работает в режиме сбора ионов при напряжении на потенциальных плоскостях +800 В. Особенность данной камеры заключается в том, что предусмотрена возможность съема заряда с группы проволок в каждой плоскости, что позволяет измерять пространственное положение пучка. В описываемой системе мониторинга сигнальные проволоки камеры IC2 объединяются по две группы в каждой плоскости (право-лево, верх-низ), что позволяет контролировать изменение положения центра тяжести выведенного пучка. Таким образом, с данной камеры одновременно вырабатываются четыре зарядовых сигнала.

Сигналы с камер IC1 и IC2 регистрируются при помощи специализированного восьмиканального преобразователя заряд-частота [54], который вырабатывает импульс стандарта NIM длительностью 500 нс на каждые 25 пКл зарегистрированного заряда. Для последующей регистрации цифровых импульсов с привязкой по времени используется многоканальный счетчик с буферной памятью. Такая методика позволяет зарегистрировать не только общий заряд по каждому каналу, но и временную структуру выведенного пучка. Рабочее напряжение ионизационных камер было выбрано на основе измеренной зависимости числа отсчетов от напряжения на камере в середине «плато» (в диапазоне от 400 до 1400 В число отсчетов растет не более чем на 5 %).

Проволочные пропорциональные камеры и PAD-камера, применяемые в коллаборации «Энергия+Трансмутация», подробно описаны в работе [55].

4.2 Результаты работы

На первом этапе работы проведены одновременные измерения интенсивности пучка всеми ионизационными детекторами при разных режимах работы ускорителя по интенсивности и временной структуре пучка. Для примера на рисунке 4.2 показаны распределения отношений показания интенсивности ионизационных камер: отношение показания камеры IC1 к PAD-камере и соотношение между камерами IC1 и IC2. Данные измерения показали, что ошибки относительных измерений между ионизационными детекторами находятся в пределах 5 %.

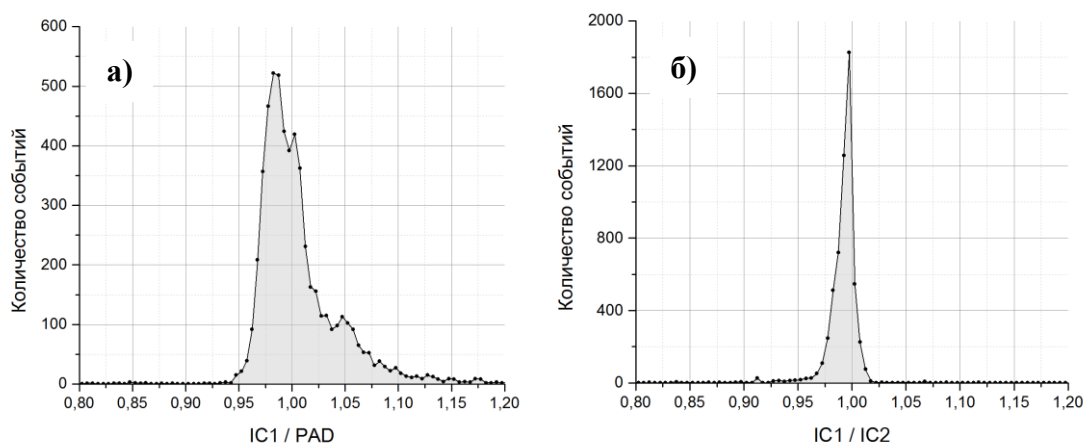


Рисунок 4.2 – Гистограммы отношений показания интенсивности ионизационных камер: (а) – отношение IC1 к PAD-камере; (б) – отношение IC1 к IC2. Пучок дейтронов 4 ГэВ/нуклон.

На рисунке 4.3 показана временная структура одного цикла вывода пучка из ускорителя (углерод 2 ГэВ/нуклон), полученная с ионизационной камеры IC1. Длительность вывода в данном режиме составляла 750 мс, при этом счет с камеры IC1 составлял около 40 событий за

один временной шаг измерения (3,5 мс). При уменьшении временного шага измерения до 1 мс и меньше начинают проявляться паразитные частоты в неравномерности вывода пучка.

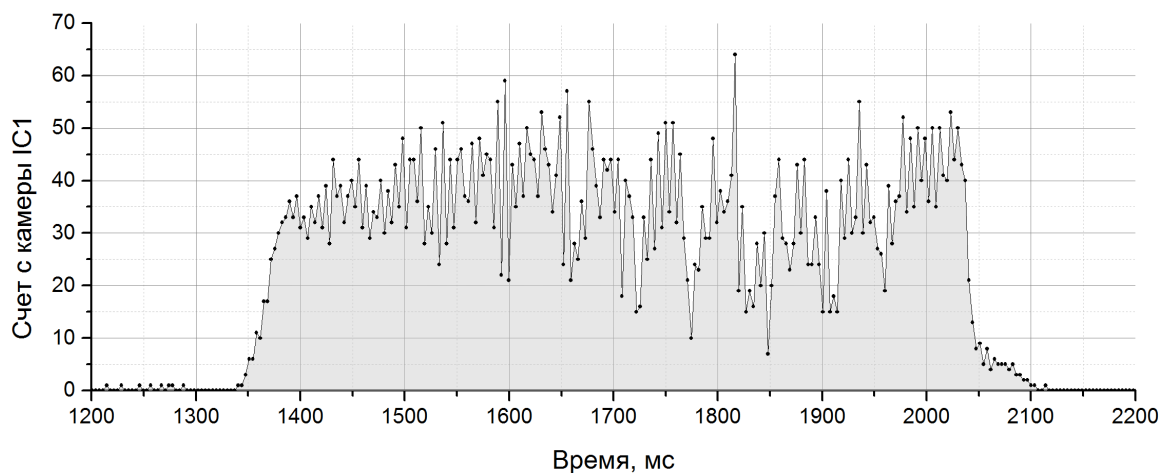


Рисунок 4.3 – Временная структура выведенного пучка по камере IC1, соответствующая одному циклу вывода из ускорителя (длительность вывода 750 мс, временной шаг измерения 3,5 мс). Пучок углерода 2 ГэВ/нуклон.

Для определения пространственного распределения (ширины и положения центра тяжести) пучка на мишени использовалась многопроволочная пропорциональная камера MPC. Как альтернативный метод контроля положения пучка и его отклонения в процессе облучения были проанализированы данные с секционированной ионизационной камеры IC2. Сравнительный анализ камер MPC и IC2 показал возможность использования камеры IC2 для динамического контроля положения центра тяжести пучка с точностью 0,5 мм. Горизонтальное положение центра тяжести пучка по камере IC2 определялось квадратичной функцией от величины отношения числа отсчетов правой к левой половине камеры (аналогично верхняя и нижняя половины для вертикальной координаты). Квадратичная функция была определена на основе предположения о гауссовой форме распределения пучка. На рисунке 4.4 показано положение центра тяжести пучка, измеренное при помощи камеры MPC и камеры IC2, в течение облучения мишени пучком дейтронов 4 ГэВ/нуклон. Видно, что смещение пучка в течение всего времени облучения составило около 0,5 мм по горизонтали и 1,5 мм по вертикали, что синхронно регистрируют обе камеры. Отметим, что в данных измерениях центры камер смещены относительно друг друга на величину 0,8 мм по горизонтали и 5 мм по вертикали (рисунки 4.4 и 4.5).

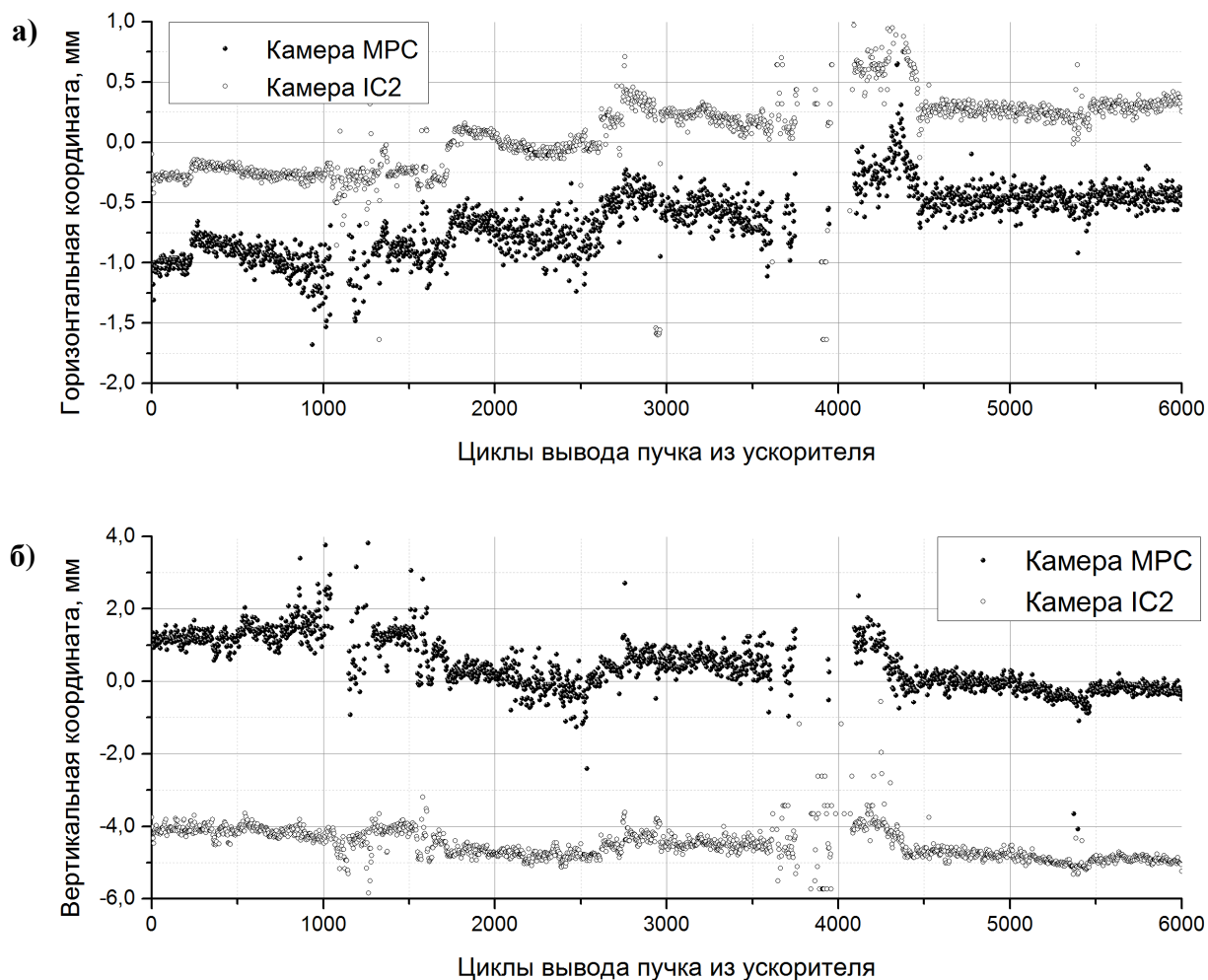


Рисунок 4.4 – Среднее положение пучка, измеренное при помощи камеры MPC и камеры IC2, в течение облучения мишени пучком дейтронов 4 ГэВ/нуклон: (а) – горизонтальная координата пучка; (б) – вертикальная координата пучка.

На рисунке 4.5 показана разница в определении координаты положения центра тяжести пучка по камерам MPC и IC2. Видно, что методика использования секционированной камеры IC2 позволяет контролировать отклонение положения центра тяжести пучка с точностью не хуже 1 мм. Точность определения вертикальной координаты в два раза ниже, поскольку центр камеры IC2 был смещен по вертикали на 4 мм относительно реального центра выведенного пучка в отличие от горизонтальной координаты, где центр камеры был выставлен по центру пучка с точностью 1 мм.

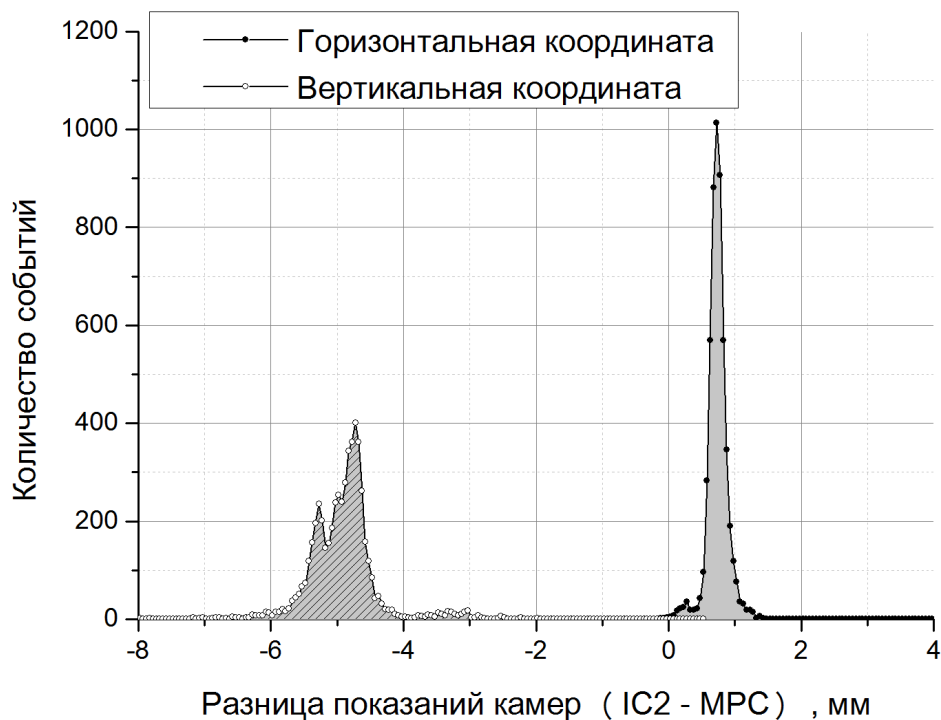


Рисунок 4.5 – Гистограмма разницы в определении координаты среднего положения пучка между камерами MPC и IC2 в течение облучения мишени пучком дейтронов 4 ГэВ/нуклон.

Таким образом, методика использования секционированной ионизационной камеры IC2 позволяет одновременно измерять интенсивность и отклонение положения пучка, используя минимальное число каналов регистрации. Однако следует учесть, что точность измерения отклонения пучка зависит от точности позиционирования центра камеры относительно оси выведенного пучка.

4.3 Калибровка ионизационных камер

Абсолютная калибровка ионизационных камер была проведена в 2013 г. на пучках ядер углерода с пониженной интенсивностью $10^4 - 10^6$ частиц/цикл в режиме пересчета каждой частицы быстрыми сцинтилляционными счетчиками.

Необходимо отметить, что данный режим калибровки возможен только в том случае, когда диапазон работы по интенсивности сцинтилляционных счетчиков (в режиме регистрации каждой частицы) перекрывается с диапазоном работы ионизационной камеры для получения минимально необходимой статистики отсчетов. Характерная длительность вывода пучка на Нуклотроне составляет 300 – 1000 мс. Максимальная загрузка сцинтилляционного счетчика составляет до 10^7 частиц в секунду. Тем не менее, учитывая временную неравномерность вывода пучка (рисунок 4.3), максимальная загрузка сцинтилляционного счетчика ограничена величиной порядка 10^6 частиц/цикл и зависит от равномерности и длительности вывода пучка

из ускорителя. При интенсивностях выше указанной величины сцинтилляционные счетчики начинают просчитывать.

В тоже время для набора минимально необходимой статистики нижняя граница диапазона работы ионизационной камеры IC1 составляет порядка 10^7 частиц/цикл для дейтронов, что не перекрывается с диапазоном работы сцинтилляционных счетчиков, и 10^5 частиц/цикл для ядер углерода. Таким образом, калибровка ионизационных камер оказалась возможна только при пучках относительно тяжелых ядер углерода, доступных на тот момент на Нуклотроне.

Калибровка проводилась с использованием нескольких (до четырех) быстрых сцинтилляционных счетчиков включенных в режим «совпадения». Размер сцинтилляторов (70×70 мм) заведомо превышал поперечные размеры регистрируемого пучка. Счетчики регистрировали каждый ион, проходящий через сцинтиллятор, при этом число отсчетов с каждого отдельного счетчика совпадало с числом зарегистрированных событий «совпадения» с точностью 0,1 %.

На рисунке 4.6 показаны зависимости счета совпадения сцинтилляционных счетчиков от числа отсчетов камеры IC1 при разных энергиях пучка углерода. Отклонение от линейной зависимости свидетельствует о перегрузки сцинтилляционных счетчиков и, очевидно, зависит от временной структуры выведенного пучка. При энергии 1 ГэВ/нуклон временная структура выведенного пучка была менее однородна по сравнению с пучками 2 и 4 ГэВ/нуклон, поэтому отклонение от линейной зависимости наступает при меньшей интенсивности.

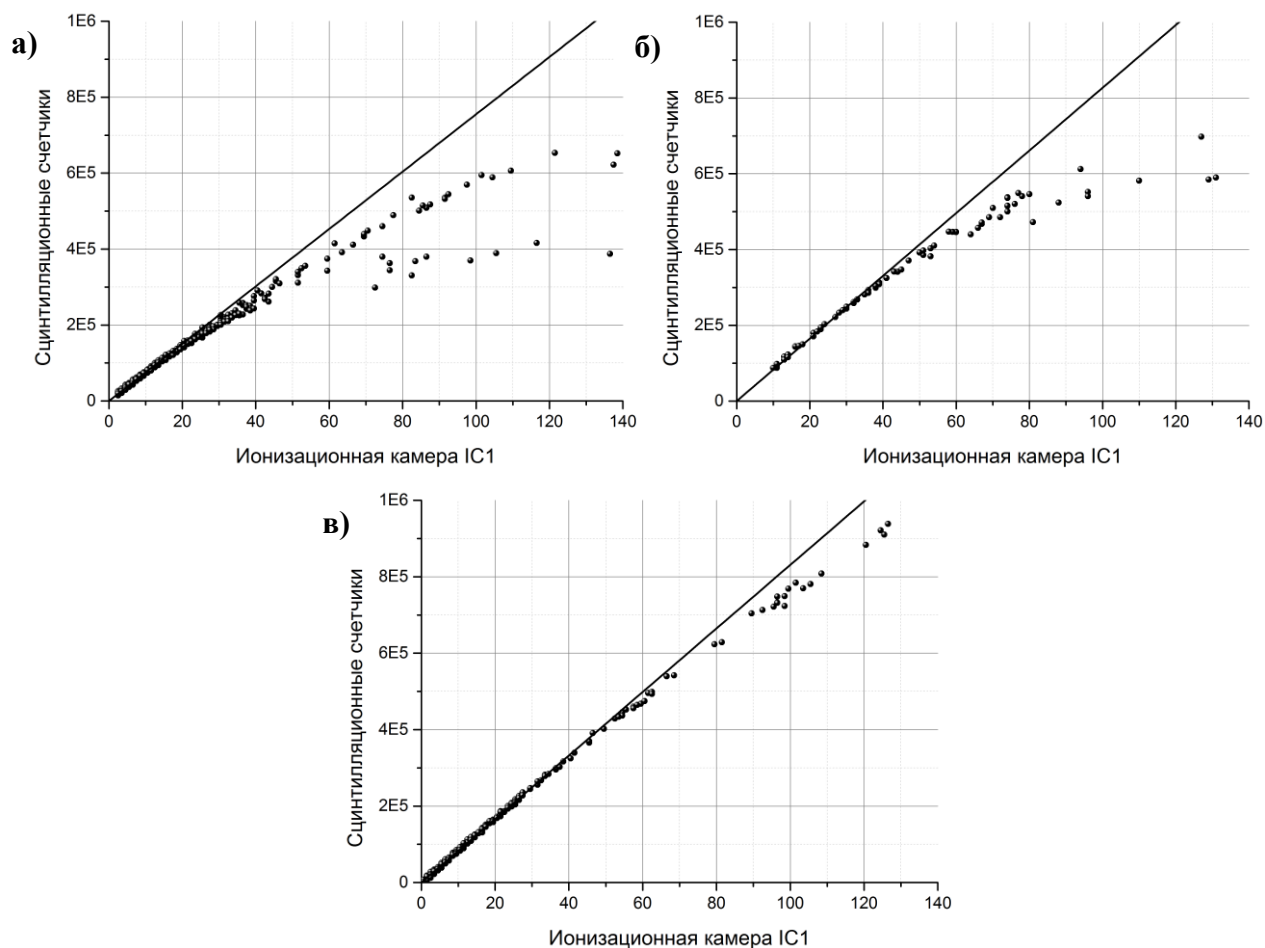


Рисунок 4.6 – Графики зависимости счета совпадения сцинтилляционных счетчиков (ось ординат) от числа отсчетов камеры IC1 (ось абсцисс) за один цикл вывода из ускорителя: (а) – углерод 1 ГэВ/нуклон; (б) – углерод 2 ГэВ/нуклон; (в) – углерод 4 ГэВ/нуклон. Точками на графиках обозначены экспериментальные данные; черная прямая обозначает линейную зависимость, полученную путем аппроксимации в линейной области.

Из приведенных данных получены коэффициенты K линейного преобразования числа отсчетов N камеры IC1 в интенсивность I выведенного пучка. Для энергии пучка углерода 1, 2 и 4 ГэВ/нуклон: $K_1 = 7600 \pm 600$; $K_2 = 8300 \pm 500$; $K_4 = 8300 \pm 400$.

Аналогичные измерения проведены на пучках ядер углерода с энергией 3,5 ГэВ/нуклон в 2015 г. Счетчики располагались как до, так и после ионизационных камер IC1 и IC2 с целью выявления влияния дополнительного вещества на пути пучка. Толщина используемых сцинтилляторов – 5 мм по пучку. При внесении 5 мм сцинтиллятора в пучок (углерод 3,5 ГэВ/нуклон) число отсчетов камер уменьшается на 2,3 %, что существенно меньше погрешности измерений (7 – 10 %). В результате калибровки получен коэффициент линейного преобразования $K_3 = 8600 \pm 400$ для пучка углерода с энергией 3,5 ГэВ/нуклон.

На рисунке 4.7 представлена теоретическая оценка коэффициента линейного преобразования камеры IC1 и полученные экспериментальные данные в зависимости от энергии пучка углерода.

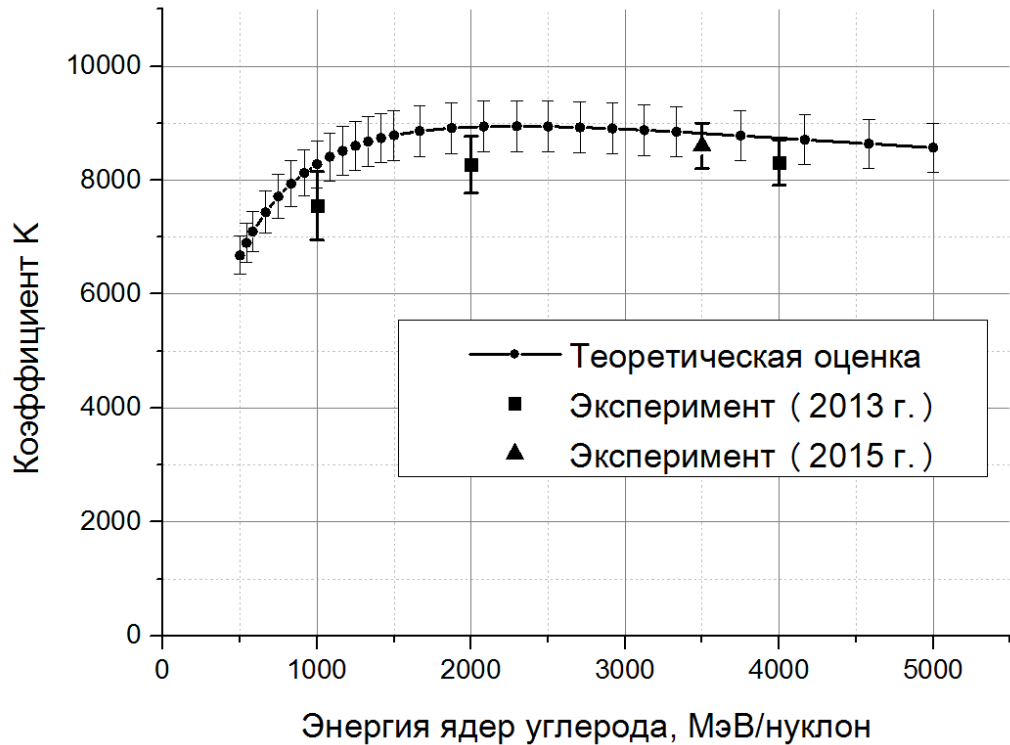


Рисунок 4.7 – График теоретической оценки коэффициента линейного преобразования K и экспериментальные данные калибровки ионизационной камеры IC1.

Для определения теоретической зависимости использовались следующие выражения. Число пар электрон-ион n определяется по формуле:

$$n = \frac{dE}{dx} \cdot \frac{d}{Ion}, \quad (4.1)$$

где dE/dx – ионизационные потери частицы пучка в газовом объеме камеры; d – толщина ионизационной камеры (активный зазор); Ion – энергия, затрачиваемая на образование одной электрон-ионной пары.

Учитывая, что один импульс с ионизационной камеры вырабатывается при образовании заряда 25 пКл, коэффициент линейного преобразования камеры K определяется по формуле:

$$K = \frac{25[\text{пКл}]}{n \cdot e[\text{пКл}]}, \quad (4.2)$$

где e – заряд электрона.

Из формул (4.1) и (4.2) выразим коэффициент линейного преобразования камеры K :

$$K = \frac{25[\text{пКл}] \cdot Ion[\text{эВ}]}{d[\text{мм}] \cdot e[\text{пКл}] \cdot \frac{dE}{dx} \left[\frac{\text{эВ}}{\text{мм}} \right]}. \quad (4.3)$$

Известно, что величина Ion слабо зависит от типа налетающей частицы [56]. На образование одной пары электрон-ион в газообразном аргоне требуется в среднем 26 эВ, а в воздухе – 35 эВ. Расчеты ионизационных потерь dE/dx для пучков углерода и дейтронов сделаны на основе программы «SRIM» [57]. Основной вклад в ошибку теоретической оценки, указанной на рисунке 4.7, привносят неопределенности в определении величины Ion (5 %) и расчет ионизационных потерь (4 %). Отметим, что теоретические оценки согласуются в пределах 10 % с экспериментально полученными результатами калибровки ионизационных камер.

Принимая во внимание, что во многих экспериментальных исследованиях с толстыми мишенями тонкие образцы активационных детекторов зачастую располагают на пути пучка перед мишенью, а также перед системами мониторинга пучка, оценим влияние данного фактора на точность мониторинга.

Для оценки влияния внесенного вещества на точность определения интенсивности пучка, падающего на мишень, был проведен ряд измерений с расположением поглотителей из оргстекла с толщинами 1 – 5 мм и свинца с толщинами 1 – 3 мм на пути пучка. Данные образцы поглотителей располагались между ионизационными камерами IC1 и IC2 (камера IC2 расположена в 20 см за камерой IC1 по пучку). На рисунке 4.8 показаны графики отношения показания камеры IC1 к камере IC2 в зависимости от толщины привнесенного поглотителя из свинца. Измерения проводились на пучках дейтронов и углерода с энергиями 2 ГэВ/нуклон (минимум ионизационных потерь).

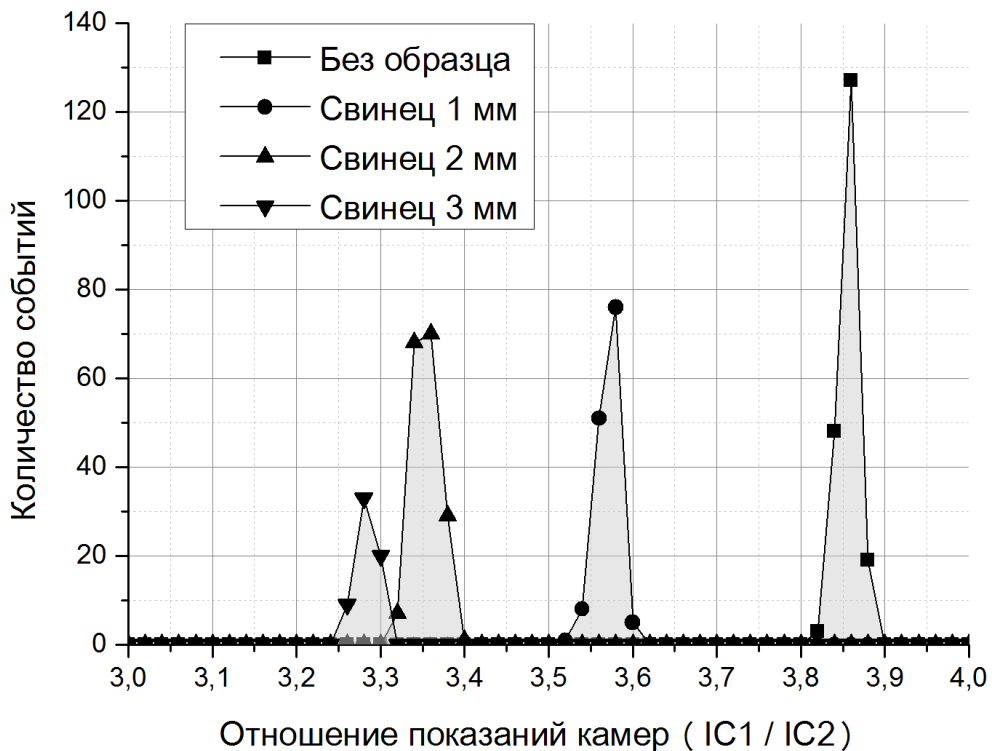


Рисунок 4.8 – Графики отношения показаний камеры IC1 к камере IC2 в зависимости от толщины привнесенного поглотителя из свинца.

Измерения показали, что при внесении 1 г/см^2 вещества (10 мм пластика или 1 мм свинца) в пучок с энергией 2 ГэВ/нуклон перед ионизационной камерой приводит к искажениям в измерении интенсивности пучка данной камерой на уровне 10 %. По-видимому, неконтролируемое внесение относительно тонких образцов в прямой пучок перед мишенью и системами мониторинга выведенного пучка привели к отклонениям в измерениях интенсивностей на основе активационной методики, о которых сказано выше.

Анализ интегральных интенсивностей облучения в последних 5-ти серий экспериментов с тяжелыми мишенями на выведенных пучках Нуклотрона (2013 – 2015 гг.) показал согласие между данными, полученными на основе активационного анализа и при помощи ионизационных камер, в пределах 10 %. Следует отметить, что относительные измерения интенсивностей, полученные при помощи всех описанных ионизационных детекторов, согласуются между собой в пределах 5 % для экспериментов на пучках дейтронов и углерода в диапазоне энергий 0,5 – 4 ГэВ/нуклон. Поскольку ионизационные детекторы работали в процессе проведения экспериментов «Энергия+Трансмутация», начиная с 2011 г., а альтернативные активационному методу абсолютные калибровки были проведены позже (2013 – 2015 гг.), описанные в данной работе результаты позволили уточнить интегральные интенсивности облучений в более ранних экспериментах, что не повлияло на точность измерений интегральной интенсивности облучений для разных энергий выведенных пучков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен цикл работ по разработке, созданию, пучковым испытаниям и вводу в эксплуатацию систем диагностики и мониторинга циркулирующих и выведенных пучков Нуклотрона.

Диагностика циркулирующего пучка

Результаты работы созданной системы на основе МКП для контроля относительной интенсивности и пространственно-временных характеристик циркулирующих пучков Нуклотрона опубликованы в [51]. Показано, что детектор работает в диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^8 однозарядных ионов циркулирующих внутри вакуумной камеры ускорителя. Запирающий сетчатый электрод позволяет расширить рабочий диапазон по интенсивностям до 10^9 однозарядных ионов. Временное разрешение созданной системы с учетом пространственных характеристик пучков Нуклотрона составляет ~ 20 нс; пространственное разрешение – 3 мм. При этом положение центра тяжести пучка удается определять с точностью 1 мм, в предположении того, что пучок имеет Гауссово распределение. Чувствительная область детектора – 90 мм. Разработанное ПО, позволяет дистанционно управлять параметрами детектора и представлять цифровую и графическую информацию на пульт ускорителя в режиме on-line, в виде удобном для оператора.

Системы диагностики на основе МКП испытана в пяти сеансах Нуклотрона при работе на пучках дейтронов, альфа частиц, ядер углерода и ионов аргона.

Показана возможность использования детектора для оптимизации начального этапа ускорения пучка на первых оборотах от момента инжекции, что особенно важно для настройки ускорения низкоинтенсивных пучков тяжелых ионов.

Детектор показал свою надежность и работоспособность при длительной эксплуатации, начиная с 2012 г.

Созданная система в настоящее время используется для настройки режимов ускорения и вывода пучков Нуклотрона.

Облучательный стенд для прикладных исследований

Результаты испытания созданного прототипа ОС для прикладных исследований на ускорительном комплексе Нуклотрон проведены в 2013 – 2014 гг. и опубликованы в работе [45]. В процессе испытания проведены измерения и контроль параметров выведенных пучков дейтронов, ионов лития, углерода и аргона с энергиями 500 – 2000 МэВ/нуклон в широком диапазоне интенсивностей 10^1 – 10^{10} ионов в секунду. Показана возможность использования СП для облучения объектов испытаний с однородностью не хуже 10 % на площади размером

200×200 мм². При дополнительном использовании коллиматоров и модернизации ПО СП облучательного стенда имеется возможность развития стенда для получения «тонких» (1×1 мм²) пучков, позволяющих прецизионно исследовать заданные области облучаемых образцов.

На ОС отработана методика калибровки детекторов системы мониторинга пучков при помощи ионизационных камер и ядерных фотоэмульсий. Успешно апробирована система измерения профиля пучка на основе сцинтилляционного годоскопа с разрешением 3 мм для определения положения центра тяжести пучка относительно исследуемых образцов с точностью 1 мм.

На основе проведенных работ с пучком Ar^{18+} 500 МэВ/нуклон разработана методика облучений образцов и показана возможность изучения единичных эффектов воздействия ионов на функционирование элементов и узлов изделий электронной техники.

Для мониторинга выведенных пучков тяжелых ионов перспективным направлением может быть неразрушающий метод диагностики пучка в вакуумной камере на основе МКП. Наш опыт создания и эксплуатации такого детектора на циркулирующем пучке Нуклотрона показал возможность использования МКП и на выведенных пучках тяжелых ионов с интенсивностями не менее 10^5 ионов в секунду. Перспективная разработка новых детекторов на основе МКП для диагностики выведенных пучков позволит свести к минимуму количество вещества на пути пучка.

Диагностика выведенного пучка для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация»

Результаты работы созданной системы мониторинга выведенных пучков Нуклотрона для экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация» опубликованы в [46]. Система использовалась для измерения и контроля параметров выведенных пучков дейтронов и ядер углерода в диапазоне энергий 1 – 4 ГэВ/нуклон в диапазоне интенсивностей от 10^5 до 10^{10} ионов в секунду.

Показано, что относительные ошибки измерений интенсивности пучка между независимыми детекторами ионизационного типа системы мониторинга экспериментов коллаборации «Энергия+Трансмутация» согласуются в пределах 5 %.

Предложен и апробирован метод мониторинга пучков на основе секционированных проволочных ионизационных камер, позволяющий одновременное измерение интенсивности и контроля пространственно-временных характеристик пучка, с использованием минимального числа каналов регистрации. Данный метод позволяет определять отклонение положения центра тяжести пучка с точностью ~ 0,5 мм.

Для коллаборации «Энергия+Трансмутация» на пучках ядер углерода с энергиями от 1 до 4 ГэВ/нуклон проведена абсолютная калибровка ионизационных камер для измерения интенсивности пучка с точность 7 – 10 %.

Проведен анализ факторов, влияющих на ошибки измерений интенсивности при помощи активационной методики с учетом данных, полученных при помощи созданных ионизационных детекторов. Данная работа позволила согласовать и уточнить результаты измерений интегральной интенсивности в серии экспериментов по облучению тяжелой урановой мишени «КВИНТА» в 2011 – 2015 гг.

Созданная система мониторинга выведенных пучков на основе ионизационных камер и сцинтилляционных счетчиков принята коллаборацией «Энергия+Трансмутация» в эксплуатацию.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

А.1 Оценка времени дрейфа ионов остаточного газа в вакуумной камере Нуклотрона в месте расположения МКП-детектора

Оценим время дрейфа ионов остаточного газа от момента ионизации до попадания на поверхность МКП детектора. Окно детектора для прохождения пучка можно считать зазором с однородным электрическим полем. Запишем уравнения для нахождения силы F , действующей на заряд q в электрическом поле E :

$$F = q \cdot E, \quad (\text{A.1})$$

$$E = \Delta\varphi/d, \quad (\text{A.2})$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов ускоряющего зазора детектора;

d – ширина ускоряющего зазора детектора.

Из формул (A.1) и (A.2) выразим силу F :

$$F = \frac{q \cdot \Delta\varphi}{d}. \quad (\text{A.3})$$

Запишем уравнения для нахождения времени t дрейфа иона до поверхности МКП:

$$F = m \cdot a, \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{d}{2} = \frac{a \cdot t^2}{2}, \quad (\text{A.5})$$

где m – масса иона;

a – ускорение иона под действием силы F ;

$d/2$ – расстояние дрейфа иона от места ионизации до поверхности МКП, в предположении того, что пучок проходит через центр окна детектора.

Из формул (A.3), (A.4) и (A.5) время дрейфа t :

$$t = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right) \cdot \frac{2m \cdot d}{q \cdot \Delta\varphi}}. \quad (\text{A.6})$$

Временное разрешение детектора будет определяться шириной пучка w , так как образовавшиеся ионы в начальный момент после ионизации будут находиться на разных

расстояниях от регистрирующей поверхности МКП. В момент инжекции в кольцо ускорителя пучок заполняет практически все пространство вакуумной камеры и в процессе ускорения сжимается до размеров порядка миллиметра. Для определения величины неопределенности момента регистрации иона перепишем формулу (А.6) с учетом ширины пучка:

$$t = \sqrt{(d \pm w) \cdot \frac{m \cdot d}{q \cdot \Delta\varphi}}. \quad (\text{А.7})$$

Принимая, что большинство образовавшихся ионов будут иметь единичный положительный заряд $q = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ Кл и массу иона $m = A \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27}$ кг, где A – массовое число иона, получим:

$$t = 1,018 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{(d \pm w) \cdot \frac{A \cdot d}{\Delta\varphi}}. \quad (\text{А.8})$$

В таблице А.1 приведено процентное соотношение молекул остаточного газа в месте расположения детектора, а также рассчитанные по формуле (А.8) величины времени t дрейфа однозарядных молекул остаточного газа и разброс по времени дрейфа. При этом разность потенциалов $\Delta\varphi$ ускоряющего зазора принимаем равной 3,5 кВ, ширину зазора d – 6 см и ширину пучка w равной 3 см для момента инжекции и 0,3 см для ускоренного пучка.

Таблица А.1 – Состав остаточного газа на «теплом» участке Нуклотрона и время дрейфа однозарядных молекул остаточного газа до поверхности МКП детектора.

Молекула остаточного газа	Процентное содержание, %	Время дрейфа, нс	Разброс времени дрейфа (инж./ускор.), ± нс
H ₂ O	62	440	110 / 11
N ₂	20	545	140 / 14
H ₂	11	145	40 / 4

Следует отметить, что полученные величины времени дрейфа молекул до поверхности МКП детектора сравнимы с временем обращения ускоренного пучка в кольце Нуклотрона (один оборот – 885 нс при энергии 2 ГэВ/нуклон). Учитывая, что в кольце Нуклотрона циркулирует пять сгустков ускоряемых частиц (банчей), время между банчами составит 180 нс, что меньше времени дрейфа однозарядных молекул воды и азота и сравнимо с временем дрейфа иона молекулы водорода. Время одного оборота пучка при энергии инжекции 5 МэВ/нуклон составляет 8,2 мкс.

А.2 Расчет поправочной функции для определения относительной интенсивности циркулирующего пучка

Точность измерения абсолютной интенсивности пучка при помощи ионизационного детектора определяется точностью измерения вакуума в месте установки детектора, которая, как правило, составляет порядка 50 %. Для определения относительной интенсивности пучка давление в вакуумной камере ускорителя в течение цикла ускорения можно считать постоянным. В данном случае, точность измерения относительной интенсивности будет определяться ионизационными потерями пучка на остаточном газе, которые в свою очередь зависят от энергии пучка и состава остаточного газа.

Рост магнитного поля в Нуклотроне происходит линейно со временем, при этом нелинейно увеличивается энергия ускоряемых частиц и их частота обращения в кольце ускорителя. Принимаем, что число образованных электрон-ионных пар N при взаимодействии пучка с остаточным газом (число зарегистрированных детектором отсчетов) пропорционально интенсивности пучка, частоте обращения ν пучка в кольце ускорителя и ионизационным потерям dT/dx для заданного момента ускорения. При этом частота обращения и ионизационные потери являются функциями от скорости V частицы (либо от кинетической энергии T частицы), которая в свою очередь определяется магнитным полем B ускорителя. Таким образом, относительная интенсивность I пучка в течение цикла ускорения определяется счетом N с детектора, умноженным на некоторую поправочную функцию $Corr$ от магнитного поля ускорителя:

$$I = N \cdot Corr(B). \quad (A.9)$$

При этом функция $Corr$ обратно пропорциональна частоте обращения пучка и ионизационным потерям:

$$Corr(B) \propto \left(\nu \cdot \frac{dT}{dx} \right)^{-1}. \quad (A.10)$$

Частота обращения растет с увеличением магнитного поля ускорителя и имеет плато при достижении ускоряемыми частицами скорости света. В тоже время ионизационные потери пучка имеют минимум при энергии около 2,5 ГэВ/нуклон. Следовательно, поправочная функция $Corr$ будет иметь максимум. Удобно поправочную функцию нормировать на единицу в точке максимума.

Запишем известную формулу связи импульса релятивистской частицы с величиной магнитного поля B и эффективным радиусом кривизны поворотных магнитов ρ синхротрона:

$$\beta\gamma m = Zc\rho B, \quad (\text{A.11})$$

где β и γ – релятивистские факторы;

m – масса, ускоряемой частицы.

Из формулы (A.11) выразим зависимость факторов β и γ от магнитного поля:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{Zc\rho B}\right)^2 + 1}}, \quad (\text{A.12})$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{Zc\rho B}{m}\right)^2 + 1}. \quad (\text{A.13})$$

Кинетическая энергия T частицы определяется выражением:

$$T = m(\gamma - 1). \quad (\text{A.14})$$

В соответствии с формулами (A.13) и (A.14) на рисунке A.1 построены графики энергии T ускоряемых в Нуклотроне ионов с массой m и зарядовым числом Z в зависимости от величины магнитного поля B ускорителя. Эффективный радиус кривизны ρ поворотных магнитов Нуклотрона равен 22 м. Так как дейтроны, альфа частицы и ядра углерода имеют одинаковое отношение A/Z , их кривые совпадают.

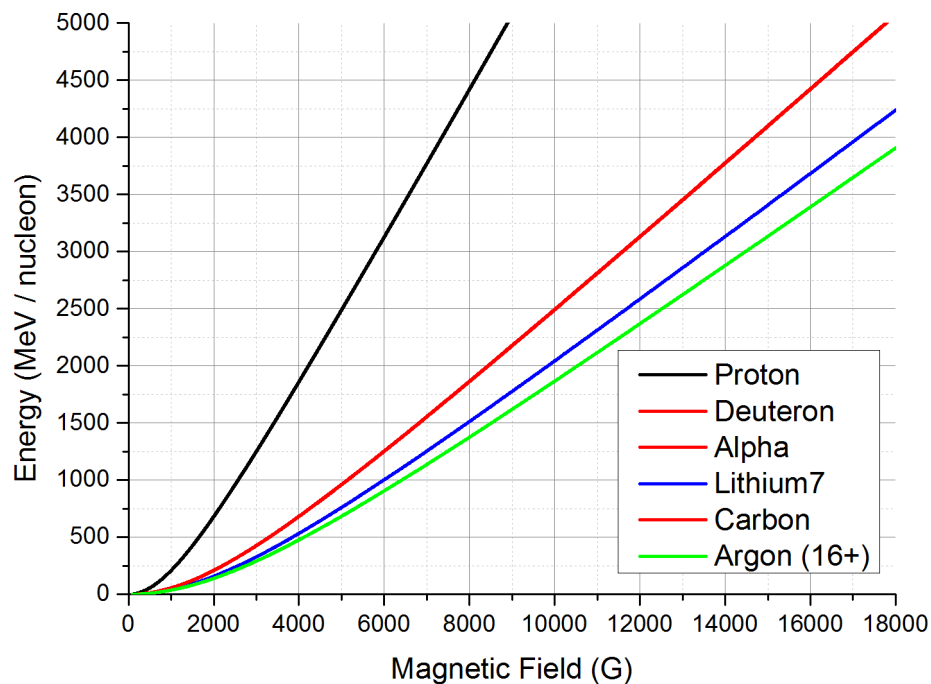


Рисунок A.1 – Зависимость энергии ионов, ускоряемых в Нуклотроне, от величины магнитного поля ускорителя. Кривые для дейтронов, альфа частиц и ядер углерода совпадают.

Частота обращения ν ускоряемых ионов связана с длиной орбиты L ускорителя соотношением:

$$\nu = \frac{\beta c}{L}. \quad (\text{A.15})$$

Принимая, что длина орбиты L Нуклотрона равна 251,5 м, на рисунке А.2 представлены зависимости частоты обращения ν ионов от величины магнитного поля B ускорителя.

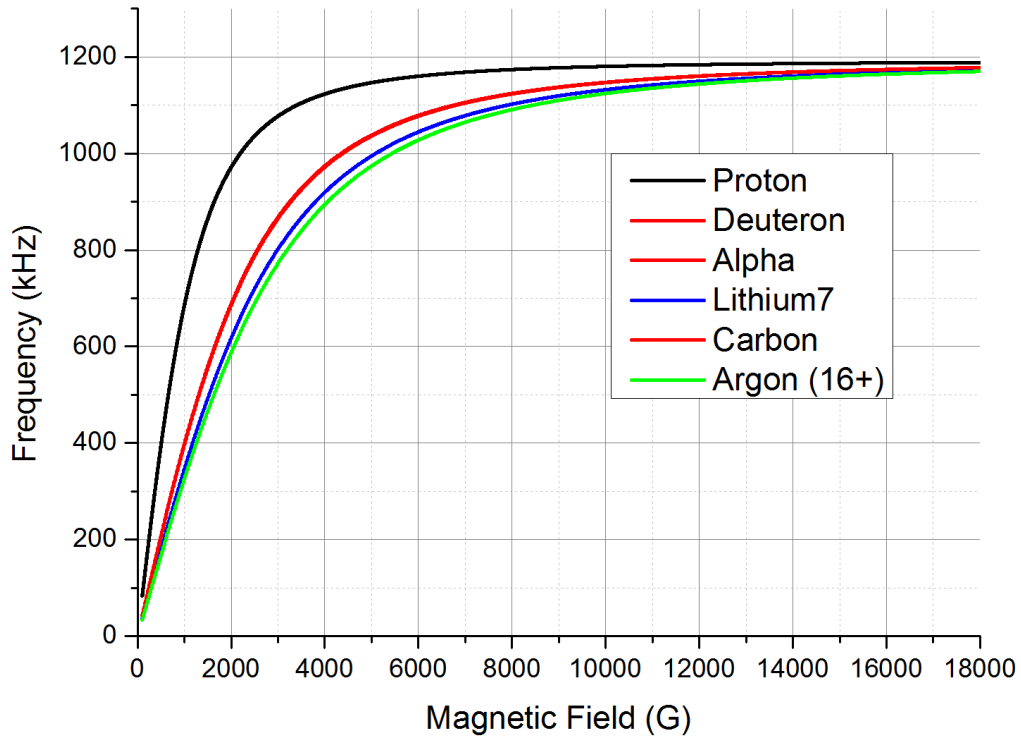


Рисунок А.2 – Зависимость частоты обращения ионов в кольце Нуклотрона от величины магнитного поля ускорителя. Кривые для дейтронов, альфа частиц и ядер углерода совпадают.

Для определения величины ионизационных потерь dT/dx ускоряемых частиц используем известную формулу Бете-Блоха:

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n_e Z^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I_0(1-\beta^2)} - \beta^2 \right], \quad (\text{A.16})$$

где x – путь, пройденный заряженной частицей в веществе;

m_e – масса электрона;

n_e – плотность электронов в среде;

I_0 – средний потенциал ионизации атомов поглощающего вещества.

При вычислении относительной интенсивности I пучка параметры среды (состав и давление газа в вакуумной камере ускорителя) будем считать постоянными:

$$\frac{dT}{dx} = Const \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I_0(1 - \beta^2)} - \beta^2 \right], \quad (A.17)$$

где величина $Const$ включает в себя константы и величины, принятые неизменными в течение цикла ускорения.

Из формулы (A.17) следует, что удельные ионизационные потери dT/dx зависят от среднего потенциала ионизации I_0 остаточного газа, состав которого указан в таблице А.1. Средний потенциал ионизации паров воды I_{H_2O} равен ~ 72 эВ; для молекул азота $I_{N_2} \sim 82$ эВ; для молекулярного водорода $I_{H_2} \sim 19$ эВ [58,59].

Для вычислений будем использовать функцию удельных ионизационных потерь, усредненную в соответствии с процентным содержанием остаточного газа на «теплом» участке Нуклотрона:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{mean} = 0,62 \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_{H_2O} + 0,20 \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_{N_2} + 0,11 \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_{H_2}. \quad (A.18)$$

Из формул (A.17) и (A.18) следует:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{mean} = Const \cdot \frac{0,93}{\beta^2} \cdot \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I_{mean}(1 - \beta^2)} - \beta^2 \right], \quad (A.19)$$

где коэффициент $0,93 = 0,62 + 0,20 + 0,11$;

величина I_{mean} вычисляется как:

$$I_{mean} = I_{H_2O}^{0,93} \cdot I_{N_2}^{0,20} \cdot I_{H_2}^{0,11}. \quad (A.20)$$

В соответствии с формулами (A.12), (A.19) и (A.20) на рисунке А.3 построены графики удельных ионизационных потерь ионов dT/dx (в относительных единицах) на «теплом» участке Нуклотрона в зависимости от величины магнитного поля B ускорителя.

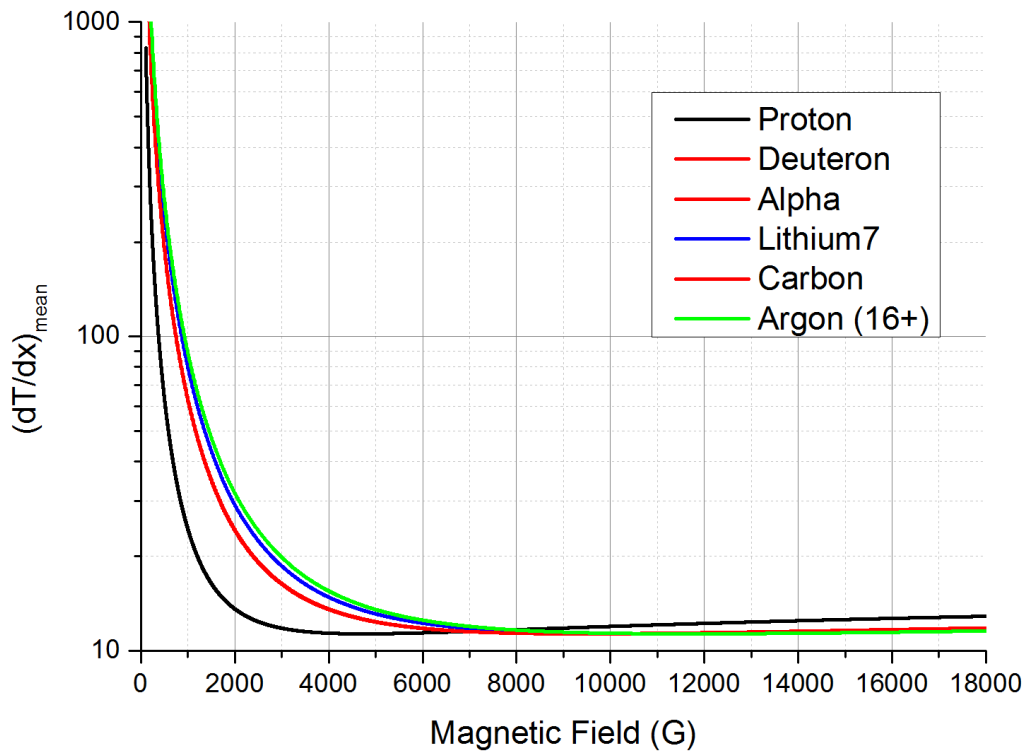


Рисунок А.3 – Зависимость удельных ионизационных потерь ионов (в относительных единицах) на «теплом» участке Нуклотрона от величины магнитного поля ускорителя. Кривые для дейтронов, альфа частиц и ядер углерода совпадают.

С учетом (А.10), (А.15) и (А.19) удобно завязать общий фактор коррекции, учитывающий частоту обращения и ионизационные потери в виде:

$$Corr(\beta) = \beta / \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I_{mean}(1 - \beta^2)} - \beta^2 \right]. \quad (A.21)$$

На рисунке А.4 построены графики поправочной функции $Corr$ в зависимости от величины магнитного поля B ускорителя, нормированные в максимуме на единицу.

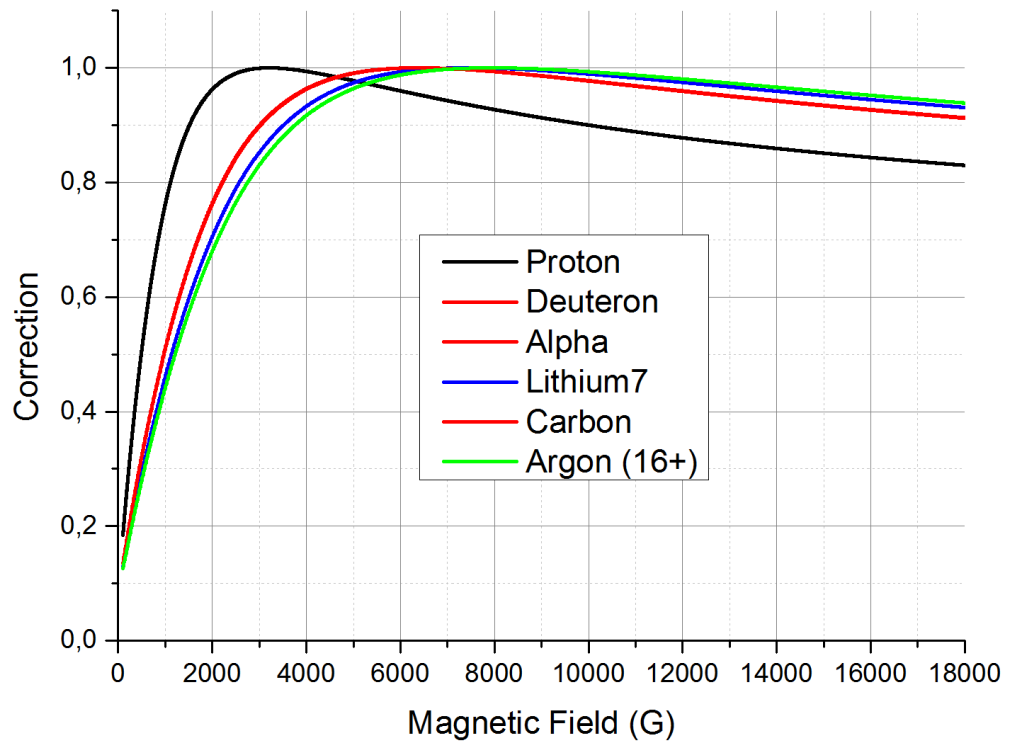


Рисунок А.4 – Нормированные графики поправочной функции для расчета относительной интенсивности циркулирующего пучка Нуклотрона. Кривые для дейтронов, альфа частиц и ядер углерода совпадают.

Данные зависимости были использованы при определении относительной интенсивности циркулирующего пучка в процессе ускорения и вывода пучка из ускорителя (см. главу 2).

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. Сообщ. ОИЯИ Р9-2011-72. Дубна, 2011. 15 с.
3. *Knoll G.* Radiation Detection and Measurement. JohnWiley & Sons. New York, 1989.
4. *Srouf J.R.* Radiation Effects on Microelectronic in Space // Proc. of Conf. «IEEE». 1988. V. 76. P. 1443-1469.
5. *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.
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. *Wagner V. et al. (E+T Collab.)* Studies of deuteron and neutron cross-sections important for ADS research // Proceedings of Science (Baldin ISHEPP XXI). Dubna, 2012.
8. *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.
9. *McGinnis D.P.* The Design of Beam Pickup and Kickers. Vancouver. B.C. Canada: s.n., 1994, Vol. 333, pp. 64-77. BIW-94.
10. *Webber R.C.* Tutorial on Beam Current Monitoring // Fermilab Conf. June 2000.
11. *Thurman-Keup R. et al.* Synchrotron radiation based beam diagnostics at the Fermilab Tevatron // Fermi National Accelerator Laboratory, USA.
12. *Forck P. et al.* Profile monitors based on residual gas interaction. // Proceedings of DIPAC, 2005. www.jacow.org
13. *Witthaus M. et al.* SEM-Grid Prototype Electronics Using Charge-Frequency-Converters // Proceedings of DIPAC, 2011. www.jacow.org
14. *Грунтман М.А.* Координатно-чувствительные детекторы на основе микроканальных пластин (обзор) // ПТЭ. 1984. № 1. С. 14-29.

15. *Yu. G. Teterev, G. Kaminski, Phi Thanh Huong, E. Kozik.* Ionization Beam Profile Monitor for Operation Under Hard Environmental Conditions. // Nuclear Physics and Atomic Energy, 2011, v. 12, No. 1, p. 98-103.
16. *Dietrich J., Boehme C., Weis T. et al.* Beam profile measurements based on light radiation of atoms excited by the particle beam // Proc. of PAC07. Albuquerque, New Mexico, 2007. P. 3955 – 3957.
17. *Hashimoto Y. et al.* Development of a Beam Profile Monitor Using a Nitrogenmolecular Jet for the J-PARC MR // Proceedings of IBIC 2013, Oxford, UK. www.jacow.org
18. *Price M. T., Blair G. A., Boorman G. et al.* Beam profile measurements with the 2-D laser-wire at petra // Proc. of PAC07. Albuquerque, New Mexico, 2007. P. 4303 – 4305.
19. *Shintake, T.* Beam Profile Monitors for Very Small Transverse and Longitudinal Dimensions Using Laser Interferometer and Heterodyne Technique, s.l. : American Institute of Physics, 1997. pp. 130-151. Vol. 390.
20. *Giacomini T. et al.* Development of a residual gas profile monitors at GSI // Proc. BIW04, Knoxville, Tennessee May 3-6, 2004
21. *Forck P. et al.* Advanced residual gas profile monitor for high current synchrotrons and cooler rings. // Proceedings of DIPAC, 2003. www.jacow.org
22. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кэбин Э.И.* Частицы и ядра. Эксперимент. М.: Издательство МГУ, 2005.
23. *Москалев В.А., Сергеев Г.И.* Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 101-105.
24. *Liakin D. et al.* Current status of the advanced residual gas monitor for heavy ion synchrotron applications // Proceedings of DIPAC, 2005. www.jacow.org
25. *Quinteros, T. et al.* A novel beam-profile monitor for storage rings // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1993, vol. 333, p. 288.
26. *Quinteros, T., DeWitt, D.R., Paal, A., Schuch, R.* Three-dimensional ion beam-profile monitor for storage rings // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1996, vol. 378, p. 35.
27. *Reinhardt-Nickoulin P., Gavrilov S., Feschenko A., Vasilyev I.* Beam Cross Section Monitor for INR Linac // Proceedings of LINAC2010, Tsukuba, Japan. www.jacow.org
28. *Reinhardt-Nickoulin P. et al.* Beam Parameters Measurements by Ionization Cross Section Monitor on Proton Linac of INR RAS // Proceedings of DIPAC2011, Hamburg, Germany. www.jacow.org
29. *Reinhardt-Nickoulin P., Gavrilov S., Feschenko A., Vasilyev I.* Analysis of Measurement Errors of INR Linac Ionization Beam Cross Section Monitor // Proceedings of IBIC2013, Oxford, UK. www.jacow.org

30. *Connolly R. et al.* Residual-gas-ionization beam profile monitors in RHIC. // Proceedings of BIW, 2010. www.jacow.org
31. *Forck P., Dorn C.* Measurements with a Novel Non-Intercepting Bunch Shape Monitor at the High Current GSI-LINAC // Proceedings of DIPAC, 2005. www.jacow.org
32. *Dietrich J., Kamerzhiev V., Rukhlyada N.* An Ionization Beam-Profile Monitor for the Cooler Proton Synchrotron COSY // Instruments and experimental techniques, 2003, v. 46(5), p. 581-586.
33. *Feofilov G.A. et al.* Position-sensitive MCP-based detectors with high timing resolution: some results and perspectives // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 402-407.
34. *Böhme C., Kamerzhiev V., Forck P. et al.* Beam test of the FAIR IPM prototype in COSY. // Proceedings of DIPAC, 2009. www.jacow.org
35. *Barnes P. G. et al.* A micro-channel plate based gas ionization profile monitor with shaping field electrodes for the ISIS H- injector. // Proceedings of IPAC, 2011. www.jacow.org
36. *Смирнов А.А., Коваленко А.Д.* Нуклотрон – сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа и развитие) // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т.1. № 6(123). С. 11-40.
37. *Бутенко А.В.* Ускорение пучков тяжелых ионов с массовым числом более 100 в сверхпроводящем синхротроне Нуклотрон // дис. ... канд. техн. наук: 01.04.20. Дубна, ОИЯИ, 2012. 101 с.
38. *Аверичев А.С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов Нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010. 16 с.
39. *Аверичев А.С. и др.* Итоги 44-го и 45-го сеансов Нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2012-108. Дубна, 2012. 41 с.
40. *Балдин А.А. и др.* Система диагностики циркулирующего пучка Нуклотрона на основе микроканальных пластин // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1997. № 2[82]. С. 15-22.
41. *Gorbachev E.V. et al.* Upgrade of the Nuclotron injection control and diagnostics system // Proc. of ICALEPCS2013. San Francisco, CA, USA, 2013. P. 1176-1179. accelconf.web.cern.ch
42. *Gorbachev E.V., Sedykh G.S.* The equipment database for the control system of the NICA accelerator complex // Proc. of ICALEPCS2013. San Francisco, CA, USA, 2013. P. 1111-1113. accelconf.web.cern.ch
43. *Baldin A.A. et al.* Some results of MCP timing resolution measurements with minimum ionizing particles // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1994. № 2[65]. С.33-39.
44. *Baldin A.A. et al.* Proposals for a new type of microchannel-plate-based vertex detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 323. P. 439-444.

45. *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. 2015 (принято к публикации).
46. *Балдин А.А., Берлев А.И., Васильев С.Е., Вишнеvский 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. 2015 (принято к публикации).
47. *Анашин В.С.* Метод контроля дозовой стойкости элементов телекоммуникационных систем к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // Технологии ЭМС. 2007. № 3(27). С. 55-60.
48. *Грачев Н.Н., Мырова Л.О.* Защита человека от опасных излучений. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005. 317 с.
49. *Красавин Е.А. и др.* Генетическое действие излучений с разными физическими характеристиками на клетки человека и млекопитающих // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35. ВЫП. 6. С. 1484-1511.
50. *Тимошенко Г.Н., Бамблевский В.П.* Физические аспекты радиобиологических экспериментов на пучках релятивистских ядер Нуклотрона. Препринт ОИЯИ Р16-2003-62. Дубна, 2003. 10 с.
51. *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.
52. *Ritt S.* Design and Performance of the 6 GHz Waveform Digitizing Chip DRS4 // Proc. of Conf. «IEEE/NSS». Dresden, 2008.
53. *Герасимов А.С., Киселев Г.В.* Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32. ВЫП. 1. С. 143-188.
54. *Балдин А.А., Балдина, Э.Г.* Динамический контроль и оптимизация процесса облучения трековых мембран // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 9-10. С. 54-62.
55. *Васильев С.Е., Вишнеvский А.В., Кадыков М.Г., Маканькин А.М., Тютюнников С.И., Шурыгин А.А.* Разработка системы мониторинга формы, положения и интенсивности выведенного пучка релятивистских ионов ускорительного комплекса Нуклотрон-М ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11. № 6(190). С. 1215-1225.
56. *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles* // Report 49 of the International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, MD, USA, 1993.
57. *Ziegler James F.* The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, 1985. 321 p.

58. *Inokuti M., Turner J.* Mean excitation energies for stopping power as derived from oscillator-strength distributions // Argonne National Laboratory, Argonne, 1978.
59. *Hsu R.* Mean Excitation Energy of the Elements for Proton Penetration in Matter // National Taiwan Normal University, 1978.