

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики»
Национального исследовательского центра
«Курчатовский Институт»

На правах рукописи

Канцырев Алексей Викторович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ПРОТОННОМ
МИКРОСКОПЕ В ИТЭФ

Специальность

01.04.01. - Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук
Голубев А.А.

Москва 2014 год

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Метод протонной радиографии	16
Глава 2. Экспериментальная установка	28
2.1 Ускоритель ТВН-ИТЭФ	28
2.2 Линия транспортировки пучка	30
2.3 Протонный микроскоп ПУМА	31
2.3.1 Квадрупольные линзы на постоянных магнитах	36
2.3.2 Многокадровая система регистрации изображений	38
2.3.3 Взрывозащитная вакуумная камера	44
2.3.4 Лазерный интерферометр VISAR	45
2.4 Параметры установки ПУМА	52
Глава 3. Автоматизация управления установкой, сбора и обработки экспериментальных данных	55
3.1 Комплексная система автоматизации экспериментов	55
3.1.1 Аппаратно программные модули	58
3.1.2 Подсистема радиационной безопасности	77
3.1.3 Подсистема контроля и управления магнитными элементами линии транспортировки пучка и диагностики пучка	81
3.1.4 Сервер экспериментальных данных КСА	86
3.1.5 Подсистема контроля и управления экспериментом	87
3.2 Методика автофокусировки протонно-радиографических изображений	89
Глава 4. Экспериментальные результаты	92
4.1 Исследование динамических процессов методом протонной радиографии	92
4.1.1 Исследование детонационных волн в прессованном ТНТ	92
4.1.2 Исследование динамических процессов в эмульсионном ВВ	95
4.1.3. Ударно-волновые процессы в газовых мишенях	98
4.1.4. Исследование процессов струеобразования при ударном нагружении металлических образцов	102
4.2. Исследование статических объектов	105
4.2.1. Протонно-радиографическая дефектоскопия и томография статических объектов	105
4.2.2. Исследования биологических объектов	108
Глава 5. Обсуждение результатов	112
Заключение	119
Приложение А - Схема установки ПУМА	122
Список литературы	123

Введение

Исследования по физике высокой плотности энергии в веществе при интенсивном импульсном воздействии необходимы для получения новых знаний о физических процессах и свойствах материалов в условиях сверхвысоких давлений, плотностей и температур. Эти сведения составляют научную основу перспективных энергетических проектов – управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием горячей плазмы, магнито-гидродинамических и магнито-кумулятивных генераторов, ядерных космических установок и т.п. [1,2]. Кроме того, эти знания применяются в интересах совершенствования свойств материалов ядерно-энергетических установок, находящихся под действием мощных потоков излучений, для разработки новых технологий энергетического применения.

Физика высокой плотности энергии охватывает большую область науки, включая физику плазмы, физику конденсированного состояния и материаловедения, атомную и молекулярную физику, магнитогидродинамику и астрофизику. Различаются две области параметров вещества с высокой плотностью энергии: область высокотемпературной плазмы (температура более 100 эВ) и область сравнительно малых температур (1 эВ) при высоких значениях плотности вещества (около нормальной плотности твердого тела $>10^{23}$ см⁻³). Существенно, что вторая область параметров вещества труднодостижима с помощью иных методов, за исключением экспериментов с химическими взрывчатыми веществами (ВВ) и ядерных взрывов. Однако именно эти параметры реализуются в экспериментах с интенсивными пучками тяжелых ионов на современных мощных ускорителях. Интенсивные пучки тяжелых ионов высокой энергии являются уникальным инструментом для создания материи с высокой плотностью энергии и исследованиях экстремального состояния вещества в воспроизводимых

экспериментальных условиях [1]. В настоящее время в мире функционируют две тяжелоионные ускорительные установки – SIS-18 в GSI [3] (Gesellschaft für Schwerionenforschung, Дармштадт, Германия) и ТВН-ИТЭФ [2] (ТерраВатный Накопитель в ИТЭФ), строится новая установка FAIR [3] (an international Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия), на которых разворачиваются и планируются крупные экспериментальные программы по широкому кругу фундаментальных и прикладных задач. Так, пучки тяжелых ионов от ускорителя SIS-18 уже сейчас способны обеспечивать уровень удельного энерговложения более 1 кДж/г, а строящийся ускоритель SIS-100 проекта FAIR позволит достичь энерговложения 100 кДж/г.

Крайне важной задачей, при исследованиях в области физики высокой плотности энергии в веществе, является измерение, с пространственным разрешением, плотности и давления вещества. Для таких исследований, в случае генерации экстремального состояния вещества под воздействием тяжелоионного пучка [4], где характерный размер мишеней составляет 0.1-20 мм, требуется измерять распределение плотности с микронным пространственным разрешением при массовой толщине ~ 20 г/см².

Большинство существующих в настоящий момент экспериментальных методик не позволяют получать прямую информацию о плотности и микроструктуре вещества, непосредственно в ходе динамического эксперимента. Такие возможности предоставляет радиографическое исследование с использованием высокоэнергетических пучков заряженных частиц (в том числе протонов) [5,6] либо рентгеновского излучения [7]. Радиография, как способ просвечивания образцов, непрозрачных для видимого света, с целью изучения их внутренней структуры, существует со времени открытия рентгеновских лучей, которые используются благодаря их высокой проникающей способности по отношению к видимому излучению (рентгеновское

излучение фотонов с энергией от 0.1 до 10 МэВ). Успех радиографии обусловлен возможностью измерения флуктуаций плотности внутри исследуемых образцов и обнаружения в них дефектов, не разрушая их. В общем случае технология радиографии предполагает наличие трех элементов – источника проникающего излучения (или излучателя), детектора и исследуемого образца, который располагается между ними. В качестве излучателя чаще всего применяется рентгеновская трубка либо ускоритель заряженных частиц, электронов, протонов и ионов. Выбор источника и детектора определяется свойствами изучаемого образца – геометрическими размерами, химическим составом и плотностью, а также предполагаемым различием в свойствах образца. Несмотря на невысокую цену классических рентгенографических установок, классическая рентгенография не позволяет изучать плотные динамические объекты (массовая толщина >20 г/см²), так как не обладает достаточной проникающей способностью и пространственным разрешением. При взаимодействии рентгеновского излучения с веществом можно выделить три основных физических процесса, ведущих к изменению интенсивности излучения: при энергии фотонов рентгеновского излучения <1 МэВ преобладает фотоэлектрический эффект, при энергиях ~ 1 МэВ основной вклад в рассеяние рентгеновских лучей вносит эффект Комптона, при энергиях >1 МэВ существенный вклад вносит процесс образования электрон-позитронных пар. Если учесть вклад трех указанных процессов в результирующее сечение взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, то наименьшее сечение будет при энергии рентгеновских лучей ~ 4 МэВ, что соответствует наибольшей длине свободного пробега в веществе (для тяжелого металла ~ 25 г/см²) и максимальной проникающей способности. Для получения рентгеновского излучения с такой энергией используются схемы с конверсией электронных пучков в рентген, например в ядерном научном центре LANL (Los Alamos Nation Laboratory) в Лос-Аламосе

(США) [9], где для генерации рентгеновского излучения использовался электронный пучок с энергией 17 МэВ от линейного ускорителя DARHT-II [8]. При необходимости исследования (с наилучшим пространственным разрешением) структуры плотных динамических объектов приходится увеличивать интенсивность рентгена (из-за большого рассеяния рентгеновского излучения в плотном объекте и необходимости использования коллиматоров), что в случае использования конверсии из электронного пучка в рентгеновское излучение требует повышения интенсивности исходного пучка электронов и невозможности обеспечить хорошую фокусировку пятна (диаметр более 1 мм) на конверторе. При этом происходит увеличение углового разброса рентгеновского излучения, что, в свою очередь, ограничивает пространственное разрешение рентгеновских изображений. Таким образом, при использовании рентгенографии для исследования структуры плотных динамических объектов пространственное разрешение не превышает 600 мкм [9].

Возможности рентгенографии существенно расширились с началом использования в качестве источника синхротронного излучения от ускорителей электронов [10]. Данный метод позволяет получать большое количество кадров динамического процесса с хорошим временным разрешением (~ 1 нс). Например, в ИЯФ РАН (Институт Ядерной Физики, г. Новосибирск) удалось получить до 5 кадров динамического процесса (детонационная волна во взрывчатом веществе диаметром до 20 мм) с экспозицией 1 нс при размере канала пиксельного детектора DIMEX [11] в 100мкм.

Протонная радиография [12,13] с применением высокоэнергетичных (≥ 800 МэВ) протонов обладает большей просвечивающей способностью по отношению к рентгеновскому излучению (длина свободного пробега протонов для мишеней из тяжелых металлов ~ 200 г/см²). Структура протонного пучка для линейных и кольцевых ускорителей обычно

состоит из многих последовательных импульсов (банчей), что облегчает создание многокадровой системы регистрации радиографических изображений, позволяя регистрировать изображения на одной оси с изучаемым динамическим объектом. Полвека назад появились первые экспериментальные работы по протонной радиографии[5,6], которая вскоре стала успешно конкурировать с рентгенографией в дефектоскопии малоплотных объектов. Однако, в случае исследования плотных динамических объектов, возможности экспериментов, выполняемых по схеме «протоны - объект - детектор», ограничены многократным рассеянием протонов в объекте. Получаемые изображения не обладали высокой контрастностью и пространственным разрешением. В конце девяностых годов в ядерном научном центре LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center в Лос-Аламосе, США) были выполнены работы [13], которые вывели метод протонной радиографии на значительно более высокий технологический уровень. Было продемонстрировано, что отрицательные эффекты, связанные с многократным рассеянием, можно подавить, если между объектом и детектором поставить систему магнитных линз. Данная система магнитной оптики позволяет построить протонное изображение исследуемого объекта на детекторе, одновременно компенсируя хроматические аберрации, ухудшающие пространственное разрешение протонно-радиографического изображения. Кроме того, изменяя угловой аксептанс магнитооптической системы, можно подстроить контрастную чувствительность системы к различным материалам и толщинам исследуемых объектов, что, в результате, повышает динамический диапазон радиографической установки. Установка на пучке протонов с энергией 800 МэВ в LANSCE [13,14] позволяла получать до 30 кадров радиографических изображений объектов с плотностью от 0.05 до 50 г/см³ с пространственным разрешением ~ 35-200 мкм, временем экспозиции каждого кадра ~ 100 нс и интервалом между кадрами до 500 нс. На этой установке был проведен

целый ряд исследований ударно-волновых и детонационных процессов, в частности [14], получены новые данные для уравнений состояния ряда веществ в экстремальных условиях, ударных адиабат продуктов детонации взрывчатых веществ, исследования развития гидродинамических неустойчивостей в условиях ударно-волнового воздействия, динамического разрушения материалов, распространения и затухания детонационных волн в зарядах ВВ сложных конфигураций.

Таким образом, существующие радиографические установки на ускорителях протонов в России [15-17] и США [13,14] наглядно показали преимущества метода протонной радиографии по сравнению с традиционными рентгенографическими методами диагностики при исследовании плотных, как статических так и динамических объектов. Наилучшее пространственное разрешение для протонной радиографии было получено на установках с увеличением изображения, построенных по схеме протонного микроскопа [14]. До настоящего времени в России аналогов подобных установок не существовало.

Наличие на ускорителях (ТВН-ИТЭФ, SIS-18 (GSI), SIS100(FAIR)) возможности ускорять как тяжелые ионы, так и протоны, позволяет одновременно развивать не только технологию генерации с помощью тяжелоионных интенсивных пучков вещества с высокой плотностью энергии, но и технологию диагностики плотности методом протонной радиографии. Возможность использования высокоэнергетического протонного пучка (энергия ≥ 1 ГэВ) открывает возможность использовать технологию протонной радиографии, позволяющую эффективно определять распределение плотности вещества с микронным пространственным разрешением в динамических процессах.

В 2007-2009 годах на базе ускорителя ТВН-ИТЭФ была создана протонно-радиографическая установка ПРИМА [15,16], рассчитанная на использование протонов с энергией 800 МэВ, позволяющая проводить исследования динамических и статических объектов массовой толщиной

до 20 г/см^2 при поле зрения 40 мм. Главным недостатком такой установки являлось недостаточное пространственное разрешение радиографических изображений (300 мкм при массовой толщине исследуемого объекта 17 г/см^2) [16]. В результате, на базе установки ПРИМА было предложено создать протонно-радиографическую установку с увеличением радиографических изображений (протонный микроскоп ПУМА (Протонно-радиографическая Установка с МАгнитной оптикой)). Данная установка была рассчитана для протонно-радиографических исследований статических и динамических объектов массовой толщиной до 20 г/см^2 с пространственным разрешением лучше чем 100 мкм, числом кадров не менее 4 и временным разрешением не хуже 100 нс. Была поставлена цель проведения исследований ударно-волновых процессов методом протонной микроскопии (детонационные волны во взрывчатом веществе, ударные волны в газах, процессы откольного разрушения и струеобразования) с применением взрывных генераторов ударных и детонационных волн с характерной длительность исследуемого процесса около одной микросекунды.

Актуальность проблемы

Протонная радиография [13] с применением высокоэнергетичных протонов обладает большей просвечивающей способностью по отношению к рентгеновскому излучению (средняя длина свободного пробега протонов для мишени из тяжелых металлов $\sim 200 \text{ г/см}^2$, что более чем в восемь раз больше чем для рентгеновский лучей с энергией $\sim 4 \text{ МэВ}$). Структура протонного пучка для линейных и кольцевых ускорителей протонов обычно состоит из многих последовательных импульсов (банчей) длительностью 10-100 нс, что облегчает создание многокадровой системы регистрации радиографических изображений. Существующие радиографические установки на ускорителях протонов в России [15-17] и США [13,14] наглядно показали преимущества метода протонной

радиографии по сравнению с традиционными рентгенографическими методами диагностики при исследовании плотных объектов, особенно в динамических опытах. Наилучшее пространственное разрешение для протонной радиографии достигается на установках с увеличением изображения, построенных по схеме протонного микроскопа [14], что определяет актуальность создания подобной установки в России и проведение с ее помощью исследований динамических процессов.

Цель работы

Целями работы являются: разработка и создание протонно-радиографической установки, с увеличением изображения исследуемого объекта, построенной по схеме протонного микроскопа и рассчитанной на исследование динамических и статических объектов массовой толщиной до 20 г/см^2 с полем обзора 15-20 мм с высоким (лучше 100 мкм) пространственным разрешением; проведение исследований ударно-волновых процессов с применением взрывных генераторов ударных и детонационных волн с характерной длительностью исследуемого процесса около одной микросекунды; автоматизация управления установкой, линией транспортировки пучка, сбора и обработки экспериментальных данных.

Научная новизна

Впервые в России разработана и создана протонно-радиографическая установка с увеличением изображения объектов ($k=4$) - протонный микроскоп ПУМА (с пространственным разрешением до 60 мкм и временным разрешением 50 нс), предназначенная для проведения исследований распределения плотности статических и динамических объектов. На созданной установке ПУМА проведены экспериментальные исследования по измерению распределения плотности детонационных волн в цилиндрическом заряде эмульсионного взрывчатого вещества

диаметром 15 мм, получены экспериментальные результаты по измерению параметров детонационных волн в прессованном тринитротолуоле (ТНТ) с плотностью $\sim 1.6 \text{ г/см}^3$ и диаметром заряда 10 мм, получены экспериментальные результаты по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических объектов. Впервые методом протонной микроскопии получены экспериментальные результаты по исследованию структуры биологического объекта. Разработана и создана оригинальная комплексная система автоматизации (КСА) экспериментов и установки ПУМА, ориентированная на применение в исследованиях на ускорителях заряженных частиц и протонно-радиографических установках. С использованием КСА разработана оригинальная методика автофокусировки радиографических изображений, которая может быть применена на любой протонно-радиографической установке.

Практическая ценность

Созданная протонно-радиографическая установка ПУМА с увеличением изображения исследуемых объектов позволила провести ряд уникальных исследований динамических объектов на основе взрывных генераторов. Параметры созданной установки (пространственное разрешение до 60 мкм) позволяют проводить дефектоскопические и томографические исследования внутренней структуры статических объектов. Испытанная схема установки ПУМА и полученные на ней экспериментальные данные будут использованы при создании новейшего протонного микроскопа PRIOR (Proton microscope for FAIR) в GSI, который должен обеспечить проведение исследований динамических объектов с рекордным пространственным разрешением. Созданная комплексная система автоматизации КСА экспериментов на установке ПУМА позволила повысить эффективность использования пучкового времени на ускорителе ТВН-ИТЭФ. Система позволяет организовывать

сбор и сохранение всех поступающих экспериментальных данных и управляет режимами сброса пучка с ускорителя. Созданная КСА базируется на широкодоступных научных приборах (осциллографы, генераторы, источники питания и т.д.), что снижает стоимость проводимых экспериментов и позволяет оперативно организовывать новые конфигурации экспериментов. Появилась возможность проводить полностью автоматизированные эксперименты. Систематизированы все поступающие экспериментальные данные на едином сервере с предоставлением доступа к ним всем участникам экспериментов. Разработана автоматизированная система управления магнитными элементами линии транспортировки заряженных частиц и диагностики пучка, что существенно упростило процесс настройки и проводки пучка.

Результаты, выносимые на защиту

1. Первая в России протонно-радиографическая установка с увеличением изображения ($k=4$) исследуемых динамических и статических объектов - протонный микроскоп ПУМА с пространственным разрешением до 60 мкм при массовой толщине объектов до 20 г/см^2 и временным разрешением 50 нс;
2. Результаты исследования ударно-волновых процессов и статических объектов методом высокоэнергетической протонной микроскопии:
 - Измерено распределение плотности за фронтом детонационных волн в заряде эмульсионного взрывчатого вещества, показано, что при плотности заряда $\rho \sim 1 \text{ г/см}^3$ и диаметре 15 мм равновероятна возможна реализация различных режимов формирования детонационной волны (затухающая ударная волна, неустойчивый детонационно-подобный режим, стационарная детонационная волна);
 - Измерено распределение плотности за фронтом детонационной волны и определена ее скорость ($V=6.9 \pm 0.2 \text{ км/с}$) в заряде прессованного ТНТ (без оболочки) с плотностью $\sim 1.6 \text{ г/см}^3$ и диаметром заряда 10 мм, показано, что распределение плотности соответствует модели Зельдовича-Неймана-Деринга;
 - Показана возможность проведения исследования процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлов;
 - Впервые проведены исследования биологических объектов с использованием протонного микроскопа.
3. Оригинальная методика автофокусировки протонно-радиографических изображений, основанная на полной автоматизации управления установкой ПУМА, сбора и обработки экспериментальных данных, диагностики пучка и линии транспортировки пучка.

Личный вклад диссертанта

Диссертант внес решающий вклад в создание, эксплуатацию и проведение экспериментов на первой в России протонно-радиографической установке с увеличением изображения объекта – протонный микроскоп ПУМА в ИТЭФ. Он разрабатывал схему установки, проводил расчет основных параметров, создавал магнитооптическую систему установки и систему регистрации протонно-радиографических изображений. Диссертант непосредственно проводил эксперименты и участвовал в обработке экспериментальных данных на установке ПУМА при исследовании динамических и статических объектов. Диссертантом была разработана и создана универсальная комплексная модульная система КСА по автоматизации экспериментов и управлению установкой ПУМА. В процессе создания КСА диссертантом было написано программное обеспечение по сбору, сохранению и обработке экспериментальных данных, разработаны и собраны блоки управления и синхронизации, узлы мишеней и детекторов, системы управления линией транспортировки и диагностики пучка частиц, радиационной безопасностью.

Апробация полученных результатов

Основные результаты диссертационной работы многократно докладывались лично автором на российских и международных конференциях и семинарах: международном семинаре “4th International Workshop on High Energy Proton Microscopy” (Дармштадт, Германия, Июль, 2013), международной конференции “IEEE Pulsed Power & Plasma Science Conference – PPS2013” (Сан-Франциско, США, Июнь, 2013), международных семинарах “25, 30 и 32 International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter” (Хиршегг, Австрия, февраль, 2012, 2010, 2005), конференции “Научная Сессия МИФИ-2008” (Москва, январь, 2008), конференции “6-я и 7-я Молодежные школы Курчатовского

института“ (Москва, ноябрь 2009, 2008). Результаты работы опубликованы в 8 печатных работах, 6 из которых опубликованы в реферируемых журналах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.В. Канцырев, А.А. Голубев и др., Протонный микроскоп на ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ, Приборы и Техника Эксперимента, 2014, № 1, с. 5–14;
2. А.В. Канцырев А.В. и др.; Комплексная система автоматизации экспериментов на быстром выводе ускорительно-накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ, Приборы и Техника Эксперимента, 2010, № 5, с. 47–59;
3. D. Varentsov, A. Bogdanov, V.S. Demidov, A.A. Golubev, A. Kantsyrev, et al., First biological images with high-energy proton microscopy, European Journal of Medical Physics (Physica Medica) 29, 2013, p. 208-213;
4. S. A. Kolesnikov, ..., A. V. Kantsyrev et al., Shockwave and detonation studies at IТEP-TWAC proton radiography facility, AIP Conf. Proc. 1426, 2012, p.390-393;
5. Kantsyrev A.V. et al., IТEP proton microscopy facility, Proceedings of IEEE PPS2013, p.1-5, San-Francisco, USA, 2013;
6. А.А. Голубев, .., А.В. Канцырев, С.А. Колесников и др., Диагностика быстропротекающих процессов пучком заряженных частиц от ускорителя ТВН-ИТЭФ, Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 4;
7. А.П. Кузнецов, .., А.В. Канцырев и др., Лазерный интерферометр для измерения массовой скорости конденсированных веществ в ударно-волновых экспериментах на протонно-радиографической установке ТВН-ИТЭФ, Приборы и техника эксперимента 2011, № 3, с. 116–125;
8. S.A. Kolesnikov, .., A.V. Kantsyrev et al., Application of charged particle beams of TWAC-IТEP accelerator for diagnostics of high dynamic pressure processes, High Pressure Res (2010) vol. 30 (1) p. 83-87.

Глава 1. Метод протонной радиографии

Исследование объекта с помощью метода протонной радиографии происходит по схеме пучок протонов – объект – детектор (рисунок 1.1). Традиционно в качестве детектора пучка используют сцинтилляторы или фотографические пленки.

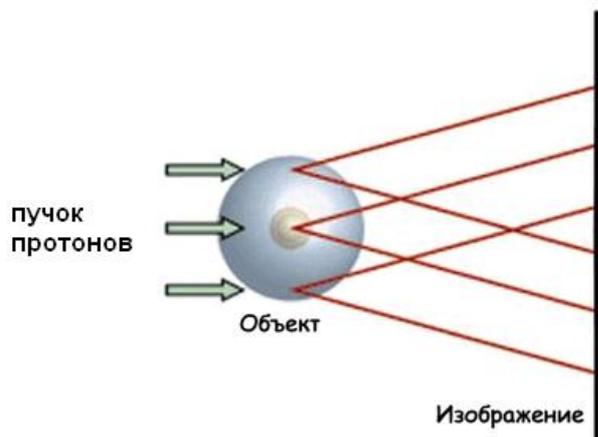


Рисунок 1.1 - Схема метода протонной радиографии без применения магнитной оптики.

При прохождении пучка протонов через вещество можно выделить три основных процесса взаимодействия (рисунок 1.2):

- торможение протонов с потерей энергии на взаимодействие с электронами атома вещества (ионизационные потери энергии).
- столкновение протонов с ядрами вещества (ядерное взаимодействие), приводящее к выбыванию части протонов из исходного пучка
- кулоновское рассеяние протонов на ядре исследуемого вещества с изменением угла пролета протонов по отношению к оси пучка протонов.

Прошедшие через вещество протоны рассеиваются за счет многократного кулоновского рассеяния, что приводит к размытию радиографического изображения в случае установки детектора пучка после исследуемого объекта.

Взаимодействие протонов с веществом

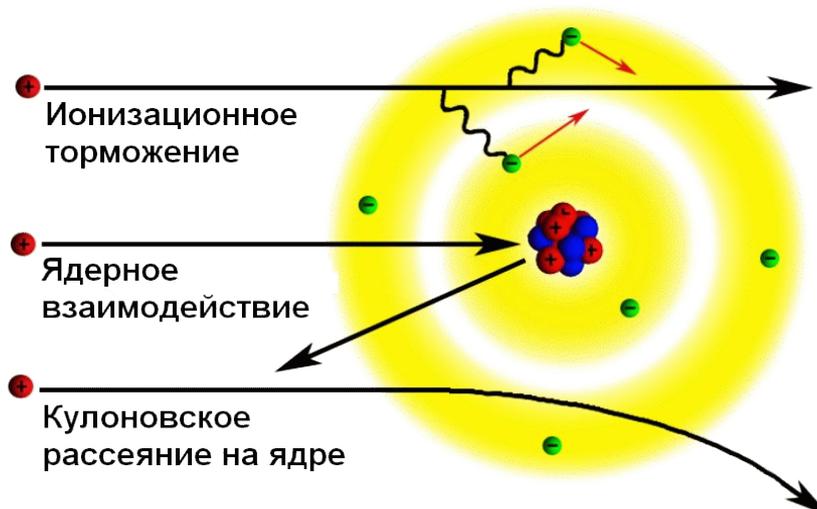


Рисунок 1.2 - Основные процессы при взаимодействии протонного пучка с веществом.

В процессе многократного кулоновского рассеяния частица в среднем отклоняется от первоначального направления на некоторый результирующий угол θ (средний угол многократного кулоновского рассеяния) [18]:

$$\theta = \frac{13.6 \text{ МэВ}}{p\beta c} \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left[1 + 0.038 \ln\left(\frac{x}{x_0}\right) \right], \quad (1)$$

где x – массовая толщина исследуемого объекта (г/см^2), x_0 – радиационная длина взаимодействия, p – импульс пучка протонов, βc – скорость протонов в пучке, выраженная по отношению к скорости света c .

В одной из первых работ по радиографии с использованием протонов [19] были описаны эксперименты по радиографии полного пробега, основанные на использовании формы профиля потерь энергии протонов в веществе (кривая Брэгга). Регистрация протонов в таком методе происходит в области низких энергий пучка после торможения протонов в веществе (рисунок 1.3). За счет резкого изменения интенсивности потока частиц в области пика Брэгга удается с хорошим контрастом (0.2 %) наблюдать перепад по плотности мишени. Таким

образом, радиография полного пробега позволяет с хорошим контрастом визуализировать элементы мишени с малым перепадом по плотности, однако за счет сильного рассеяния пучка протонов в области низких энергий пространственное разрешение не превышает ~ 1.5 мм.

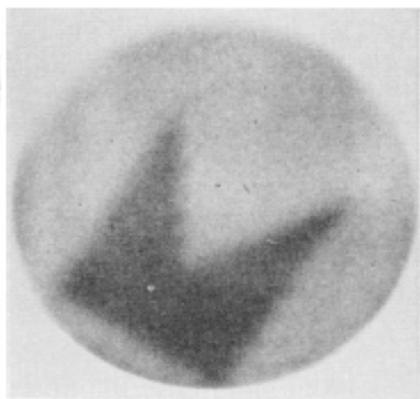


Fig. 1. Proton radiograph of aluminum absorber 7 cm in diameter and 18 g/cm^2 thick, with an additional thickness of 0.035 g/cm^2 aluminum foil, cut in the shape of a pennant, inserted at a depth of 9 g/cm^2 . The addition of 0.2 percent to the total thickness produces a substantially darker area on the film.

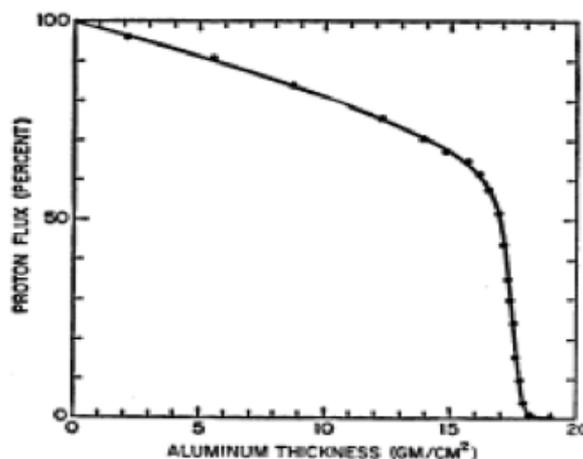


Fig. 2. Proton flux as a function of depth in aluminum. The steeply falling portion of the curve near 18 g/cm^2 is used to obtain the high contrast of Fig. 1.

Рисунок 1.3 - Протонная радиография полного пробега [19].

Слева – изображение алюминиевой мишени массовой толщиной 18 г/см^2 с алюминиевой фольгой (темная область) массовой толщиной 0.035 г/см^2 , справа – зависимость интенсивности потока частиц от толщины мишени.

Еще одним методом протонной радиографии является метод радиографии рассеяния (или фазоконтрастная радиография) [20]. В данном методе производят облучение тонкого малоплотного объекта (рисунок 1.4). За счет кулоновского малоуглового рассеяния в области перепада плотности в объекте происходит увеличение плотности потока частиц в пучке относительно начальной. За счет этого на регистраторе протонов происходит локальное увеличение интенсивности свечения, четко выделяющее границу мишени на границе перепада плотности (на границе объект-вакуум на рисунке 1.4). На рисунке 1.5 для сравнения показаны радиографические изображения листка дерева полученные по методу радиографии полного пробега и протонной радиографии

рассеяния. Метод протонной радиографии рассеяния обладает высокой контрастной чувствительностью при регистрации малых изменений по плотности мишени, но не позволяет определять плотность элементов мишени и не рассчитана на изучение плотных объектов.

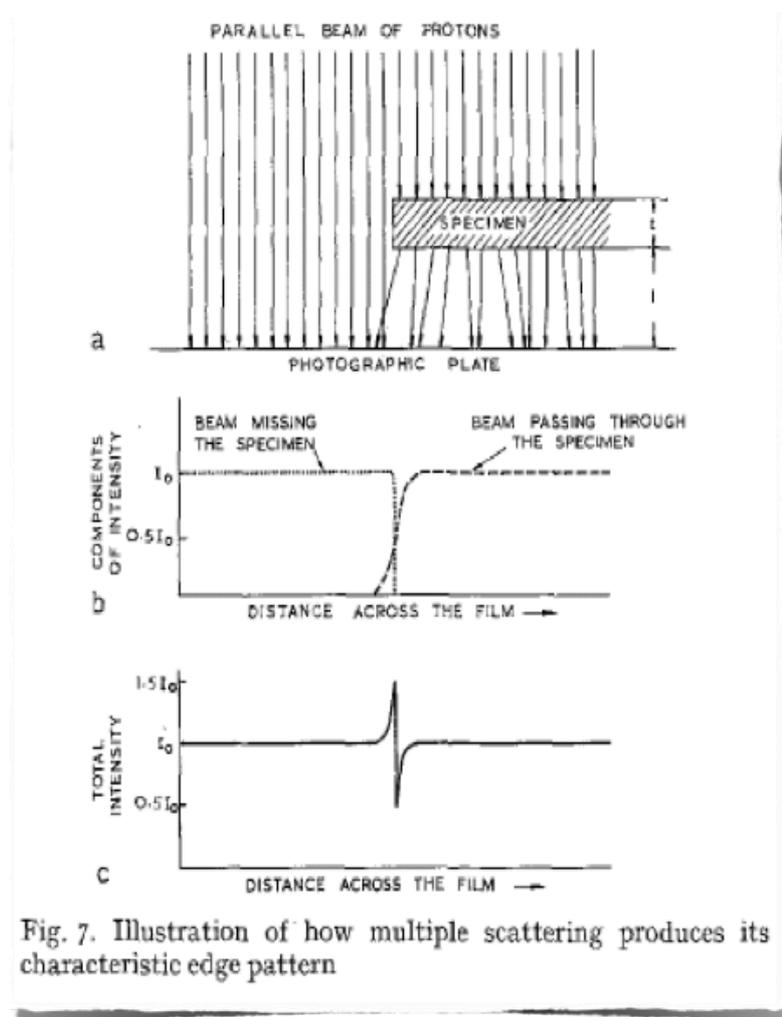


Рисунок 1.4 - Протонная радиография рассеяния [20] (фазоконтрастная радиография). а- схема облучения мишени, б- вклад потока частиц, проходящих через мишень и вне мишени, с- суммарный поток частиц.

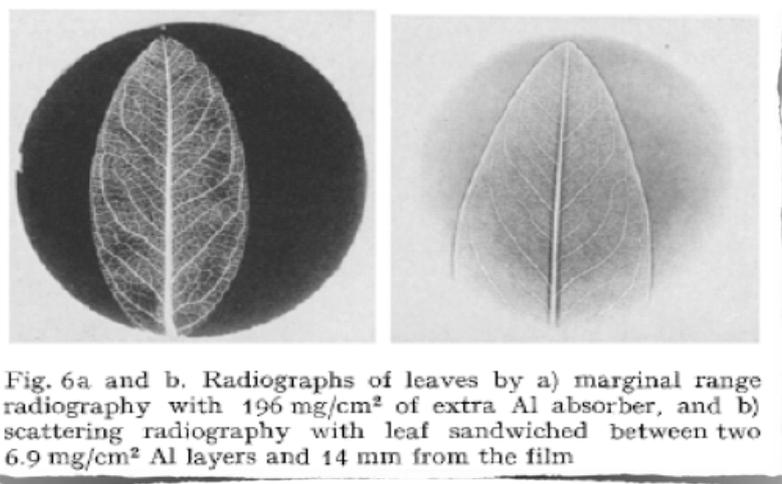


Рисунок 1.5 - Протонная радиография рассеяния [20]. Слева – радиографическое изображение листка дерева, полученное по методу радиографии полного пробега, справа- радиографическое изображение листка дерева, полученное по методу радиографии рассеяния.

Оба описанных метода подразумевают установку регистратора пучка (сцинтиллятора) в непосредственной близости от мишени, что не приемлемо в случае изучения динамических взрывающихся объектов. В случае, если детектор необходимо отнести на значительное ($>1 \text{ м}$) расстояние от изучаемого объекта, рассеяние протонов в объекте приводит к сильному размытию изображения и невозможности изучать внутреннюю структуру объекта. Для компенсации размытия изображения было предложено [13] установить систему магнитных линз после объекта, позволяющую построить изображение объекта в плоскости расположения детектора (рисунок 1.6).

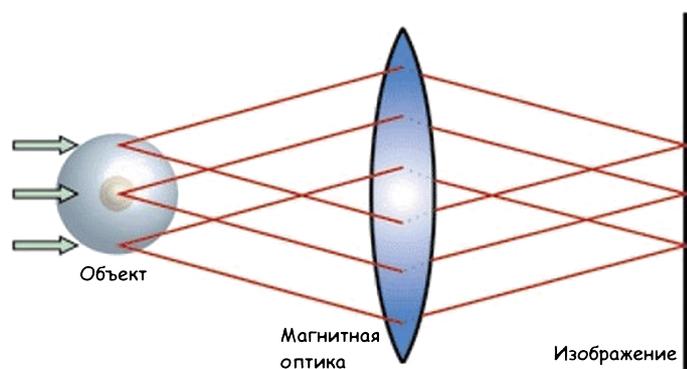


Рисунок 1.6 - Схема метода протонной радиографии реализованного с использованием фокусирующей магнитооптической схемы.

Система магнитной оптики приводит к необходимости установки протяженной вакуумной системы, что ведет к уменьшению углового акцептанса установки θ_c и сокращению количества протонов, достигающих плоскости установки детектора (изменению трансмиссии пучка за счет кулоновского рассеяния в исследуемом объекте). Трансмиссию пучка, определяемую процессами кулоновского рассеяния в исследуемом объекте и угловым акцептансом установки, можно записать в следующем виде [13]:

$$T_{mcs} = 1 - e^{-\theta_c^2 / 2\theta^2}, \quad (2)$$

где θ_c - угловой акцептанс установки, θ - средний угол многократного кулоновского рассеяния в исследуемом объекте (выражение (1)).

Процесс ядерного взаимодействия приводит к изменению трансмиссии пучка и ослаблению потока частиц попадающих на детектор. Выражение для трансмиссии пучка, зависящей от процессов ядерного взаимодействия в исследуемом объекте, можно записать в виде [13]:

$$T_{nuc} = e^{-x/\lambda_c}, \quad (3)$$

где λ_c – ядерная длина взаимодействия, x – массовая толщина исследуемого объекта (г/см²).

Результирующая трансмиссия пучка протонов в плоскости детектора, с учетом многократного кулоновского рассеяния, ядерного взаимодействия и пренебрегая малым вкладом логарифмического слагаемого в выражении (1), можно записать в виде выражения:

$$T = e^{-x/\lambda_c} \left(1 - e^{-\left(\frac{\theta_c p \beta c}{13.6}\right)^2 \frac{x_0}{2x}} \right) \quad (4)$$

Параметры λ_c и x_0 определяются химическим составом объекта. Таким образом, измеряя трансмиссию пучка (изображение без объекта деленное на изображение с объектом), из выражения (4), с учетом знания химического состава исследуемого объекта (параметры λ_c и x_0), можно определить значение x массовой толщины объекта в любой точке его поперечного сечения. В случае известной геометрии, используя значение массовой толщины x , можно рассчитать значение объемной плотности объекта.

Разброс по энергии исходного пучка протонов и ионизационные потери энергии протонов в исследуемом объекте приводят к появлению хроматических аббераций протонно-радиографических изображений, что является основным вкладом в ухудшение пространственного разрешения протонно-радиографических установок с применением магнитной оптики. Поэтому, при увеличении энергии пучка протонов и уменьшении разброса энергии в пучке, пространственное разрешение протонно-радиографических изображений улучшается. Кроме того, пространственное разрешение ограничивается кулоновским рассеянием протонов в толщине детектора пучка (сцинтилляторе).

Как видно из выражений (2),(4), угловой аксептанс θ_c радиографической установки позволяет регулировать значение трансмиссии на радиографических изображениях и соответственно регулировать контраст изображения. В девяностых годах двадцатого века группой ученых из Лос-Аламоского центра было предложено [21,13] использовать для системы фокусировки изображения магнито-оптическую схему, состоящую из четырех квадрупольных магнитных линз “русский квадруплет” [22], с промежуточной фокусировкой пучка в плоскости Фурье. В плоскости Фурье протоны с равным углом многократного кулоновского рассеяния (МКР) фокусируются в точку на определённом расстоянии r от оси пучка (рисунок 1.7). Соответственно, установив в плоскость Фурье коллиматор, появляется возможность

регулировать угловой аксептанс установки θ_c (подбирая диаметр коллиматора) и контраст радиографических изображений. На рисунке 1.7 показана характерная схема формирующей секции (“русский квадруплет”) магнито-оптической схемы протонно-радиографической установки. Магнитооптическая схема на рисунке 1.7 работает в режиме формирования изображения объекта без увеличения.

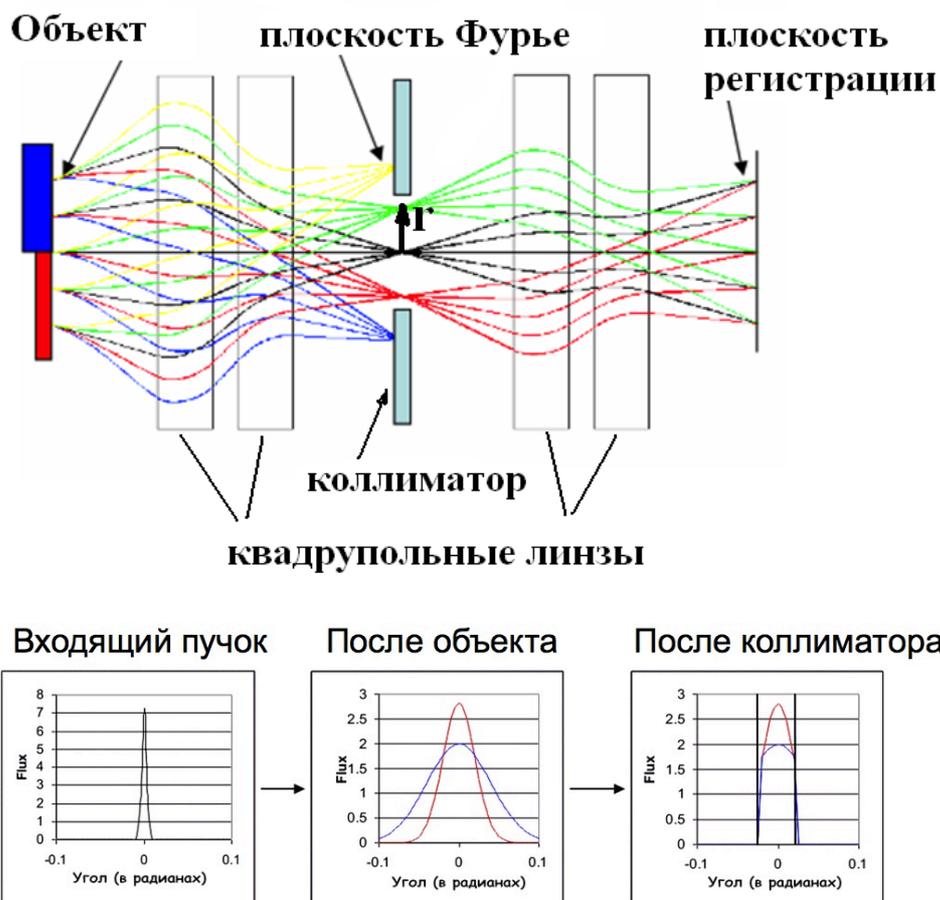


Рисунок 1.7 – Вверху - секция формирования изображения (без увеличения) исследуемого объекта (“русский квадруплет”). Показаны траектории протонного пучка в вертикальной плоскости. Внизу – угловое распределение пучка протонов в трех плоскостях.

В плоскости установки объекта для работы данной схемы необходимо обеспечить размеры протонного пучка не меньше поперечных размеров исследуемого объекта. Кроме того, необходимо обеспечить формирование плоскости Фурье в середине формирующей секции. Для этих целей перед исследуемым объектом устанавливается система из

нескольких магнитных квадрупольных линз (система согласования) рисунок 1.8 (линзы 1-3). На основе такой магнитооптической системы была разработана первая в России протонно-радиографическая установка [15,16].

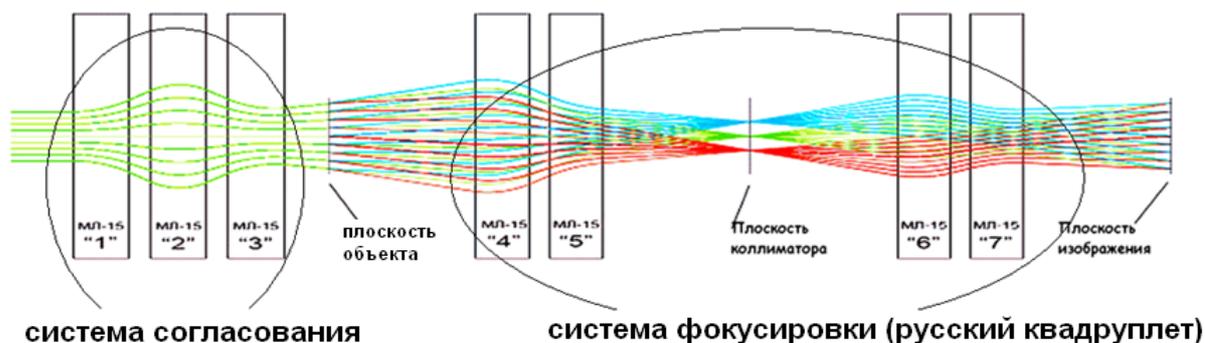


Рисунок 1.8 - Траектория пучка протонов в протонно-радиографической установке с установленной секцией согласования (схема без увеличения).

Для описания работы схемы квадрупольных линз протонно-радиографической установки используется матричный формализм описания систем магнитной оптики (каждый магнитный элемент и промежутки между ними описываются матрицами при перемножении которых формируется общая транспортная матрица магнитооптической схемы)[23]. Для частиц пучка, имеющих разброс по импульсу $\Delta = dp/p$ перед плоскостью установки объекта, и начальными координатами (x, φ) конечная координата в плоскости регистрации выражается следующим образом:

$$x_f = M_{11}x + M_{12}\varphi + T_{116}x\Delta + T_{126}\varphi\Delta \quad (5)$$

где $M_{11}, M_{12}, T_{116}, T_{126}$ - элементы транспортной матрицы[23]. Коэффициент M_{11} - увеличение радиографической установки; коэффициент $M_{12} = 0$ - условие формирования изображения в плоскости регистрации; элементы T_{116}, T_{126} определяют хроматические aberrации магнитооптической схемы установки. Слагаемое $T_{116}x\Delta$ ("поперечный

хроматизм”) из формулы (5) исключается использованием системы согласования (линзы 1-3 на рисунке 1.4), обеспечивающей угловую корреляцию [15] исходного протонного пучка: $\varphi = wx + \theta$, где $w = -T_{116} / T_{126}$. В этом случае выражение (5) перепишем как:

$$x_f = M_{11}x + T_{126}\theta\Delta \quad (6)$$

Расплывание изображения точки в исследуемом объекте, непосредственно связанное с пространственным разрешением радиографических изображений, определяется выражением:

$$\Delta x_f = \frac{x_f}{M_{11}} - x = \frac{T_{126}}{M_{11}}\theta\Delta. \quad (7)$$

Элемент T_{126} (“продольный хроматизм”) минимизируется при расчете магнито-оптической схемы в программе COSY Infinity[24]. Как видно из выражения (7), построение протонно-радиографической установки с увеличением (схема протонного микроскопа) позволяет существенно улучшить пространственное разрешение радиографических изображений. На рисунке 1.9 показана характерная схема протонно-радиографической установки с использованием схемы протонного микроскопа.

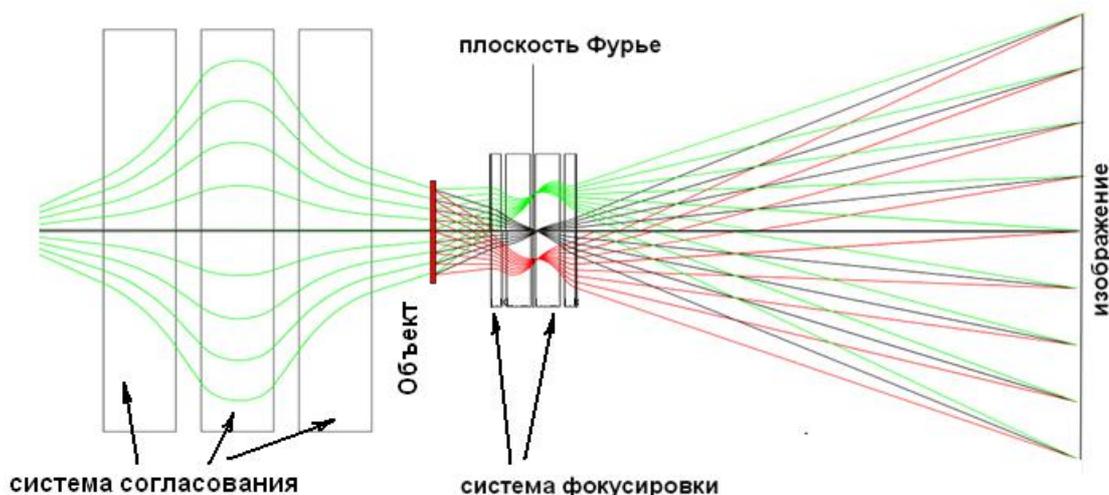


Рисунок 1.9 - Пример схемы расположения магнитных элементов и траектория пучка для радиографической установки, построенной по схеме протонного микроскопа с увеличением изображения исследуемого объекта.

Протонно-радиографический метод исследования объектов с применением схемы протонного микроскопа принято называть методом протонной микроскопии [25].

Одним из преимуществ протонной радиографии (с применением высокоэнергетичных пучков) является возможность визуализации процессов в динамических объектах. Так как временная структура протонного пучка обычно состоит из нескольких импульсов (банчей), регистрируя отдельно каждый банч можно получить несколько кадров динамического процесса в исследуемом объекте. На рисунке 1.10 для примера показана временная структура протонного пучка с энергией 800 МэВ на быстром выводе ускорителя ТВН-ИТЭФ.

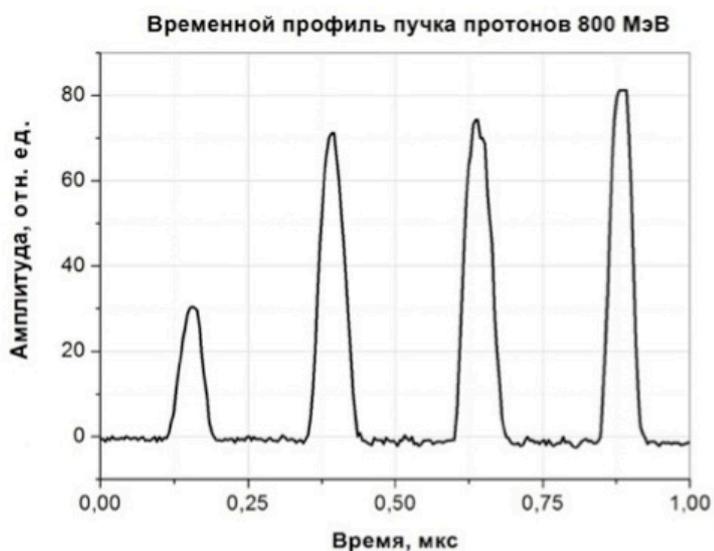


Рисунок 1.10 – Осциллограмма тока пучка протонов, измеренная индукционным датчиком на установке ПУМА в ИТЭФ

Для регистрации протонно-радиографических изображений исследуемого объекта традиционно применяется сцинтиллятор с системой регистрации изображений, состоящей из ПЗС (Прибор с Зарядовой Связью) камер регистрирующих каждый отдельный банч протонного пучка. Для получения наилучшего пространственного разрешения при изучении динамических объектов необходимо минимизировать время экспозиции

при регистрации протонно-радиографических изображений. Например, при регистрации ударной волны взрывного генератора с характерной скоростью 1 км/с за время экспозиции одного кадра ~100 нс происходит смещение фронта волны и соответственно размытие изображения на ~100мкм.

Определение плотности в исследуемом объекте производится после обработки радиографических изображений. Процедура обработки протонно-радиографических изображений представлена на рисунке 1.11. На первом этапе обработки из полученного протонно-радиографического изображения вычитается «черный фон»: изображение, полученное ПЗС камерой в отсутствии пучка. Это позволяет компенсировать дефекты изображения, вызванные работой самой ПЗС-матрицы (в том числе шумовые эффекты). Далее производится деление полученного изображения на изображение «белое поле»: зарегистрированного на ПЗС в отсутствии объекта, из которого так же было вычтено изображение черного фона. Это позволяет устранить вклад в результирующее изображение дефектов в сцинтилляторе, оптической системе регистрации изображений и неоднородности поперечного профиля пучка и получить изображение в единицах трансмиссии пучка рисунок 1.7.

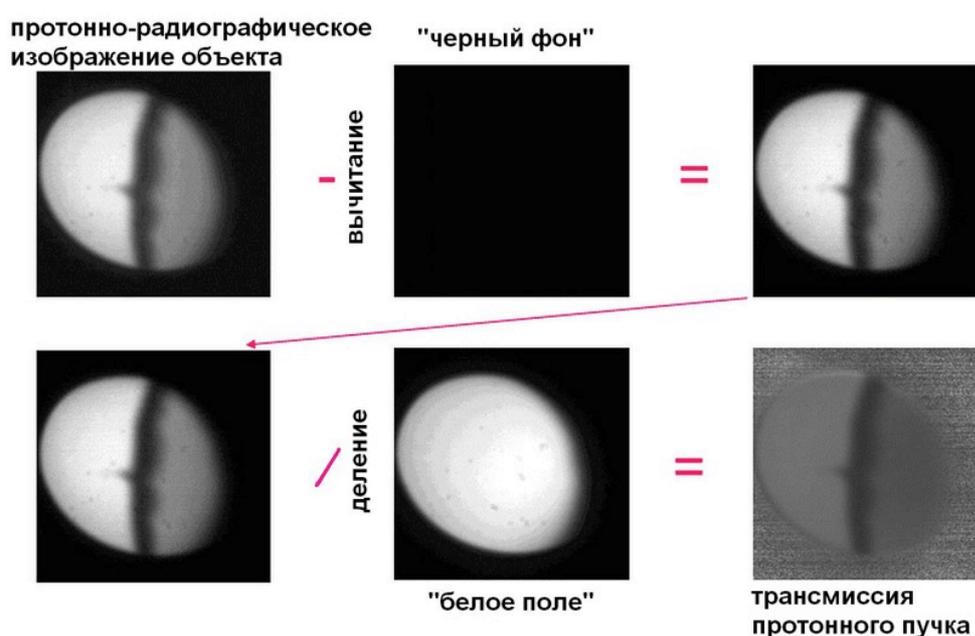


Рисунок 1.11 - Процедура обработки радиографических изображений.

Далее используя выражение (4), с учетом химического состава объекта, можно определить массовую толщину объекта, и с учетом геометрии объекта, его объемную плотность.

Таким образом, для получения наилучшего пространственного разрешения изображений исследуемых объектов необходимо создавать установку построенную по схеме протонного микроскопа (схема с увеличением изображения) с использованием высокоэнергичного протонного пучка (энергия ≥ 800 МэВ) с минимальным разбросом по энергии протонов. Кроме того, для получения наилучшего пространственного разрешения, при изучении динамических объектов, необходимо минимизировать время экспозиции при регистрации протонно-радиографических изображений.

Глава 2. Экспериментальная установка

2.1 Ускоритель ТВН-ИТЭФ

Ускорительно-накопительный комплекс ТВН-ИТЭФ [26] (рисунок 2.1) был создан в 1998-2002 гг. в результате реконструкции протонного синхротрона У-10 ИТЭФ. Комплекс ТВН-ИТЭФ включает в себя пять ускорительных установок: протонный инжектор И-2 (25 МэВ), ионный инжектор И-3 (1-2 МэВ), лазерный источник ионов с инжектором И4 (7 МэВ), синхротрон У-10 (34 Тл/м) и бустерный синхротрон УК (13 Тл/м), связанный с кольцом У-10 линией транспортировки пучка. Кольцо У-10 используется как ускоритель протонов на энергию до 9,3 ГэВ, либо как ионный синхротрон или накопитель ионов, предварительно ускоренных в кольце УК. В настоящее время на ТВН-ИТЭФ освоено ускорение в УК ионов углерода $^{12}\text{C}^{4+}$ до энергии 400 МэВ/а.е.м. (с интенсивностью 2×10^9 ионов за цикл ускорения), алюминия $^{27}\text{Al}^{10+}$ (250 МэВ/а.е.м., 10^8 ионов/цикл), железа $^{56}\text{Fe}^{16+}$ (230 МэВ/а.е.м., 10^8 ионов/цикл), серебра $^{108}\text{Ag}^{19+}$ (100 МэВ/а.е.м.,

$2 \cdot 10^7$ ионов/цикл). Максимальная интенсивность протонного пучка 10^{12} частиц/цикл. Максимальная частота сбросов пучка 0.25 Гц. Инжектированные в кольцо У-10 ядра углерода, алюминия и железа могут дополнительно ускоряться до релятивистских энергий 2-4 ГэВ/а.е.м., либо накапливаться в кольце У-10 с многократным увеличением интенсивности. Комплекс ТВН-ИТЭФ является в настоящее время единственным в России, способным генерировать перечисленные выше пучки ионов.

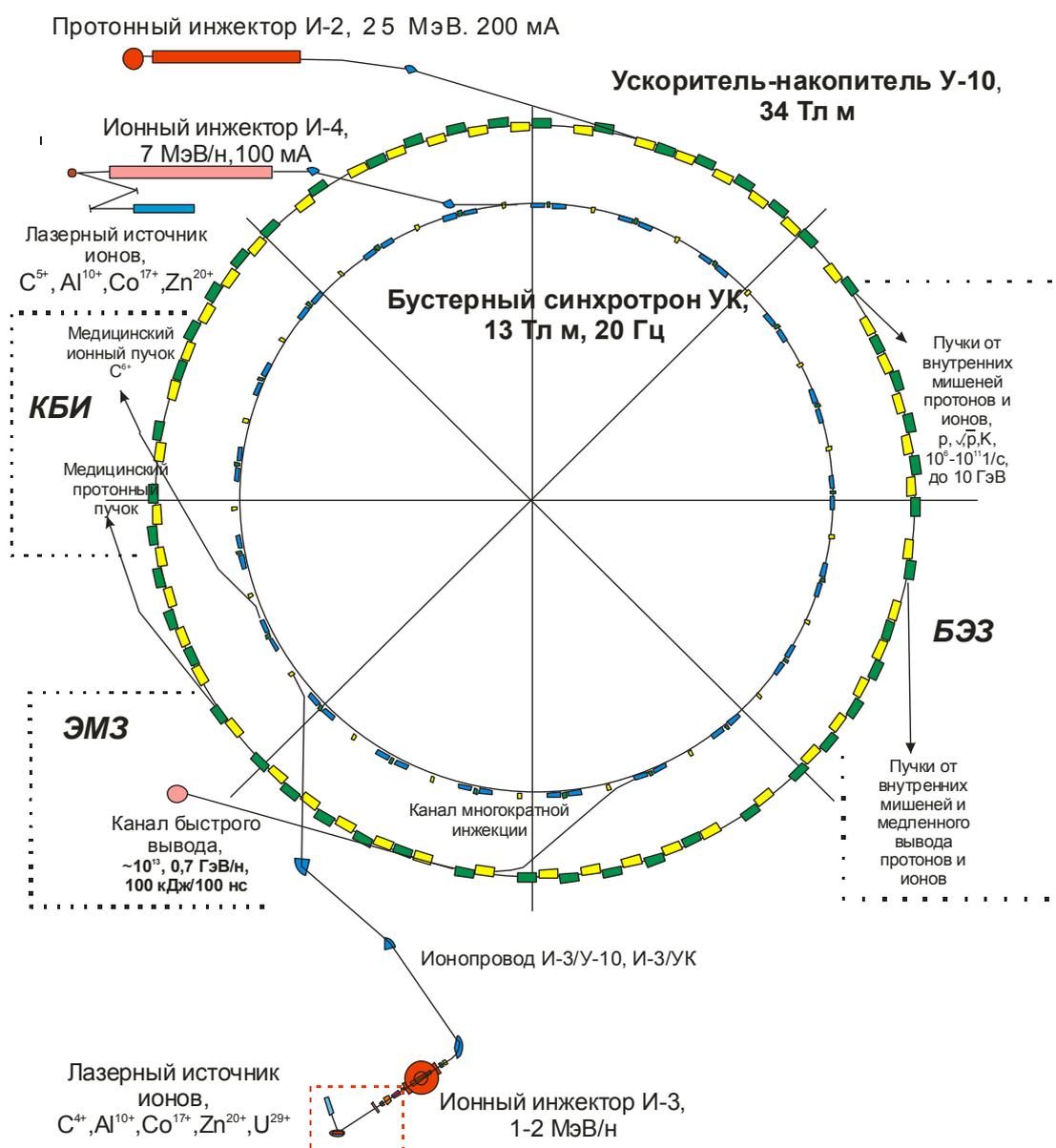


Рисунок 2.1 - Схема ускорительно-накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ.

Внизу-слева - ЭМЗ – канал быстрого вывода пучка установки ПРИМА (длительность сброса пучка 1 мкс).

2.2 Линия транспортировки пучка

Для проведения экспериментов по физике высокой плотности энергии в веществе, протонной радиографии и ионной радиобиологии, на быстром выводе пучка ускорителя У-10 в ИТЭФ была разработана и создана экспериментальная установка (комплекс установок) ПРИМА [27] (ПРОтонно-Ионная Многофункциональная установка) (рисунок.2.2), состоящая из вакуумной линии транспортировки пучка 510, по которой от ускорителя к экспериментальным мишеням, посредством магнитных элементов, транспортируется пучок заряженных частиц.

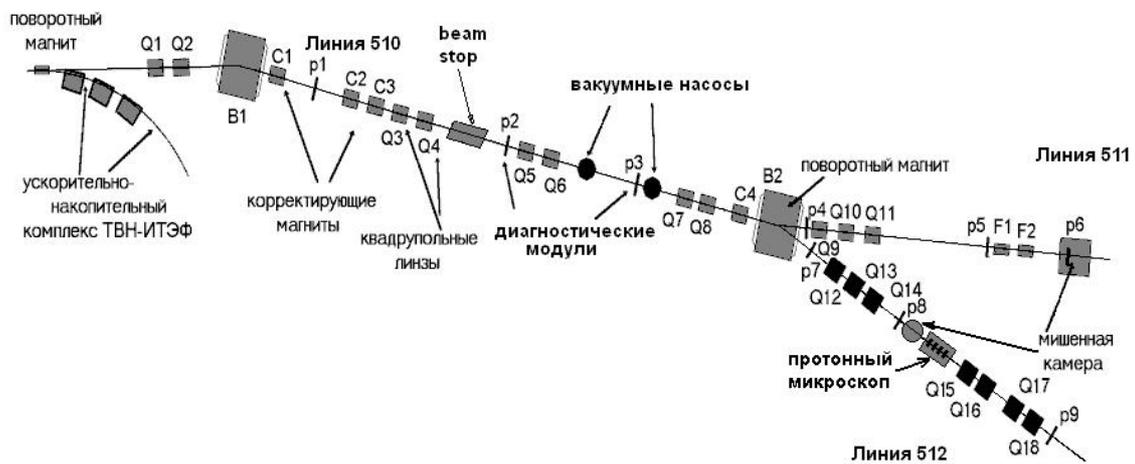


Рисунок 2.2 - Схема установки ПРИМА. (P1-P9) - диагностические модули для контроля поперечного размера пучка; (Q1-Q18), (F1-F2) - магнитные квадрупольные линзы; (C1-C4) - корректирующие магниты; (B1,B2) - поворотные магниты; «beam stop» – механический блокиратор пучка



Рисунок 2.3 - Фотография линий 511 и 512 установки ПРИМА

За поворотным магнитом В2 линия транспортировки пучка 510 (рисунок.2.2) разделяется на две (рисунок 2.3). Одна из них (511) предназначена для проведения экспериментальных исследований по радиобиологии и прикладным исследованиям с использованием пучков тяжелых ионов с энергией 200-400 МэВ/а.е.м.. Другая линия (512 – установка ПУМА), предназначена для транспортировки пучка протонов с энергией 800 МэВ и проведения экспериментов по диагностике статических и динамических объектов методом протонной радиографии с применением магнитной оптики, включающей протонный микроскоп. Максимальная интенсивность пучка протонов составляет $\sim 10^{12}$ частиц за сброс. Временной импульс протонного пучка состоит из четырех импульсов (банчей) длительностью 47 ± 5 нс (ширина на полувысоте) каждый с интервалом между импульсами 250 ± 5 нс, частота сбросов ≤ 0.25 Гц. Вакуумная система линии транспортировки пучка поддерживает вакуум в линиях 510-511 на уровне $\sim 10^{-9}$ торр. В случае проведения взрывных экспериментов по протонной радиографии для безопасной работы с динамическими мишенями вакуумная линия 512 отделяется от высоковакуумной части воздушным разрывом (между поворотным магнитом В2 и квадрупольной линзой Q12) и защитными окнами из Al толщиной 3 мм устанавливаемыми перед линзой Q12 и перед плоскостью регистрации изображений р9. Вакуум в линии 512 поддерживается на уровне $10^{-2} - 10^{-3}$ торр. Полная длина линии транспортировки пучка 510 и 512 от ускорителя до протонно-радиографической установки ПУМА ~ 70 метров.

2.3 Протонный микроскоп ПУМА

На базе линии 512 создана Протонно-радиографическая Установка с применением МАгнитной оптики (протонный микроскоп ПУМА) [28]. Параметры входящего в установку ПУМА пучка: разбросом по импульсу $\Delta p/p \cong 10^{-3}$, угол расходимости 0.5 мрад. Энергия пучка протонов

(800 МэВ) выбрана в соответствии с допустимым уровнем радиационного фона в экспериментальном зале. Протонно-радиографическое изображение изучаемого объекта, помещенного в предметную плоскость установки, формируется в плоскости детектора с коэффициентом увеличения $k=4$ с помощью магнито-оптической системы, состоящей из четырех квадрупольных линз на постоянных магнитах (рисунок 2.4). Установка рассчитана для проведения измерений объектов с массовой толщиной до 20 г/см^2 при поле обзора диаметром до 20 мм. Пространственное разрешение радиографических изображений существенно зависит от массовой толщины исследуемого объекта и составляет от 60 мкм до 115 мкм при толщине объектов от $0,46 \text{ г/см}^2$ до 17 г/см^2 соответственно. Временная структура протонного пучка, состоящая из четырех импульсов длительностью 50 нс каждый с интервалом между ними 250 нс, позволяет исследовать динамическое состояние вещества в четырех последовательных радиографических кадрах. Объектами исследований на установке ПУМА являются: динамические процессы ударно - сжатой плазмы экстремальных состояний, взрывные процессы в условиях ударно-волнового нагружения и формирования детонационных волн во взрывчатом веществе, параметры и характеристики газодинамических течений, дефектоскопия статических и биологических объектов.

При проектировании установки ПУМА ставилась задача размещения элементов протонного микроскопа на той же линии транспортировки пучка, на которой ранее были выполнены первые динамические эксперименты с помощью протонной радиографической установки с квадрупольными электромагнитными линзами [16]. Для решения поставленной задачи в секции формирования изображений было предложено использовать квадрупольные линзы на постоянных магнитах (ПМК), имеющие высокий градиент магнитного поля (28T/m) при малых длинах (0.16 и 0.32 м) и апертуре 32 мм.

Схема магнитной оптики установки ПУМА представляет собой систему из 7 магнитных квадрупольных линз (рисунок 2.4). Три электромагнитных квадрупольных линзы МЛ-15 (линзы 1-3 системы согласования на рисунке 2.4) обеспечивают оптимальные параметры (размер и угловые характеристики) протонного пучка в плоскости размещения исследуемого объекта “М” (рисунок 2.4) и частично компенсируют aberrации протонно-радиографических изображений.

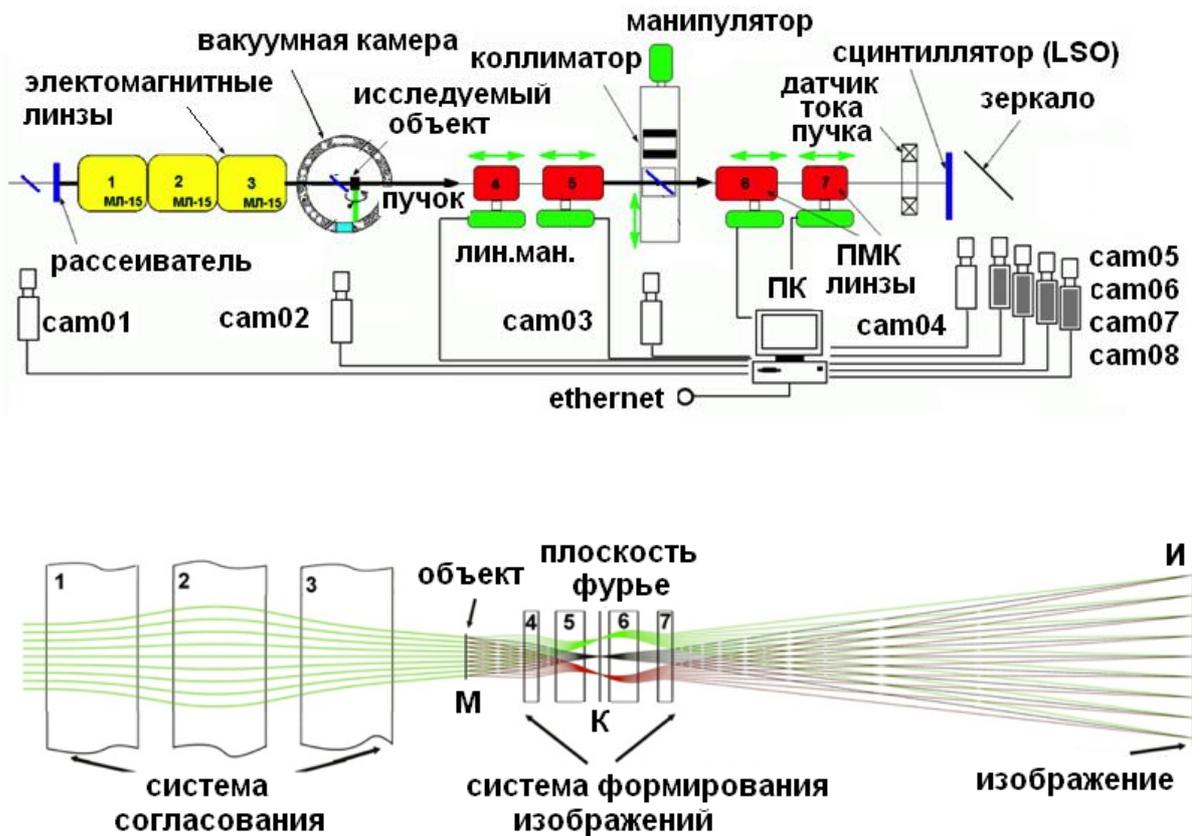


Рисунок 2.4 - Схема расположения магнитных элементов (вверху) и траектория пучка (внизу) в протонном микроскопе ПУМА.

Для формирования и увеличения изображения объекта в плоскости регистрации “И” (рисунок 2.4) используется система из четырех квадрупольных магнитных линз ПМК (система формирования, линзы 4-7 на рисунке 2.4). Настройка резкости изображения производится продольным перемещением линз ПМК. Магнитная оптика протонного микроскопа спроектирована таким образом, что в середине

формирующей секции (между линзами 5 и 6) формируется плоскость Фурье “К” (рисунок 2.4), в которой происходит промежуточная фокусировка пучка и разделение в пространстве (по расстоянию от оси пучка) протонов, набравших в исследуемом объекте различные углы многократного кулоновского рассеяния. В эту точку для улучшения контраста получаемых изображений помещается коллиматор (коллиматоры выполнены в виде цилиндров из латуни длиной 35 мм с диаметрами внутреннего отверстия 7 или 14 мм). Угловой акцептанс установки для коллиматора диаметром 7 мм – 3 мрад, без коллиматора 9 мрад. Полная длина установки 13 м. Длина системы согласования 5 м, длина системы формирования изображения 8 м. В качестве регистратора пучка и средства формирования радиографических изображений используется сцинтиллятор из силикат лютеция (LSO) толщиной 2.8 мм, диаметром 80 мм и временем высвечивания 40 нс. В приложении А приведен чертеж установки ПУМА с детализировкой продольных размеров, а на рисунке 2.5 приведено фото установки ПУМА.

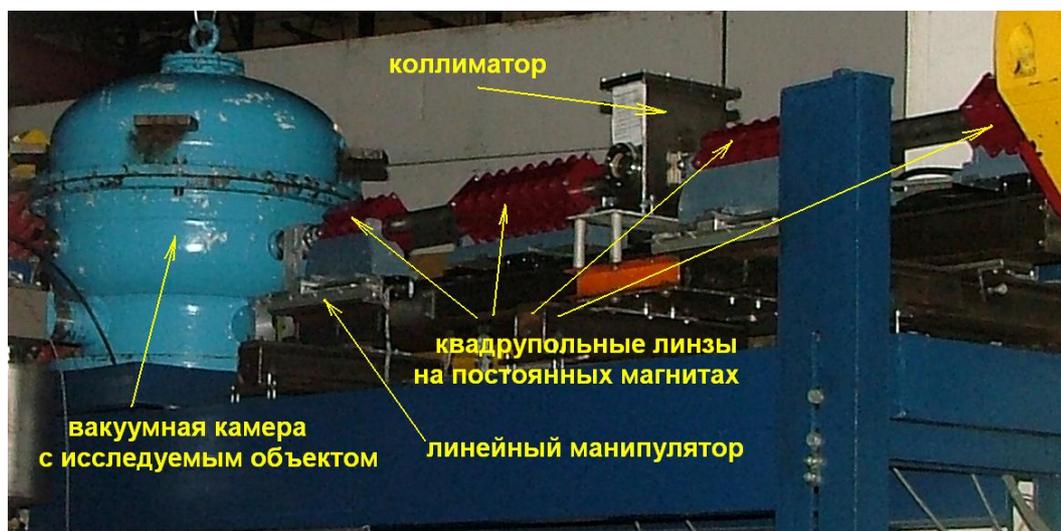


Рисунок. 2.5 - Фотография установки – протонный микроскоп ПУМА.

Расчет и оптимизация схемы магнитной оптики установки ПУМА производился в программе COSY Infinity[24]. Для записи

радиографических изображений была разработана 4-х кадровая система регистрации, построенная на основе быстрых цифровых ПЗС камер (CAM05-CAM08 рисунок 2.4) “НТЦ СИЛАР” S2C-077FO-G с электронно-оптическими затворами (динамический диапазон 14 бит, время экспозиции 100 нс). Для диагностики поперечного профиля пучка, при настройке линии транспортировки пучка, используются ПЗС камеры SDU285 (CAM01-CAM04 на рисунке 2.4) с дистанционно устанавливаемыми на ось пучка сцинтилляторами Vicron VC-412 толщиной 1 мм. Для измерения временного профиля импульса протонного пучка и контроля синхронизации запуска каналов регистрации используется индукционный датчик тока пучка фирмы Bergoz FCT-082-05:1. Четыре ПМК линзы установлены на общий рельс и перемещаются с помощью линейных манипуляторов, установленных по разные стороны от рельса. Линейные манипуляторы состоят из актуаторов NB BG2602A-300H/A5C-LB и шаговых двигателей FL42STH. Диапазон перемещения каждой магнитной квадрупольной линзы составляет 250 мм, скорость перемещения 1 мм/с, точность 20 мкм. Для управления манипуляторами ПМК линз разработан и создан контроллер на основе USB модуля фирмы L-CARD E14-140 и разработана программа PROTOM созданная в среде программирования Delphi XE. Программа позволяет устанавливать ПМК линзы в требуемое положение как в ручном, так и в автоматическом режимах. Синхронизация запуска каналов регистрации осуществляется от генераторов временных задержек Stanford DG645 и DG535. Для позиционирования объектов относительно пучка разработан 3-х координатный вакуумный манипулятор изучаемых объектов (точность 5 мкм), построенный на основе линейных и вращательных манипуляторов фирмы Standa. Считывание и управление всеми элементами установки осуществляется с удаленных персональных компьютеров с использованием разработанной комплексной системы

автоматизации КСА экспериментов [27], подробное описание которой приведено в главе 3 диссертации. Для проведения экспериментов с динамическими объектами, использующими взрывчатые вещества, изготовлена и испытана вакуумная взрывозащитная камера (ВЗК), аттестованная для многократного применения динамических объектов с массой до 100 граммов ВВ в эквиваленте ТНТ.

2.3.1 Квадрупольные линзы на постоянных магнитах

Для минимизации хроматических aberrаций магнитооптической схемы протонного микроскопа и построения схемы с увеличением изображения, квадрупольные линзы системы формирования, должны быть минимальной длины с высоким градиентом магнитного поля и минимальной нелинейностью. Экономически выгодно создавать такие квадрупольные линзы на основе постоянных магнитов (квадрупольные линзы на постоянных магнитах более чем в два раза дешевле электромагнитных при малых апертурах и высоких градиентах поля). Квадрупольные линзы на постоянных магнитах [36,37], используемые в системе формирования изображения установки ПУМА, имеют следующие параметры: длина линз 4 и 7 (на рисунке 2.4) составляет 160 мм, длина двух внутренних линз 5 и 6 (на рисунке 2.4) – 320 мм, апертура всех ПМК линз – 40 мм, магнитное поле на полюсе – 0.58 Т. Постоянные магнитные квадрупольные линзы, используемые в протонном микроскопе, состоят из идентичных модулей. Каждый модуль представляет собой (см. слева на рисунке 2.6) элемент квадрупольной линзы длиной 40 мм, созданный на основе постоянных магнитов (Nd-Fe-B). Постоянные магниты установлены в ярмо из магнитомягкого железа. С учетом конструкции вакуумной системы результирующая апертура линз составляет 32 мм (см. справа на рисунке 2.6).

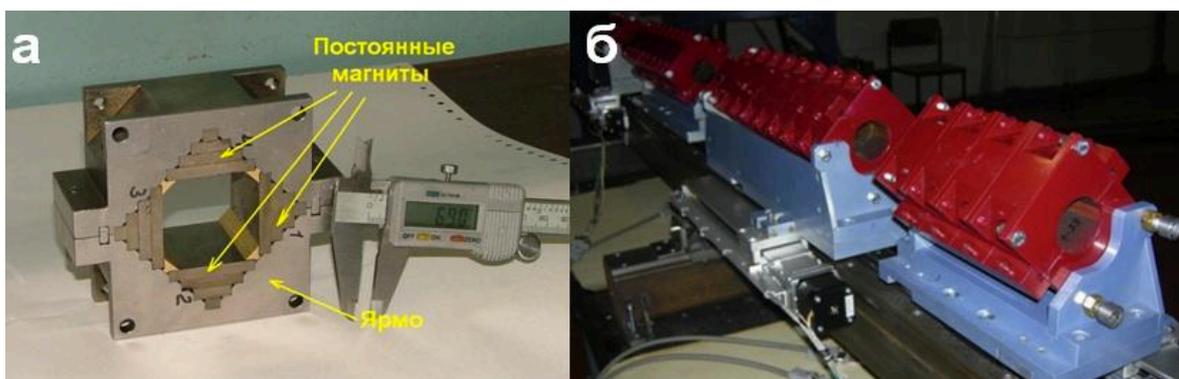


Рисунок 2.6 – Квадрупольные линзы на постоянных магнитах. (а) - отдельный модуль квадрупольной линзы, (б) - готовые ПМК линзы протонного микроскопа.

Распределение магнитного поля и основные характеристики ПМК линз измерялись с помощью разработанного сканирующего стенда, созданного на основе комплексной системы автоматизации КСА экспериментов. Для измерения магнитного поля использовался датчик Холла (ПХЭ 606118А, точность 0.1%), подключаемый к высокоточному измерителю напряжений Agilent 34970А (динамический диапазон 22 бит). Датчик перемещался с помощью линейных актуаторов Standa 8MT175 и вращательного манипулятора 8MR151. Точность линейного перемещения датчика 2.5 мкм, угловая точность 0.6'. Сканирование поля производилось как по цилиндрической поверхности вблизи радиуса апертуры линзы, с целью определения всей картины поля внутри апертуры, так и в направлении оси линзы на двух идентичных расстояниях (1 мм) от оси линзы для определения градиентных характеристик модулей. Точность измерения магнитного поля составляет 0.1 %. На рисунке 2.7 представлены результаты измерения градиента поля G и интеграла градиента I_G магнитной индукции в приосевой области (± 2 мм от оси) сборки, состоящей из двух модулей суммарной длиной 80 мм [28].

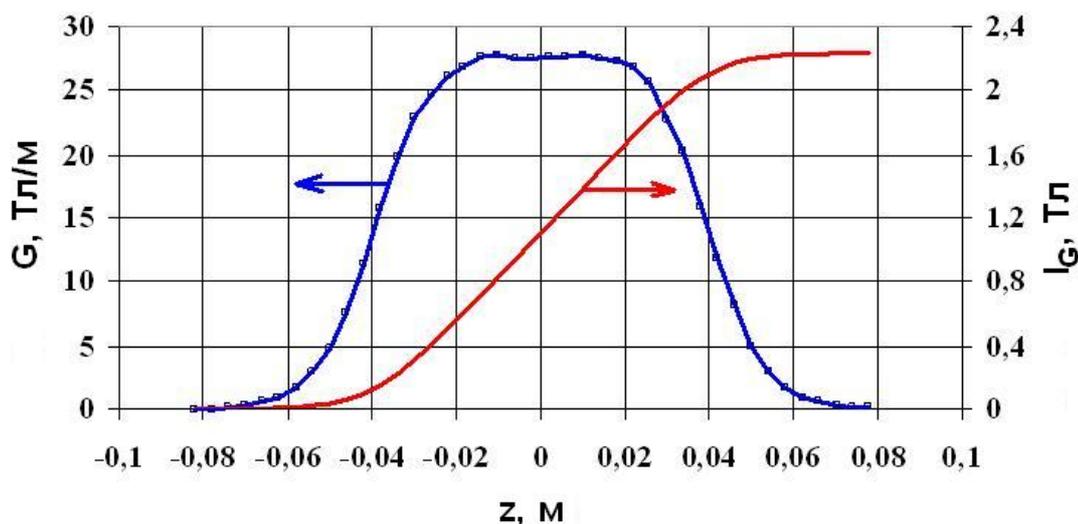


Рисунок 2.7. Продольное распределение градиента G и интеграла градиента I_G магнитного поля сборки из двух квадрупольных модулей (длина 80мм)

Приведенное значение поля на полюсе ПМК линзы равно 0.58 Т, градиент поля линзы $G=28$ Т/м.

2.3.2 Многокадровая система регистрации изображений

Для регистрации протонно-радиографических изображений исследуемых объектов изготовлена 4-х кадровая система регистрации [28,29] на основе ПЗС камер с электронно-оптическими (ЭО) затворами и усилителем на основе микроканальной пластины (МКП). Для регистрации радиографических изображений каждого банча пучка протонов создается отдельный канал регистрации с временем экспозиции не более 100 нс каждый. При разработке и изготовлении системы регистрации протонных радиографических изображений одним из важнейших требований является обеспечение максимальной чувствительности регистрирующей системы, состоящей из электронно-оптического (ЭО) затвора и используемой в качестве регистратора матрицы ПЗС. При разработке системы регистрации были испытаны два типа каналов регистрации изображений.

Первый тип канала регистрации протонно-радиографических изображений создан на основе ПЗС камер S2C-017APF-K2 фирмы СТК СИЛАР (Санкт-Петербург) (рисунок 2.8) с волоконно-оптическим входным окном. В качестве электронно-оптического затвора в конструкции этих каналов регистрации использован ЭО-затвор бипланарного типа BV2503QZ18 (диаметр фотокатода 25 мм, диаметр выходного окна 18 мм) с волоконно-оптической планшайбой на выходе производства фирмы Proxitronic. Контакт между ПЗС камерой и ЭО-затвором осуществляется “плавающей” подвеской с перемещением не менее ± 0.5 мм. В ПЗС камере S2C-017APF-K2 используется ПЗС матрица ISD017APF (14-бит, размер пикселя 16x16 мкм, число эффективных пикселей 1040×1160) с охлаждением на основе элемента Пельтье. Напряжение питания камер 24 вольт.



Рисунок 2.8 - Фотография двух каналов регистрации радиографических изображений. Слева – два канала регистрации созданных с использованием ЭО бипланарного затвора на основе ПЗС камер S2C-017APF-K2, справа- генератор высоковольтных импульсов ГВИН-1

Питание ЭО бипланарного затвора осуществляется с помощью высоковольтного генератора ГВИН-1, разработанного на основе импульсных водородных тиратронов. Генератор ГВИН-1 формирует прямоугольные высоковольтные импульсы амплитудой до 15 кВ и длительностью ≥ 100 нс, длительностью переднего фронта ≤ 10 нс,

заднего фронта ≤ 2 нс, нестабильность срабатывания ≤ 2 нс. Считывание и сохранение изображений, полученных ПЗС камерами, осуществляется с помощью входящего в комплект камер программного обеспечения, позволяет проводить сбор данных только в ручном режиме. Данный тип канала регистрации показал низкий уровень шума на протонно-радиографических изображениях, но из-за использования высоковольтной схемы питания ЭО затвора производил высокий уровень электромагнитных наводок на приборы системы диагностики и управления установкой ПУМА. В результате данный тип канала регистрации был отвергнут. Второй тип канала регистрации был создан на основе ПЗС камер S2C-077FO-G фирмы СТК СИЛАР (рисунок 2.9) с установленными модулями усилителей яркости на основе микроканальных пластин. В ПЗС камере S2C-017APF-K2 используется ПЗС матрица ELCM1077APF (14-бит, размер пикселя 16x16 мкм, число эффективных пикселей 1040x1160) с принудительным охлаждением элементом Пельтье. В качестве формирователя экспозиции в конструкции этих каналов регистрации использован электронно-оптический преобразователь-усилитель на основе микроканальной пластины фирмы Photonis-DEP с фиксированным временем экспозиции 100 нс. Запуск ПЗС-матриц и ЭО-затворов камер S2C-077FO-G осуществляется генератором задержанных импульсов через оптоволоконный преобразователь.



Рисунок 2.9 – Фотография ПЗС камеры S2C-077FO-G с установленным ЭО усилителем и затвором

Второй тип канала регистрации показал приемлемый уровень шумов и не производил электромагнитных наводок на остальные приборы установки ПУМА, данный тип канала был выбран в качестве основного для создания четырехканальной (отдельный канал регистрирует только один банч пучка протонов) системы регистрации протонно-радиографических изображений. Интерфейс всех ПЗС камер – оптоволоконный с LC разъемами, подключение к персональному компьютеру осуществляется с помощью специализированных PCI-адаптеров. Синхронизация запуска каналов регистрации осуществляется от восьмиканального генератора временных задержек Stanford DG645 (с точностью временной привязки 1 нс), причем синхронизация запуска экспозиций ПЗС-матриц осуществляется за 10 мкс до начала экспозиций ЭО-затворов и соответственно момента прихода пучка протонов. На рисунке 2.10 приведены фотографии 4-х канальной системы регистрации, установленной на линии транспортировки пучка установки ПУМА. Для снижения уровня радиационного фона ПЗС камеры размещаются на удалении более 1 м от оси прохождения пучка. В оптической схеме системы регистрации были использованы объективы Nikon AF VR-Nikkor 80-400mm. Крепление камер осуществлялось штативными головками Manfrotto-405 имеющими шесть степеней свободы перемещения, что существенно упрощает настройку оптической схемы системы регистрации. Для формирования изображения использовался сцинтиллятор LSO кристалл диаметром 80 мм, толщиной 2.7 мм, время высвечивания 40 нс.

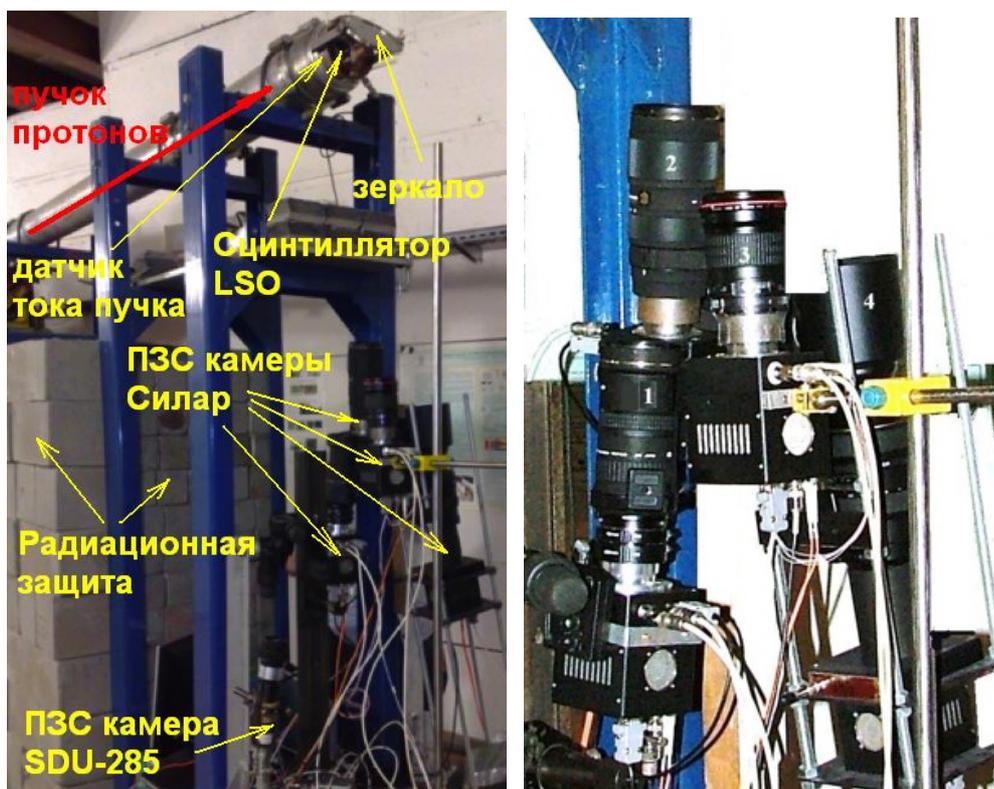


Рисунок 2.10 – Фотография 4-х кадровой системы регистрации радиографических изображений. Слева – обзорная фотография системы регистрации, установленной на установке ПУМА, справа - четыре ПЗС камеры Силар S2C-077FO-G.

Изображение на ПЗС-камеры направлялось через зеркало диаметром 130 мм, изготовленное на основе металлизированной майларовой фольги толщиной 200 мкм, что уменьшало уровень наведенной активности в зоне установки системы регистрации. Перед ПЗС камерами, для защиты от нейтронного потока устанавливалась бетонная защита толщиной 1 м и слой свинцовых кирпичей толщиной 50 мм.

На установке ПУМА проводилось тестирование четырех кадровой системы регистрации с использованием статических тест-объектов, устанавливаемых во взрывозащитную вакуумную камеру. На рисунке 2.11 приведена фотография тест-объекта (решетка собранная из полосок алюминия, суммарной толщиной 3мм), позволяющего оценить пространственные искажения получаемых изображений.

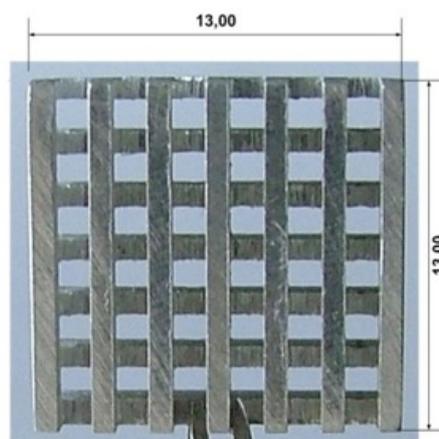


Рисунок 2.11 – Фотография (размеры приведены в мм) тест-объекта “решётка” из алюминия толщиной 3мм.

Из радиографических изображений на рисунке 2.12 можно сделать вывод о незначительных пространственных искажениях изображения тест-объекта. Пространственное разрешение оптической части схемы системы регистрации составляет ~ 10 мкм.

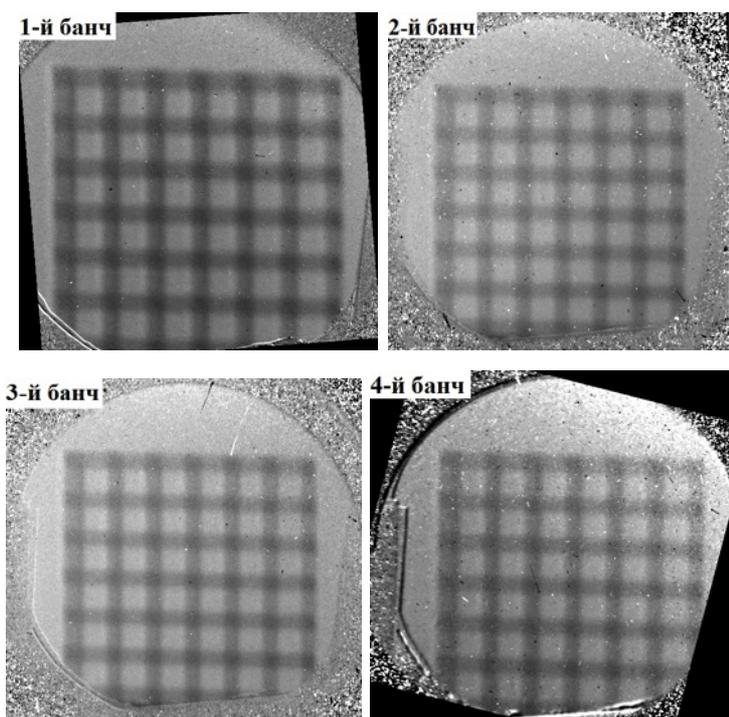


Рисунок 2.12 – Изображения статического тест объекта “решётка”, полученное с четырех каналов системы регистрации для четырех последовательных банча пучка протонов.

2.3.3 Взрывозащитная вакуумная камера

Для проведения экспериментов с динамическими объектами, использующими взрывчатые вещества, изготовлена и испытана вакуумная взрывозащитная камера, аттестованная для многократного применения ВВ массой до 100 г в тротиловом эквиваленте. Диаметр ВЗК камеры 0.8 м. Рабочий вакуум в камере 10^{-3} торр. ВЗК камера снабжена системой фильтрации газообразных продуктов срабатывания динамических мишеней. Для дистанционного позиционирования исследуемых статических объектов был разработан трех координатный вакуумный манипулятор, устанавливаемый в ВЗК камеру. На рисунке 2.13 показана фотография ВЗК камеры и манипулятора.

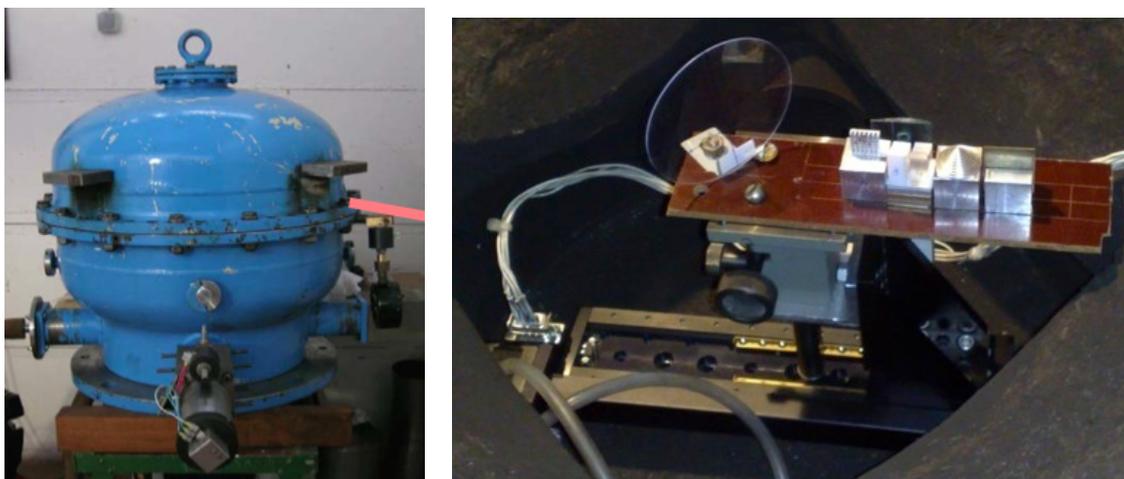


Рисунок 2.13 - Взрывозащитная вакуумная камера ВЗК для исследования динамических объектов. Слева фотография камеры ВЗК. Справа вакуумный манипулятор для позиционирования статических объектов внутри ВЗК.

Манипулятор обеспечивает смену и регулировку положения статических объектов (поперечное и вертикальное перемещение с диапазоном 100 мм с точностью 5 мкм) и регулировку по углу для статических и динамических объектов (шаг поворота 0.6 мин). Манипулятор создан с использованием линейных актуаторов 8MT175-200 фирмы Standa. Вращательная координата реализована с помощью вакуумного ввода типа Вильсон (защищенного массивным листом стали) с установленным снаружи вакуумной камеры линейным манипулятором 8MT175-200, что

позволяет вращать исследуемые динамические объекты без опасности разрушения конструктива манипулятора от взрывных процессов. Диапазон вращения $\pm 20^\circ$. При исследовании статических объектов в ВЗК камеру устанавливается двухкоординатный манипулятор (рисунок 2.13 справа). Такой манипулятор позволяет загружать в ВЗК камеру одновременно до 8 исследуемых объектов с характерным размером 20 мм.

Из-за высокой активации коллиматора в процессе проведения протонно-радиографических экспериментов, смена коллиматора и установка сцинтиллятора в плоскости Фурье производится с помощью дистанционного вакуумного манипулятора, созданного на основе шагового двигателя FL57STH76-2804A с контроллером SMD3.0.

2.3.4 Лазерный интерферометр VISAR

Протонно-радиографические измерения позволяют с высоким разрешением определить пространственное распределение плотности вещества и его динамические характеристики при ударно-волновом нагружении. Уравнения гидродинамики ударно-сжатых сред [30,31] позволяют вычислить на основе получаемых в радиографических экспериментах данных ряд других важнейших параметров состояния вещества, в частности, распределение в нем давления и массовой скорости. Однако для повышения точности определения данных характеристик, а также получения дополнительной информации о механических и кинетических свойствах ударно-сжатого вещества, одновременно с протонно-радиографическими экспериментами желательно проводить непрерывную во времени регистрацию давления или массовой скорости. С этой целью можно использовать методы измерения характеристик ударных волн, возникающих в преградах из эталонных материалов, находящихся в плотном контакте с исследуемыми объектами. Характер изменения амплитуды ударной волны в процессе

распространения в преграде однозначно связан с формой профиля давления или массовой скорости на контактной границе с экспериментальной мишенью [30].

Из всех существующих на сегодняшний день методов непрерывной регистрации ударных профилей массовой скорости наиболее универсальными являются безконтактные дистанционные методы с использованием лазерного интерферометра. Исходя из этого, для ударно-волновых экспериментов, проводимых на установке ПУМА был разработан лазерный интерферометр VISAR (Velocity Interferometer System of Any Reflector) [32], позволяющий измерять скорость движения поверхности широкого класса исследуемых объектов. На рисунке 2.14 показана схема интерферометра VISAR.

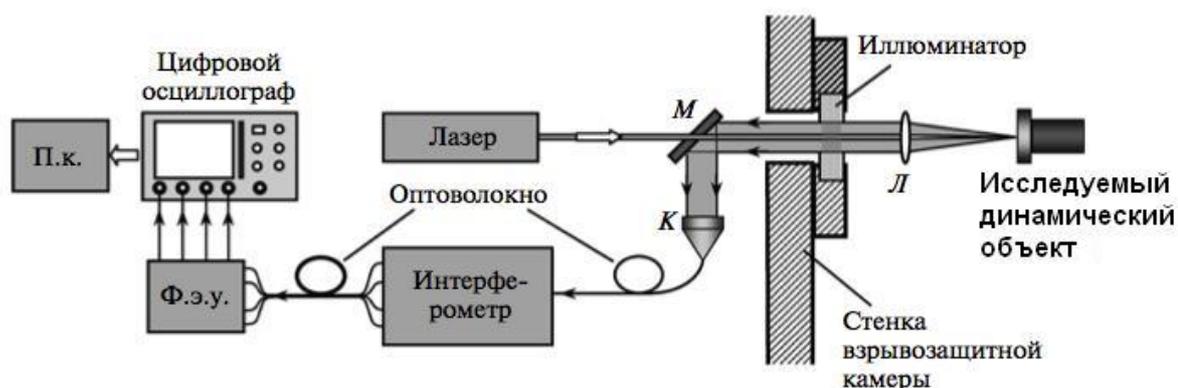


Рисунок 2.14 – Схема подключения интерферометра VISAR для измерения массовой скорости динамических объектов в составе установки протонный микроскоп ПУМА. (Л- линза, М – зеркало с отверстием, К- оптоволоконный коллиматор)

В основу VISAR положен модифицированный вариант интерферометра Push Pull VISAR[33]. Конструктивно VISAR состоит из трех частей, оптически связанных между собой оптоволоконными кабелями: лазера и оптической системы транспортировки и сбора отраженного от поверхности объекта излучения; оптического блока интерферометра и модуля фотодетектирования (фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)). Интерферометр и система фоторегистрации вынесены из экспериментального зала для обеспечения безопасности персонала во

время проведения экспериментов. В качестве зондирующего используется излучение непрерывного одночастотного твердотельного лазера на кристалле $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с внутривибраторной генерацией второй гармоники ($\lambda = 532 \text{ нм}$) мощностью 50 мВт (ширина спектральной линии $<5 \text{ МГц}$, уровень оптических шумов $\sim 0.1\% \text{ RMS}$). Излучение через отверстие в зеркале (М на рисунке 2.14) и иллюминатор вводится во взрывозащитную камеру ВЗК и отражается от поверхности исследуемого динамического объекта. Для обеспечения надежной герметизации иллюминатора при проведении взрывных экспериментов используется сборка из двух стеклянных пластин толщиной 10 мм. Оптические элементы, расположенные внутри камеры, разрушаются взрывной волной и являются расходным материалом. Юстировкой положения линзы (Л на рисунке 2.14). ($\text{Ø}20 \text{ мм}$, фокусное расстояние $f = 100 \text{ мм}$), расположенной на расстоянии, близком к фокусному, от поверхности динамического объекта, добиваются максимально возможной коллимации отраженного излучения в параллельный пучок. Размер светового пучка, выходящего из камеры, соответствует апертуре линзы и существенно превосходит размер отверстия в зеркале М. Благодаря этому большая часть собранного света отражается зеркалом и направляется в оптоволоконный коллиматор (К на рисунке 2.14). Ввод излучения в интерферометр, образованный зеркалами M_1-M_3 (рисунок 2.15), осуществляется через коллиматор F220FC-543 (Thorlabs). За счет введения в одно из плеч интерферометра, образованное зеркалами M_1, M_2 , оптической линии задержки ЛЗ время двукратного прохождения света в этом плече больше, чем в плече M_2, M_3 .

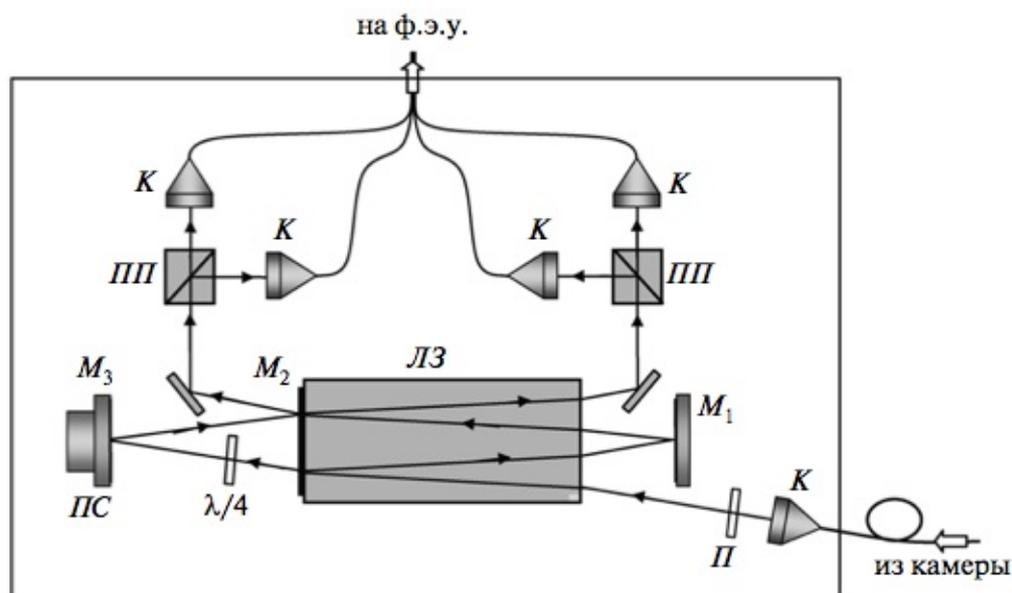


Рисунок 2.15 – Схема интерферометра VISAR (К – оптоволоконный коллиматор, M_1 – M_3 – зеркала интерферометра, ЛЗ – линия задержки, ПС – пьезоэлектрический сдвигатель, ПП – поляризационная призма, П – поляризатор, $\lambda/4$ – четвертьволновая фазовая пластинка).

При изменении скорости отражающей поверхности исследуемого динамического объекта интерферирующие на делительном зеркале M_2 волны за счет временной задержки в ЛЗ отличаются по частоте. Изменение интенсивности света I на выходе из интерферометра связано с изменением скорости отражающей поверхности V гармонической зависимостью [32], подобной аппаратной функции традиционного двухлучевого интерферометра:

$$I(t) = I_0 \cos(\varphi(t)) \quad (8)$$

где

$$\varphi(t) = \left[\frac{8\pi l_d \left(n - \frac{1}{n} \right) (1 + \delta)}{c\lambda} V(t) \right]$$

I_0 – интенсивность входящего в интерферометр света, λ – исходная длина волны лазерного излучения, δ – поправочный коэффициент, учитывающий хроматическую дисперсию в материале оптической линии задержки, c – скорость света в вакууме; l_d – длина ЛЗ; n – показатель преломления материала ЛЗ.

Линия задержки выполнена из стекла К8 и представляет собой параллелепипед длиной 100 мм с гранями 50 × 50 мм. Для такой длины ЛЗ масштабный коэффициент интерферометра, т.е. изменение скорости на один период интерференционной полосы, составляет 488 м/с. В ударно-волновых экспериментах массовая скорость может изменяться в широком диапазоне значений. В этом случае, за счет доплеровского сдвига относительная разность фаз электромагнитной волны в плечах интерферометра варьируется в интервале от долей одного периода до нескольких интерференционных полос. Из-за того, что регистрируемый интерференционный сигнал линейно зависит от амплитуд зондирующего и опорного пучков, вариации этого произведения во времени могут быть ошибочно приняты за изменения фазового сдвига. Устранить существующие трудности позволяет квадратурная методика [32] фотоэлектрической регистрации, имеющая однородную дифференциальную чувствительность во всем диапазоне измерений. Для ее реализации необходимо сформировать два интерференционных измерительных канала, сигналы в которых сдвинуты по фазе друг относительно друга на четверть периода. В разработанном интерферометре сформировано две пары квадратурных каналов, что позволяет вдвое повысить уровень сигнала и значительно снизить уровень оптического шума. Интенсивность в каждом из каналов будет описываться как:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 \sin 2\pi N(t) + A(t) \\
 I_2 &= I_0 \cos 2\pi N(t) + A(t) \\
 I_3 &= -I_0 \sin 2\pi N(t) + A(t) \\
 I_4 &= -I_0 \cos 2\pi N(t) + A(t)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Тогда восстановление значения массовой скорости производится как:

$$V(t) = \frac{c\lambda}{8\pi d_d (n - 1/n)(1 + \delta)} \operatorname{arctg} \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4}
 \tag{10}$$

В условиях реального эксперимента со слабо отражающими диффузными поверхностями из 50 мВт исходной мощности лазера к фотодетектору подводятся лишь доли микроватт. При таких малых интенсивностях регистрировать сигналы с необходимым отношением сигнал/шум возможно только с использованием фотоэлектронных умножителей в токовом режиме. Электрические сигналы с ФЭУ регистрируются на цифровой осциллограф LeCroy WR 44Xi с полосой пропускания 400 МГц и частотой дискретизации 5 ГГц. Обработка сигналов интерферометра проводится на персональном компьютере по специализированной программе [32].

Испытания интерферометра VISAR проведены на установке ПУМА, где проведена серия экспериментов по изучению ударно-волнового нагружения металлических мишеней. На рисунке 2.16 представлены результаты эксперимента по метанию круглой алюминиевой пластины диаметром 20 и толщиной 2 мм при помощи компактного взрывного генератора плоских ударных волн. На рисунке 2.16а,б показаны протонно-радиографические изображения статической и динамической мишени соответственно. На рисунке 2.16а внизу изображено положение пластины, запрессованной в массивное металлическое кольцо до начала движения. На рисунке 2.16б сверху изображена та же пластина, разогнанная взрывным генератором, снизу – разлет продуктов взрыва и движение кольца. Второй кадр соответствует моменту времени 4.75 мкс от начала движения пластины. За это время свободная поверхность пластины сместилась на 11 мм, что дает среднюю скорость ее полета на данной базе 2.3 км/с. На рисунке 2.16в представлена осциллограмма сигнала по двум квадратурным каналам интерферометра. Информативная длина записи квадратурных сигналов ~ 2.5 мкс ограничивается временем, в течение которого отраженное от объекта излучение поступает на вход интерферометра. Обычно это время лимитируется моментом разрушения динамического объекта. При проведении этих экспериментов ФЭУ

находились в экспериментальном зале и были подвержены воздействию вторичных частиц от банчей пучка протонов. Поэтому на осциллограмме через 5.75 и 6.25 мкс от начала записи присутствуют два импульса от пучка, что позволяет осуществить взаимную временную привязку двух экспериментальных методик (интерферометрия и протонная радиография). На рисунке 2.16г представлена зависимость скорости полета пластины от времени, полученная в результате программной обработки записанных интерференционных сигналов. Характерный “ступенчатый” вид этой зависимости определяется циркуляцией волн сжатия и разрежения в алюминиевой пластине, приводящей к ее ступенчатому разгону. Максимальная скорость разгона пластины составила 2700 ± 40 м/с. Подробное описание конструкции VISAR приведено в работе [32]. Интерферометр VISAR позволяет измерять скорости свободной поверхности объектов в ударноволновых экспериментах с погрешностью ≤ 10 м/с во всем диапазоне достигаемых в эксперименте скоростей (до 20 км/с). Временное разрешение ограничивается быстродействием используемого ФЭУ и составляет 2.5 нс.

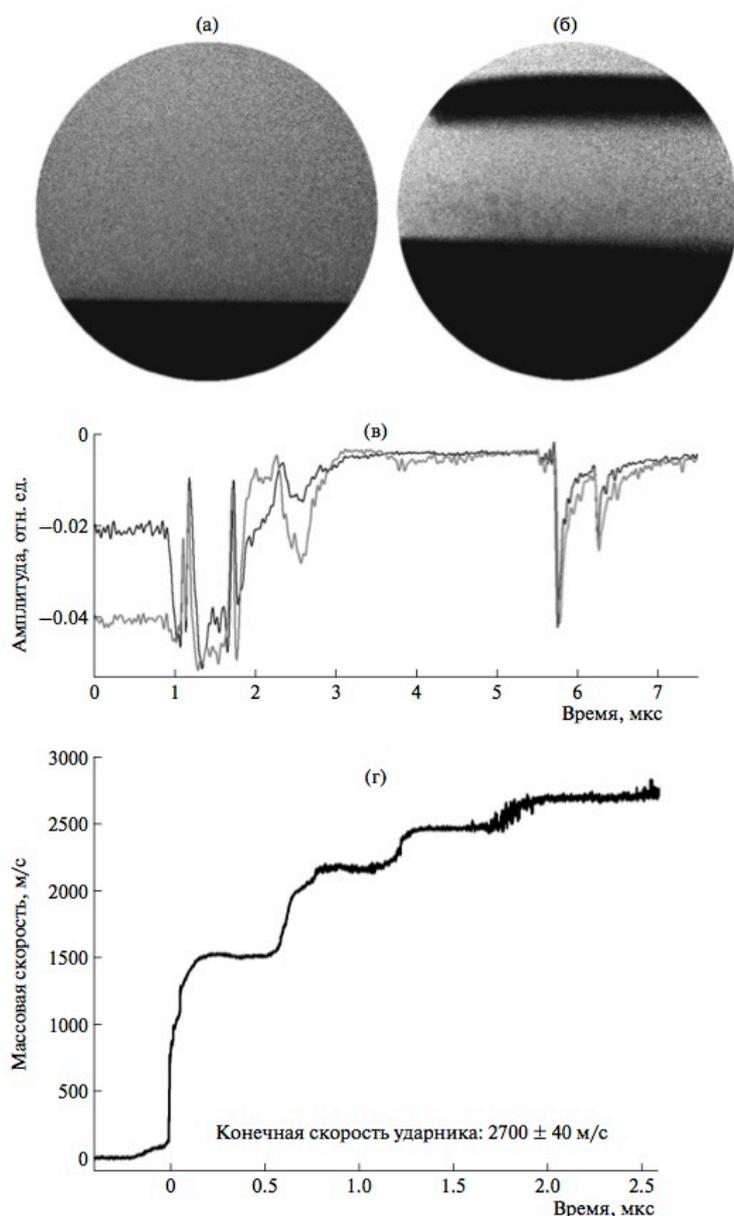


Рисунок 2.16 – Результаты тестового эксперимента по метанию алюминиевой пластины взрывным генератором плоских ударных волн: а – протонно-радиографические изображения статической мишени; б – той же пластины через 4.75 мкс от начала движения; в – осциллограмма сигнала по двум квадратурным каналам интерферометра; г – зависимость скорости свободной поверхности пластины от времени.

2.4 Параметры установки ПУМА

Измерение предельного разрешения установки ПУМА выполнено [28] для статического объекта, представляющего собой латунную пластину толщиной 550 мкм (радиографическая толщина 0.46 г/см²), устанавливаемую перпендикулярно пучку протонов. Под

пространственным разрешением установки подразумевается размытие резкой границы изображения объект-вакуум, описываемое стандартным отклонением σ аппроксимирующего гауссового распределения. На рисунке 2.17 представлен профиль радиографического изображения края пластины. Линией показан результат аппроксимации профиля интегралом функции Гаусса. Полученное разрешение установки ПУМА, построенной по схеме протонного микроскопа с коэффициентом увеличения $K=4$, составляет $\sigma = (60 \pm 5)$ мкм для массовой толщины 0.46 г/см^2 .

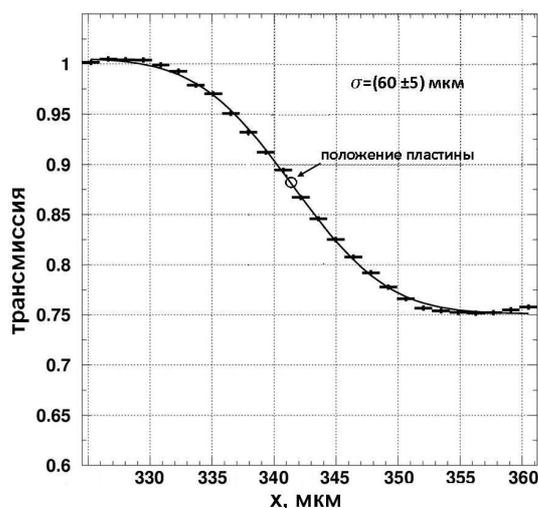


Рисунок 2.17. Профиль (в единицах трансмиссии) протонно-радиографического изображения края латунной пластины толщиной 550 мкм, полученного на протонном микроскопе ПУМА.

В таблице 2.1 приведены основные характеристики установки ПУМА. На рисунке 2.18 приведены для сравнения примеры радиографических изображений объекта массовой толщиной 17 г/см^2 , полученные на протонном микроскопе ПУМА и на ранее созданной радиографической установке в ИТЭФ без увеличения [15,16]. Для латунного кубика толщиной 20 мм (массовая толщина 17 г/см^2) пространственное разрешение установки ПУМА равнялось $\sigma = (115 \pm 5)$ мкм, что существенно превосходит предельное разрешение 300 мкм, полученное ранее на радиографической установке без увеличения изображения.

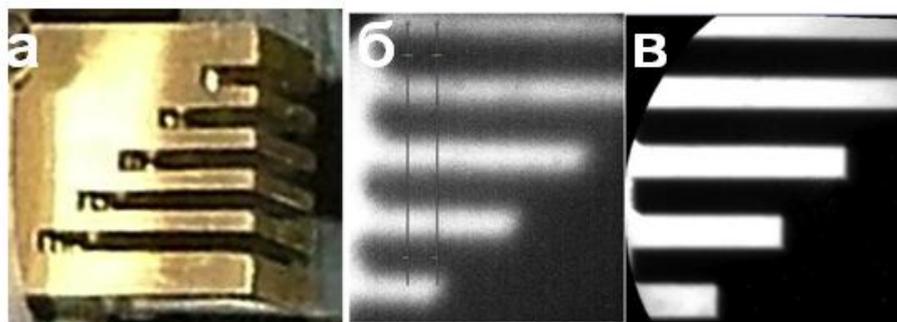


Рисунок 2.18. а – фотография латунного объекта “кубик с прорезями” толщиной 20 мм; б – протонно-радиографическое изображение объекта, полученное ранее на установке без увеличения, в – изображение полученное на протонном микроскопе ПУМА.

Таблица 2.1. Основные параметры протонного-микроскопа ПУМА

Наименование параметра	Значение
Энергия протонного пучка	800 МэВ
Пространственное разрешение изображений в зависимости от массовой толщины объектов	60 мкм (0.46 г/см ²) 115 мкм (17 г/см ²)
Коэффициент увеличения	4
Максимальная массовая толщина объекта	20 г/см ²
Поле обзора объекта	20 мм
Максимальная интенсивность пучка протонов	10 ¹² част/сброс
Количество банчей в сбросе пучка	4
Длительность одного банча/период	50 нс /250 нс
Частота сбросов пучка	0.25 Гц
Длина установки	~13 м
Разброс импульса входящего пучка протонов $\Delta p/p$	~ 10 ⁻³
Угол расходимости входящего пучка	0.5 мрад
Угловой акцептанс	9 мрад
Масса ВВ динамических объектов в эквиваленте ТНТ	да 100 г

Глава 3. Автоматизация управления установкой, сбора и обработки экспериментальных данных

Разноплановость проводимых на установке протонный микроскоп ПУМА экспериментальных исследований требует применение широкого круга детекторов, приборов и систем сбора экспериментальных данных. Для организации эффективной работы и получения результатов мирового уровня на экспериментальной установке необходимо было создать комплексную систему автоматизации КСА для получения и обработки экспериментальных данных, диагностики пучка частиц, управления элементами линии транспортировки пучка и обеспечения радиационной безопасности работы на установке ПУМА. Такая система должна быть универсальной, легко и быстро адаптироваться к различным требованиям и режимам проведения экспериментальных работ. При создании комплексной системы автоматизации экспериментов были решены следующие задачи:

- приведение к единой системе экспериментальных данных от различных приборов;
- автоматизация управления и контроля основных параметров установки;
- обеспечение возможности оперативного управления процессом измерения;
- выполнение обработки данных в режиме реального времени;
- ведение протокола эксперимента с фиксацией основных параметров в сети Ethernet.

3.1 Комплексная система автоматизации экспериментов

Комплексная система автоматизации [27] построена на основе автономных аппаратно-программных модулей (АПМ) объединяемых в рамках локальной вычислительной сети Ethernet. В рамках создания КСА создан набор из 15 универсальных аппаратно-программных модулей,

позволяющих считывать, сохранять и обрабатывать экспериментальные данные в режиме реального времени. Каждый АПМ включает в себя измерительный, диагностический или исполнительный прибор и соответствующую ему программу считывания и математической обработки данных. Измерительная часть системы КСА представляет собой кольцевую локальную вычислительную сеть из нескольких персональных компьютеров, соединенных сетью Ethernet. Передача информации от модуля к модулю в локальной сети осуществляется в соответствии с протоколом передачи данных TCP/IP Socket. В глобальную сеть на сайт <http://plasma.iter.ru> передается информация о текущем состоянии эксперимента, основных параметрах установки ПУМА и линии транспортировки пучка.

Система КСА состоит из следующих основных частей:

- подсистема контроля и управления экспериментом (ПКУЭ), предназначенная для организации автоматического считывания и обработки экспериментальных данных;
- микроконтроллерный блок управления сбросами пучка (МБУП) и синхронизации;
- подсистема управления магнитными элементами линии транспортировки пучка и диагностики пучка (ПУЭД) быстрого вывода с ускорителя;
- подсистема радиационной безопасности (ПОРБ);
- сервер КСА, служащий для хранения и визуализации в сети Интернет (сайт <http://plasma.iter.ru>) экспериментальных данных и параметров экспериментальной установки.

Программное обеспечение КСА, написано на языках программирования Delphi XE2, Python, C++ и базируется на нескольких персональных компьютерах, соединенных сетью Ethernet. Одним из преимуществ

системы КСА является возможность использования стандартного лабораторного и научного оборудования (осциллографы, ПЗС камеры, и т.п.), что существенно снижает стоимость аппаратного обеспечения эксперимента. На рисунке 3.1 показана функциональная схема комплексной системы автоматизации экспериментов.



Рисунок 3.1 - Функциональная схема подсистем комплексной системы автоматизации экспериментов КСА.

Вся информация об эксперименте поступает в пультовую, размещенную в радиационно защищенном помещении, (см. рисунок 3.2), где сосредоточены аппаратное и математическое обеспечение КСА и сервер КСА.

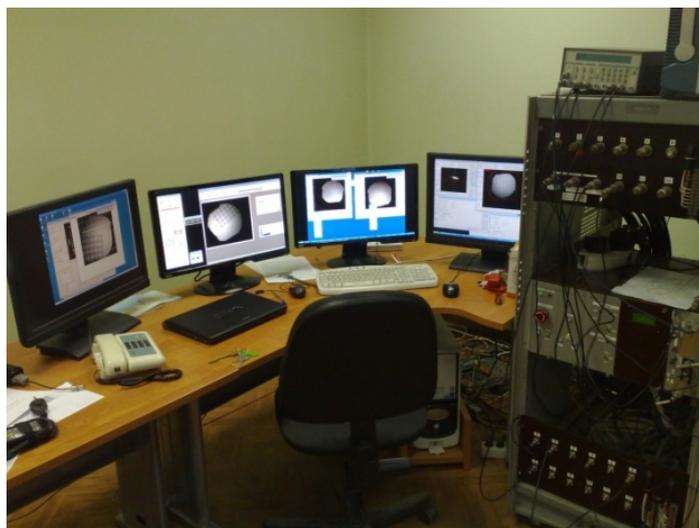


Рисунок 3.2 - Пультавая управления установкой ПУМА и проведения экспериментов.

3.1.1 Аппаратно программные модули

Одним из важных преимуществ созданной системы КСА является то, что на основе разработанного набора модулей АПМ построение новой конфигурации эксперимента занимает не более нескольких часов. Кроме того, за счет использования для обмена данными между модулями АПМ сетевого протокола TCP/IP Socket, возможно построение распределенных в рамках локальной сети Ethernet систем автоматизации с использованием различных операционных систем Windows, UNIX, Mac OS. В таблице 3.1 перечислены основные аппаратно-программные модули, разработанные автором диссертации и используемые в экспериментах и соответствующие им программы.

Таблица 3.1. Основные аппаратно-программные модули (АПМ) комплексной системы автоматизации экспериментов установки ПУМА

№	Назначение АПМ	Прибор	Программа
АПМ1	Управление сбросами пучка, синхронизация запуска диагностического оборудования	Блок МБУП	Beam Control
АПМ2	Считывание, обработка и сохранение высокочастотных сигналов от детекторов, измерение интенсивности	Цифровые осциллографы Tektronix TDS,DPO2000-4000	PTEK

	пучка	серии и Lecroy	
АПМ3	Формирование программируемых задержек и импульсов	Генератор импульсов Stanford DG-535, DG645	PGEN
АПМ4	Оцифровка свечения сцинтилляторов, обработка изображений	ПЗС камеры SDU-285,415,429 (12 бит, экспозиция ≥ 5 мкс)	SDU-ITEP
АПМ5	Позиционирование мишеней и детекторов относительно пучка	Линейные и вращательные манипуляторы Standa, Nippon Bearing, MICOS GmbH	Stop-Tar, ITEP-STANDA, Robot HHT
АПМ6	Измерение дозы/тока пучка	Ионизационные камеры PTW, блок Unidose E	PTW-ITEP
АПМ7	Перемещение детекторов, мишеней по трем координатам, построение продольных и поперечных профилей пучка	3-х координатный манипулятор Standa	Fantom
АПМ8	Управление высоковольтными блоками питания	ВВ блок питания с модулем ЦАП L-CARD E14-440 D	Med-HV
АПМ9	Измерение вольт-амперных характеристик полупроводниковых детекторов	Keithley 237	RAPS-ITEP
АПМ10	Позиционирование постоянных магнитов в схеме протонного микроскопа в экспериментах по протонной радиографии	4-х координатный Манипулятор Nippon Bearing с контроллером L-CARD E14-140	PROTOM
АПМ11	Высокоточное измерение сигнала напряжения при измерении полей постоянных магнитов	Agilent 34972A	TERMORA
АПМ12	Управление магнитными элементами линии транспортировки пучка	Мультиплексоры системы контроля магнитными элементами	BeamControlUnit
АПМ13	Измерение давления в вакуумной камере	Pfeifer Vacuum measuring unit	PPRes
АПМ14	Контроль и индикация состояния аварийного блокиратора пучка BeamStop	Блокиратор пучка	BeamStop
АПМ15	Контроль радиационного фона	Гамма и нейтронные детекторы БДМГ-100, БДМН-100,	UIM-ITEP

При проведении экспериментальных работ используется широкий круг приборов, таких как осциллографы, генераторы, измерители токов и напряжений и т.п., причем эти приборы обладают различными интерфейсами RS232, GPIB, USB, LAN и производятся различными компаниями. Для подключения АПМ к приборам с разными интерфейсами был выбран универсальный драйвер VISA используемый в двух версиях: TekVISA для программ, разработанных на языках программирования C, Pascal, Java, LabView и pyVISA для программ на языке Python. Далее приведено описание основных аппаратно-программных модулей системы автоматизации установки ПУМА и экспериментов.

Модуль(АПМ2) считывания и обработки сигналов с осциллографов

Для считывания, сохранения и предварительной обработки сигналов, записываемых осциллографами (сигналы индукционного датчика тока пучка, сигналы синхронизации ПЗС камер и т.п.), была создана программа РТЕК обладающая следующими функциями:

- Считывание осциллограм, в цифровом виде;
- Сохранение данных осциллограмм на жестком диске персонального компьютера в текстовом формате файла удобном для открытия в программах Origin, Excel и др;
- Обеспечение автоматического считывание и сохранения данных на жестком диске сервера КСА с формированием имени файла включающего номер ID сброса пучка;
- Отображение на экране персонального компьютера поступающих и обработанных данных с одновременным выводом изображения на сайт plasma.itep.ru;
- Отображение, изменение и сохранение на жестком диске ПК, настроек осциллографа;

- Наличие протокола TCP/IP Sockets для пересылки обработанных данных в другие программы комплекса автоматизации экспериментов КСА.

Программа РТЕК написана на языке Delphi XE для работы в рамках операционной среды Windows XP/Windows 7. Программа протестирована со следующими моделями осциллографов: Tektronix TDS3034B, TDS3032, TDS2024B, DPO3054, DPO4054, Lecroy 9362. В качестве предварительной математической обработки реализованы процедуры расчета площади под кривой, с учетом выбора нулевого уровня и аппроксимация кривой функцией Гаусса. Для связи с осциллографами программа РТЕК использует модуль TekVISA. На рисунке 3.3 показано главное рабочее окно программы “Ptek”.

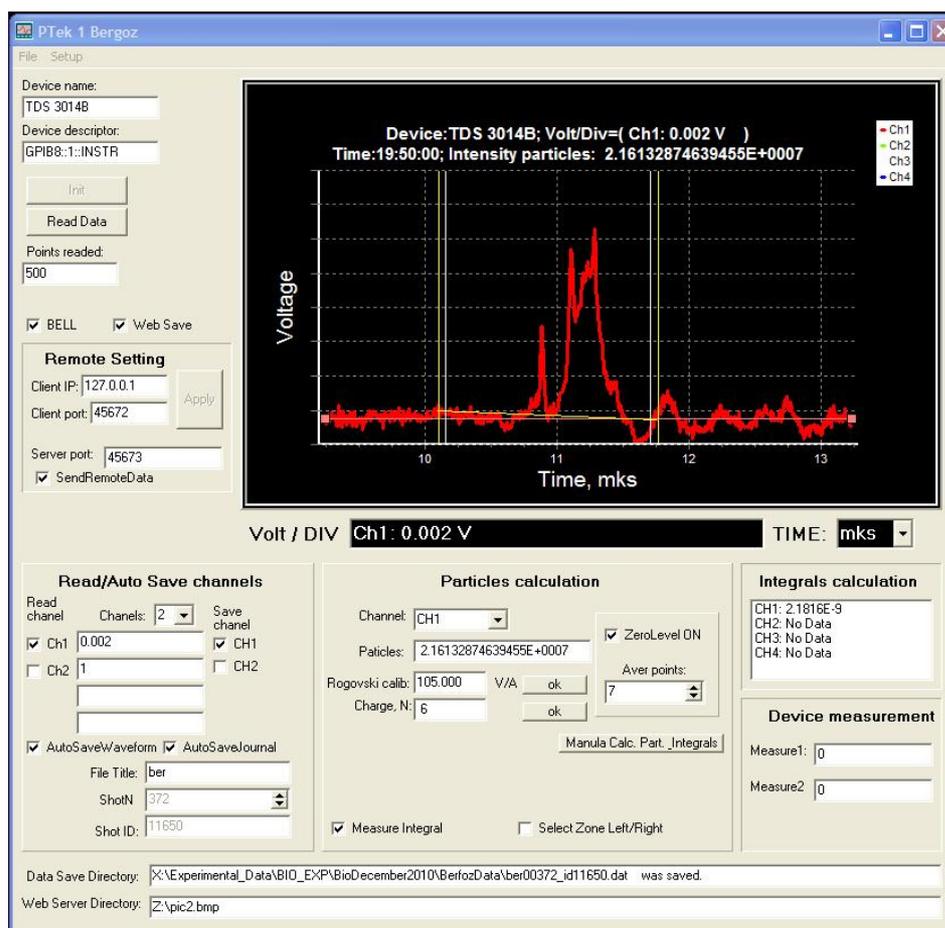


Рисунок 3.3 - Главное окно программы “РТЕК”.

При измерении интенсивности пучка используется токовый детектор пучка, пояс Роговского, FCT-082-05:1 фирмы Bergoz. Основные характеристики детектора показаны в таблице 3.2

Таблица 3.2 . Основные параметры датчика тока пучка FCT-082-05:1 Bergoz

Параметр	Величина	Единица измерения
номинальная чувствительность	5	В/А
время нарастания фронта	400	нс
допустимая частота	500	МГц
внутренний диаметр	82	мм
внешний диаметр	118	мм

Интенсивность пучка протонов изменяется в диапазоне от 10^8 до 10^{12} частиц за импульс. Для работы на малых интенсивностях пучка применяется усилитель ZFL-500 фирмы MiniCircuit (полоса 500 МГц), имеющий коэффициент усиления 20 дБ. Для повышения точности измерений, производимых с помощью пояса Роговского и усилителей, перед началом каждого эксперимента проводят калибровку измерительной системы с помощью цифрового генератора прямоугольных импульсов Stanford DG535 и образцового сопротивления 50 Ом. На рисунке 3.4 показана схема калибровки датчика тока пучка.

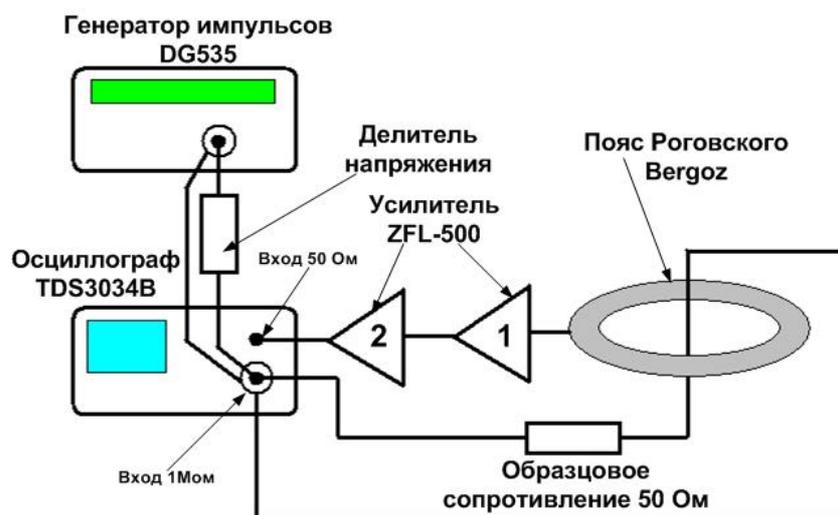


Рисунок 3.4 - Схема калибровки датчика тока пучка - пояса Роговского.

Получены следующие коэффициенты калибровки:

- Без усилителей $K=5 \text{ В/А}$
- Установлен один усилитель ZFL-500 $K=87 \text{ В/А}$
- Установлено два усилителя ZFL-500 $K=1415 \text{ В/А}$

При измерении интенсивности пучка, с пояса Роговского считывается форма импульса пучка в виде осциллограммы. На рисунке 3.5 показана характерная форма импульс пучка протонов зарегистрированного поясом Роговского FCT-082-05:1.

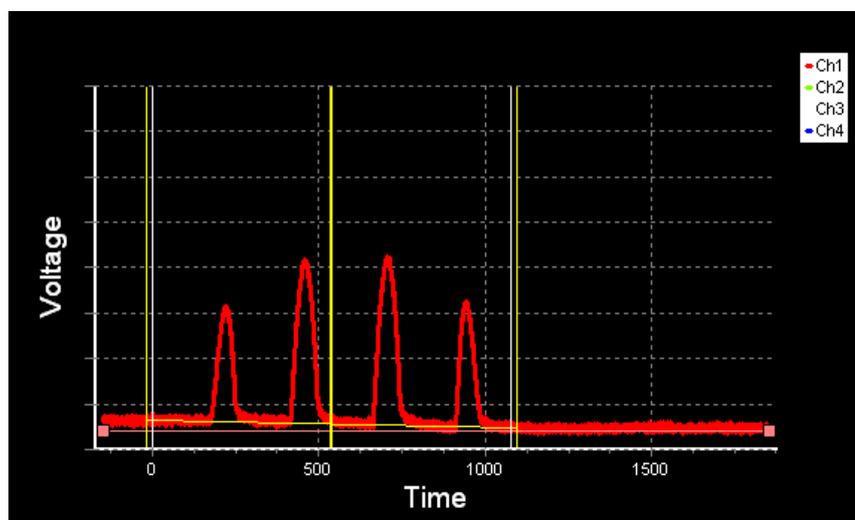


Рисунок 3.5 - Импульс протонного пучка, цена деления по времени 500 нс.

Для определения интенсивности импульса пучка зараженных частиц программа “РТЕК” снабжена модулем вычисления интенсивности. Для вычисления интенсивности пучка используется следующее выражение :

$$N = \frac{\left(\frac{Int}{K} \right)}{q_e Z} \quad (3.1)$$

где: N-интенсивность импульса пучка в частицах, Int-интеграл под кривой, рассчитанный в единицах вольт*секунда, $q_e=1.6*10^{-19}$ Кл- элементарный заряд электрона, Z – заряд иона пучка (для протона 1), K – коэффициент калибровки пояса Роговского с усилителем (В/А).

Программа РТЕК автоматически производит вычисление интенсивности пучка, при этом при вычислении интеграла учитывается возможность использования пьедестала нулевого уровня сигнала (рисунок 3.6).

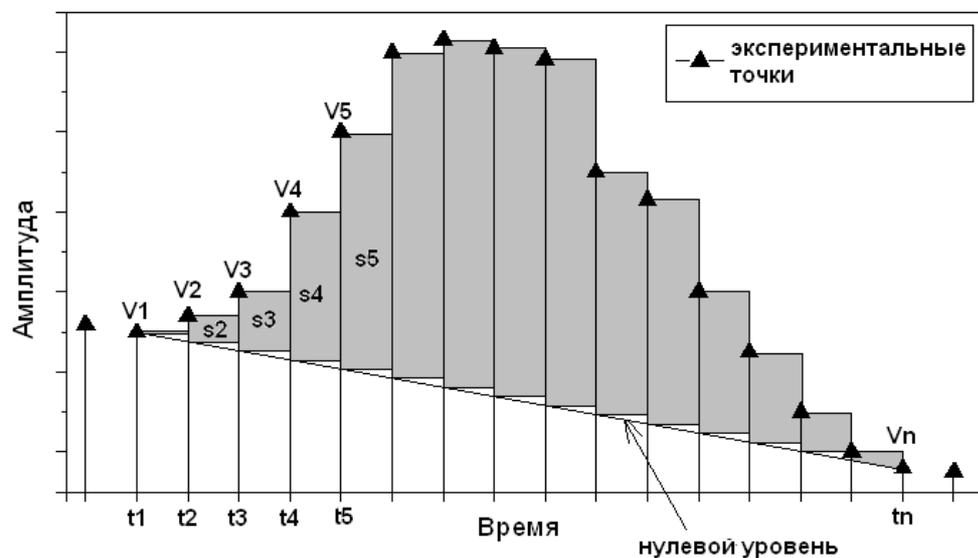


Рисунок 3.6 - Вычисление интеграла по исходным точкам осциллограммы.

Зона интегрирования (рисунок 3.6) расположена между точками V1 и Vn. В зоне интегрирования расположено n точек. Зона интегрирования разбита на n-1 локальную область s_1, s_2, \dots, s_{n-1} интегрирования. Определение нулевого уровня осуществляется по двум точкам: t_1, V_1 и

t_n, V_n . Выражение описывающее линию нулевого уровня $y_{zeroline} = a * x_{zeroline} + b$, где $a = (V_n - V_1) / (t_n - t_1)$; $b = V_1 - a * t_1$.

С учетом положения нулевого уровня площадь локальной области описывается как:

$$S_i = |(t_{i+1} - t_i)(V_i - (at_i + b))| \quad (3.2)$$

Суммарная площадь под кривой определяется как:

$$Int = \sum_{i=1}^{n-1} S_i \quad (3.3)$$

Интенсивность пучка заряженных частиц рассчитывается по формуле (3.1). Точность определения интенсивности описанным образом составляет ~10%, что определяется уровнем шумов усилительного каскада и особенностью работы пояса Роговского.

Модуль (АПМ1) для управления сбросами пучка и общей синхронизации

Для общей синхронизации комплексной системы автоматизации экспериментов и управления сбросами пучка с ускорителя ТВН-ИТЭФ был разработан микроконтроллерный блок управления пучком (МБУП)[27]. Разработанный блок используется как для экспериментов с применением протонного пучка, так и экспериментов с ионными пучками комплекса установок ПРИМА. Блок МБУП, служит для управления режимами сброса пучка частиц и синхронизации запуска измерительного оборудования. Блок обеспечивает отправку на пульт ускорителя сигнала запроса на сброс пучка, прием от ускорителя синхросигнала, соответствующего моменту прихода пучка, генерацию сигналов для запуска измерительных приборов, контроль уровня накопления ионов в накопительном кольце ускорителя (рисунок 3.7).

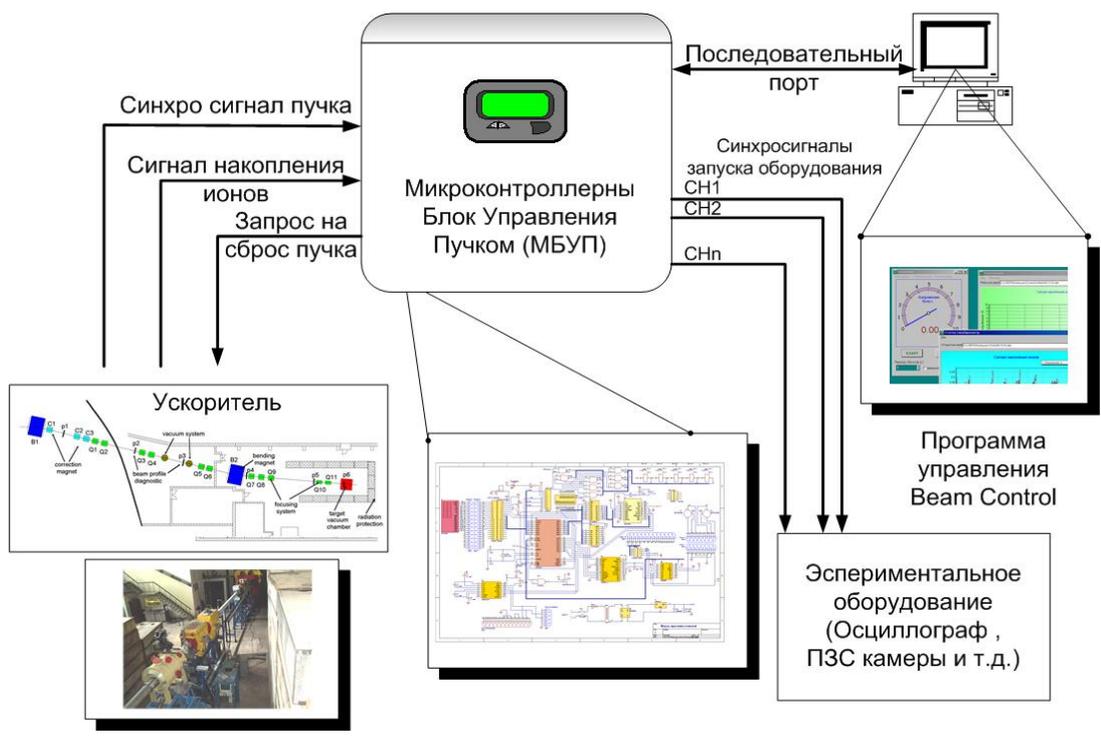


Рисунок 3.7 - Схема управления сбросами и синхронизации пучка.

Блок управления МБУП построен на основе микроконтроллера AT89S53 фирмы Atmel с встроенными программами, написанными на языке Си. МБУП снабжен знакосинтезирующим индикатором с управляющими кнопками и обеспечивает измерение уровня накопления пучка ионов в кольце ускорителя, регулировку периодичности сбросов пучка, изменение временных задержек запуска оборудования. Что позволяет использовать его в большинстве экспериментов на ускорителях с быстрым выводом пучка. Обмен данными между компьютером и МБУП осуществляется через последовательный порт USB или Ethernet. Для обеспечения программируемой задержки запуска диагностического оборудования блок МБУП снабжен двумя выходными каналами с программируемой задержкой относительно синхросигнала в интервале от 50 нс до 30 мс с точностью ± 25 нс при шаге 50 нс, и одним выходным каналом без задержки с точностью 1 нс (рисунок 3.8).

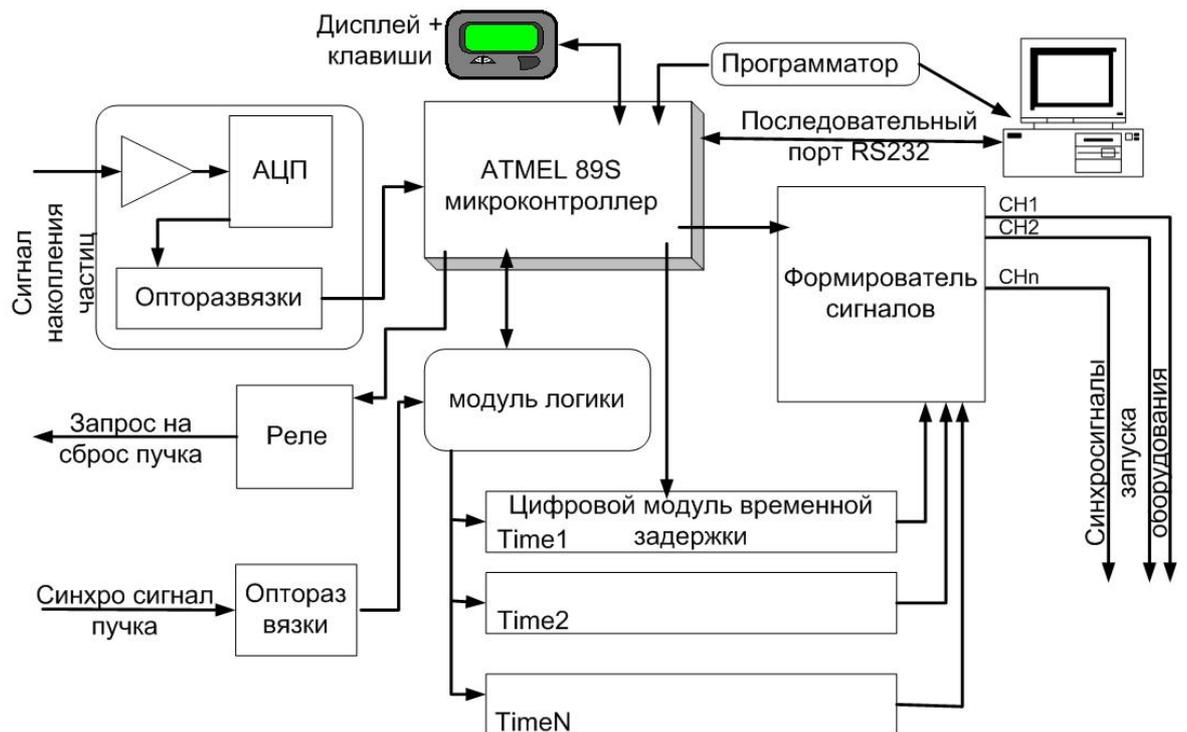


Рисунок 3.8 - Блок схема микроконтроллерного блока управления пучком МБУП.

Сигнал интенсивности пучка частиц (получаемый с пояса Роговского, установленного на ускорителе) в накопительном кольце ускорителя ТВН-ИТЭФ поступает на 12 битный АЦП (Аналого-Цифровой Преобразователь) AD7892 фирмы Analog Device, измеряющий входные напряжения в диапазоне 0-10 вольт. С помощью микросхем опторазвязок, АЦП подключается к микроконтроллеру. Питание АЦП и опторазвязок осуществляется от отдельного источника питания +12 В, что обеспечивает гальваническую развязку от сигнальных линий ускорителя. Питание всех остальных схем блока МБУП осуществляется от второго источника питания +5В. Синхросигнал пучка также передается в МБУП через опторазвязку. Синхросигнал пучка подается на входной модуль логики, схема которого показана на рисунке 3.9.

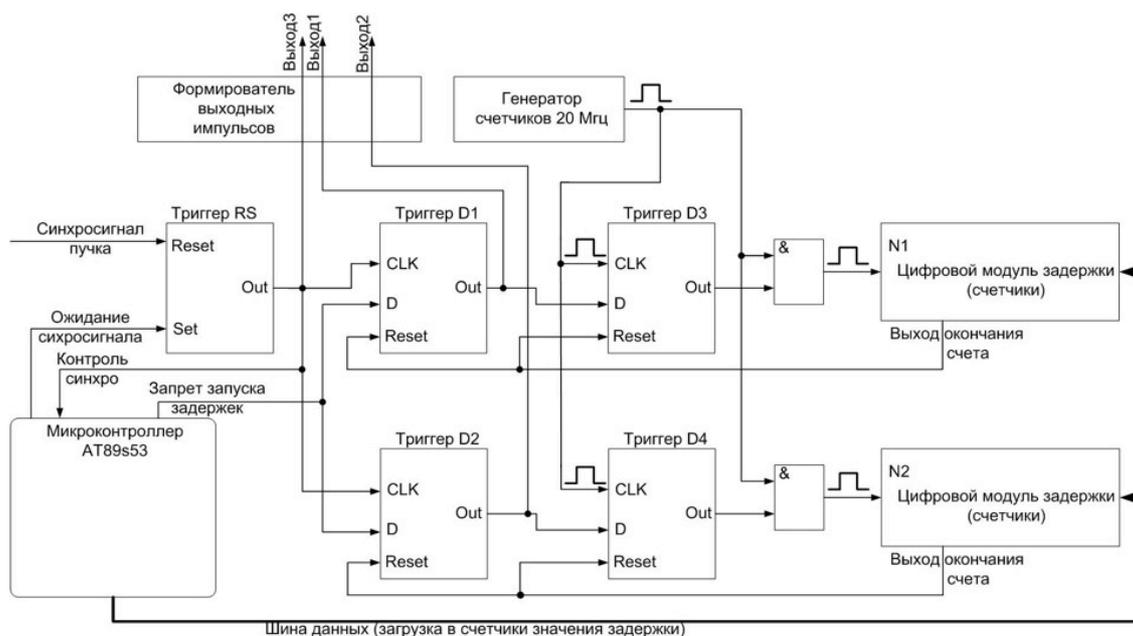


Рисунок 3.9 - Модуль логики блока МБУП.

Цифровые модули задержек, собраны на основе счетчиков К1533ИЕ7. Частота работы счетчиков 20 МГц, что соответствует минимальному шагу изменения задержки 50 нс. Модуль логики (рисунок 3.9) построен на основе четырех D-триггеров и одного RS-триггера, расположенных в трех микросхемах К1533ТМ2. На выходах Выход1, Выход2 формируются импульсы с передним фронтом, соответствующим синхросигналу и задним фронтом, имеющим требуемую задержку. Модуль логики обеспечивает однократное срабатывание по приходу пучка, т.е. даже в случае прихода следующего синхросигнала, запуска модуля логики произведено не будет, до тех пор, пока микроконтроллер снова не переведет RS-триггер в состояние set. На рисунке 3.10 показана временная диаграмма основных импульсов на выходах МБУП.

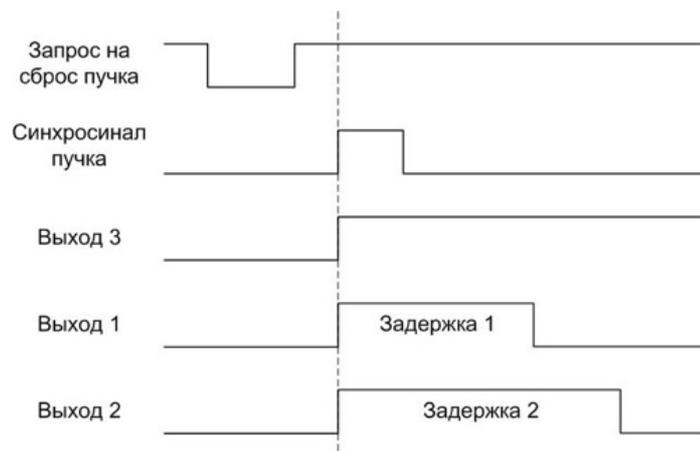


Рисунок 3.10 - Временная диаграмма импульсов управления сбросом пучка.

На рисунке 3.11 показан внешний вид блока МБУП.

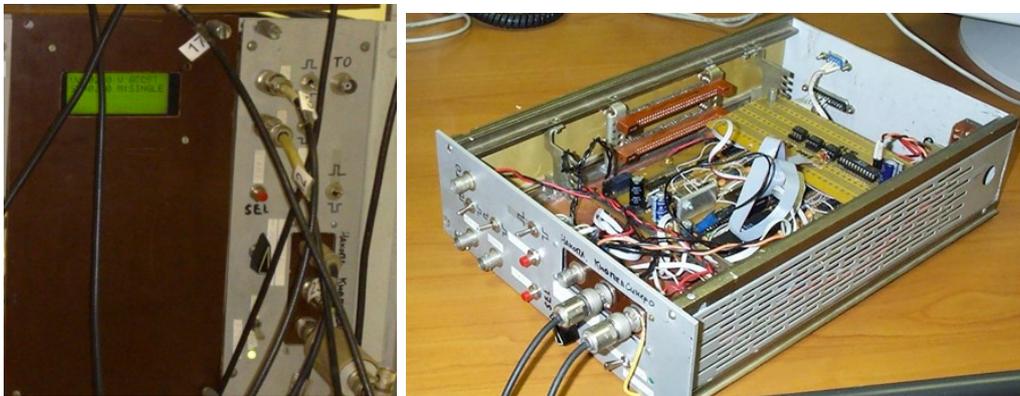


Рисунок 3.11 - Фотография блока МБУП. Слева – панель управления. Справа блок в открытом состоянии.

Для организации работы программ входящих в систему КСА необходимо синхронизировать работу программ с моментами сброса пучка. Программа BeamControl[27] позволяет управлять блоком МБУП и организовывать передачу информации о моменте сбросов пучка другим программам КСА. В процессе работы на экспериментах используются два режима программы Beam Control. Один служит для работы с протонным пучком и экспериментов по протонной радиографии, другой для ионного пучка и экспериментов по биофизике. На рисунке 3.12 показано главное окно программы “BeamControl”.

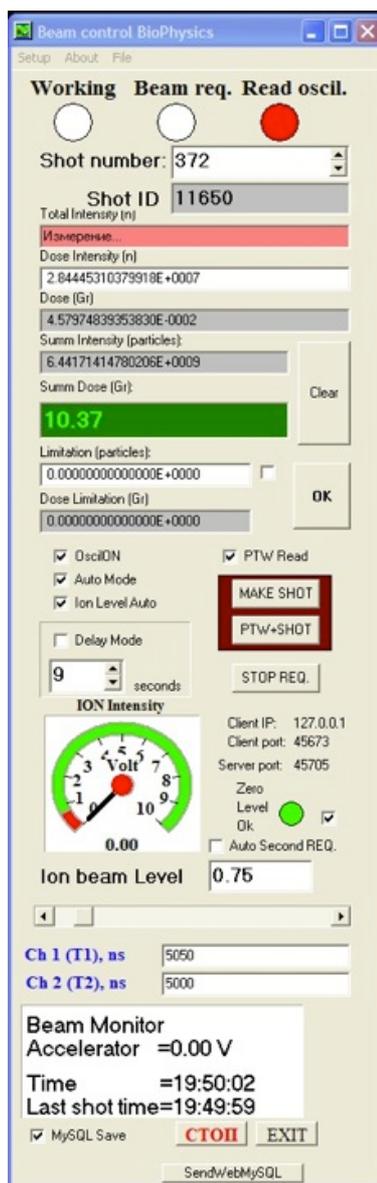


Рисунок 3.12 - Главное окно программы Veam Control.

Программа Veam Control написана на языке программирования Delphi XE2 для операционной системы Windows XP/7. Veam Control непосредственно обменивается данными с блоком МБУП и дублирует функциональные возможности блока. Программа Veam Control функционирует в семи основных режимах:

1. Ручной режим сброса пучка (вывод пучка из кольца ускорителя в линию транспортировки пучка) без отправки запроса другим модуля АПМ. В этом режиме при нажатии на кнопку “MAKE SHOT” в главном окне программы Veam Control происходит сброс

пучка, но не производится считывание данных из диагностических приборов. Данный режим используется для настройки пучка;

2. Ручной режим сброса пучка с посылкой данных удаленному модулю АПМ. При нажатии на кнопку “MAKE SHOT” также происходит сброс пучка, но после прихода синхросигнала происходит отправка запроса на считывание данных следующей программе АПМ в цепочке программ КСА. Адрес другой программы АПМ указан в главном окне программы. Далее программа находится в режиме ожидания данных от последней программы в цепочке программ АПК. В цепочке программ обязательно присутствует программа РТЕК, измеряющая интенсивность пучка. При пересылке данных от одной программы к другой эта информация передается вплоть до возвращения программе Beam Control, но следующего сброса пучка не производится;
3. Режим автоматического сброса пучка. При первом сбросе пучка программ BeamControl работает аналогично режимам 1,2. Но далее автоматически производится повторный сброс пучка и так далее, пока не будет нажата кнопка “Stop Req” в главном окне программы;
4. Режим сброса пучка по уровню накопления ионов. Этот режим позволяет организовать вывод пучка ионов с требуемой интенсивностью;
5. Режим работы программы для облучения исследуемых мишеней до требуемой дозы. Отключение автоматических сбросов и вывод сообщения об окончании облучения происходит при превышении накопленной дозы выше предельного значения, указываемого в меню программы;

6. Для организации работы приборов и детекторов с большим временем интегрирования, например ионизационных камер PTW с блоком Unidose E, в программе предусмотрен отдельный режим включаемый указателем “PTW Read”. В этом режиме непосредственно перед посылкой на ускоритель сигнала запроса на сброс пучка, программа BeamControl отправляет запрос на взведение (через TCP/IP Socket протокол) удаленной программе АПМ детектора. Далее производится сброс пучка аналогично режимам 1-5.
7. Для организации сбросов пучка с заданной задержкой между сбросами, что требуется для ограничения потока протонного пучка (частиц в минуту) в экспериментах по протонной радиографии, предусмотрен режим активируемый указателем “Delay Mode”. Сброс пучка в этом режиме производится как в автоматическом режиме, так и в ручном с задержкой между сбросами не менее значения указанного в поле “Delay Mode – seconds”

Модуль (АПМ4) для считывания и обработки изображений при настройке пучка

При проведении экспериментов, по взаимодействию пучков заряженных частиц с веществом, появляется необходимость проводить измерение поперечного профиля пучка. Для этой цели на пути пучка устанавливаются сцинтилляторы (пластиковые, сапфировые, керамические). Для визуализации изображения профиля пучка с регистратора используются видео и цифровые камеры, например ПЗС камеры. Для экспериментальных работ необходимо использовать стробируемые камеры с малым временем экспозиции (для уменьшения шума в изображении), так как длительность импульса пучка заряженных частиц не превышает одной микросекунды. Важным является

радиационная защита ПЗС камер от вторичного излучения появляющегося при прохождении заряженных частиц через регистратор или мишень. Радиационная защита обеспечивается двумя способами: во-первых, посредством удаленной установки ПЗС камеры, так как интенсивность вторичного излучения падает пропорционально квадрату расстояния до источника излучения. Во-вторых, с помощью установки защитного экрана из свинцовых или парафиновых кирпичей. Обычно ПЗС камера устанавливается на расстоянии ≥ 1 метра от регистратора и мишени, что требует установки увеличивающего оптического объектива. Для целей настройки пучка установки ПУМА были выбраны ПЗС камеры SDU-285 фирмы СпецТелеТехника, обладающие 12 битными аналого-цифровым преобразователем что соответствует значениям интенсивности в диапазоне 0-4095. В ПЗС камере SDU-285 используется ПЗС матрица SONY ICX285AL с максимумом по спектральной чувствительности в 520 нм и диапазоном 290-1100 (рисунок 3.13). Камера работает в диапазоне экспозиций 7мкс-4.5 мин, имеет 4 режима биннинга (объединение ячеек ПЗС матрицы для улучшения чувствительности) 2x2.3x3.4x4, разрядность аналого-цифрового преобразования 12 бит, пространственное разрешение 1392x1032 точек, питание и считывание камеры осуществляется через USB 2.0 интерфейс. Внутренняя задержка запуска камеры 0-1 мкм, джиттер запуска экспозиции 1 мкс.

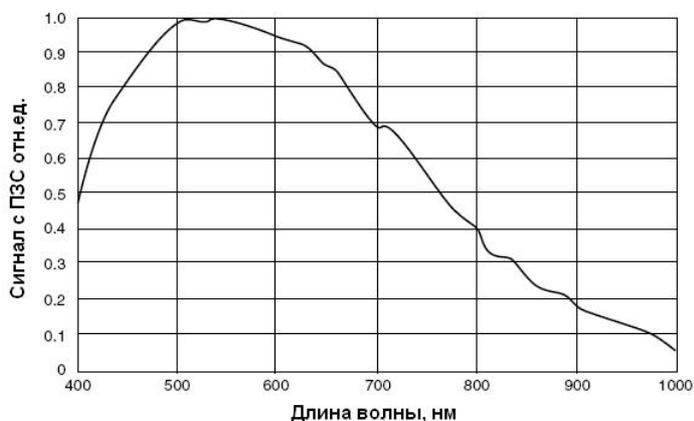


Рисунок 3.13 - Характеристика спектральной чувствительности матрицы ICX285AL.

Рыночная цена камеры SDU-285 ~1700\$ (для сравнения ближайший аналог фирмы PCO камера Sensicam qe имеет стоимость >15000\$). При построении системы диагностики пучка в линии транспортировки, требовалось использовать более десяти ПЗС камер одновременно, что определило выбор в сторону более дешевой камеры SDU-285. Для построения многокомпонентной системы, состоящей из нескольких ПЗС камер, разнесенных на значительном расстоянии друг от друга, были выбраны оптоволоконные гальванические развязки, производимые фирмой “СпецТелеТехника”, состоящие из двух USB трансиверов. Каждый трансивер транслирует данные из USB интерфейса в оптоволоконную линию и обратно. Трансиверы снабжены двумя FC разъемами для подключения оптоволоконного кабеля. К каждому трансиверу требуется подсоединять отдельный источник питания. В комплект поставки камеры SDU-285 входит программа Cam_View.exe, с помощью которой можно только записывать изображение с регистратора пучка и не предоставляется средств обработки данных. Кроме того, программа Cam_View.exe не позволяет полноценно использовать ее в составе комплекса автоматизации экспериментов из-за отсутствия сетевого интерфейса TCP/IP по передаче данных. Для автоматизированного считывания данных с камеры SDU-285 была разработана программа SDU-ITEP[27]. В программе SDU-ITEP реализованы следующие функции:

- Считывание изображений с ПЗС камеры, отображение изображения на экране персонального компьютера и сайте plasma.iter.ru;
- Сохранение полученного изображения на жестком диске компьютера в 16-ти битном формате TIFF файла;

- Автоматическое считывание и сохранение изображений на жестком диске ПК и сервере КСА, с формированием имени файл включающем номер ID сброса пучка;
- Построение вертикального и горизонтального профиля изображения в области выбираемой оператором;
- Аппроксимация построенного профиля изображения функцией Гаусса и вычисление ширины поперечного профиля пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях;
- Расчет среднего значения интенсивности свечения в области, выбранной оператором;
- Построение и сохранения маркера (координат заданной точки) для облегчения юстировки пучка при использовании более 2-х ПЗС камер;
- Наличие протокола TCP/IP Sockets для пересылки обработанных данных в другие программы комплекса автоматизации экспериментов КСА.

Для разработки была выбрана среда программирования Delphi XE. Рабочее окно программы SDU-ИТЕР показано на рисунке 3.14.

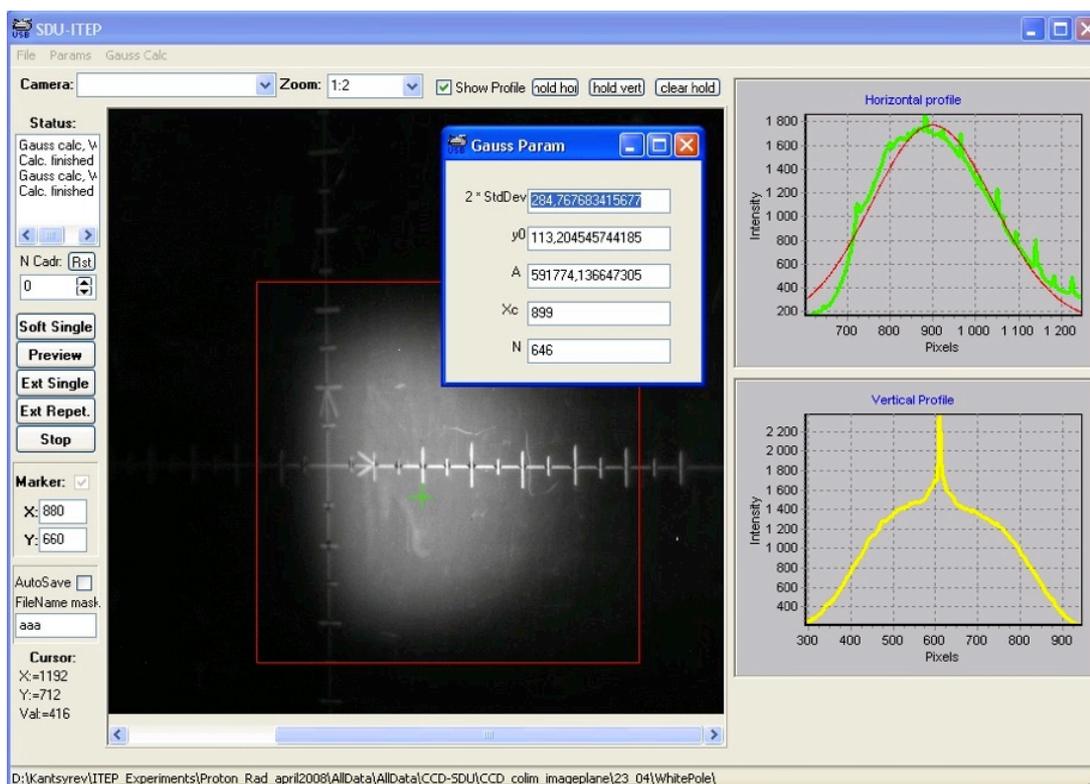


Рисунок 3.14 - Рабочее окно программы SDU-ITEP для работы с ПЗС камерой SDU-285.

В случае использования нескольких ПЗС камер необходимо запускать каждую программу из отдельной директории на жестком диске компьютера. Сразу после запуска программы осуществляется процедура связи с ПЗС камерой, с загрузкой параметров из камеры в программу. Уникальный номер ПЗС камеры отображается слева вверху на рабочем окне программы.

Модуль (АПМ10) для управления перемещением ПМК линз протонного микроскопа

Для управления перемещением ПМК квадрупольных магнитных линз в рамках системы КСА разработан аппаратно-программный модуль, состоящий из контроллера шаговых двигателей и программы PROTOM[28].

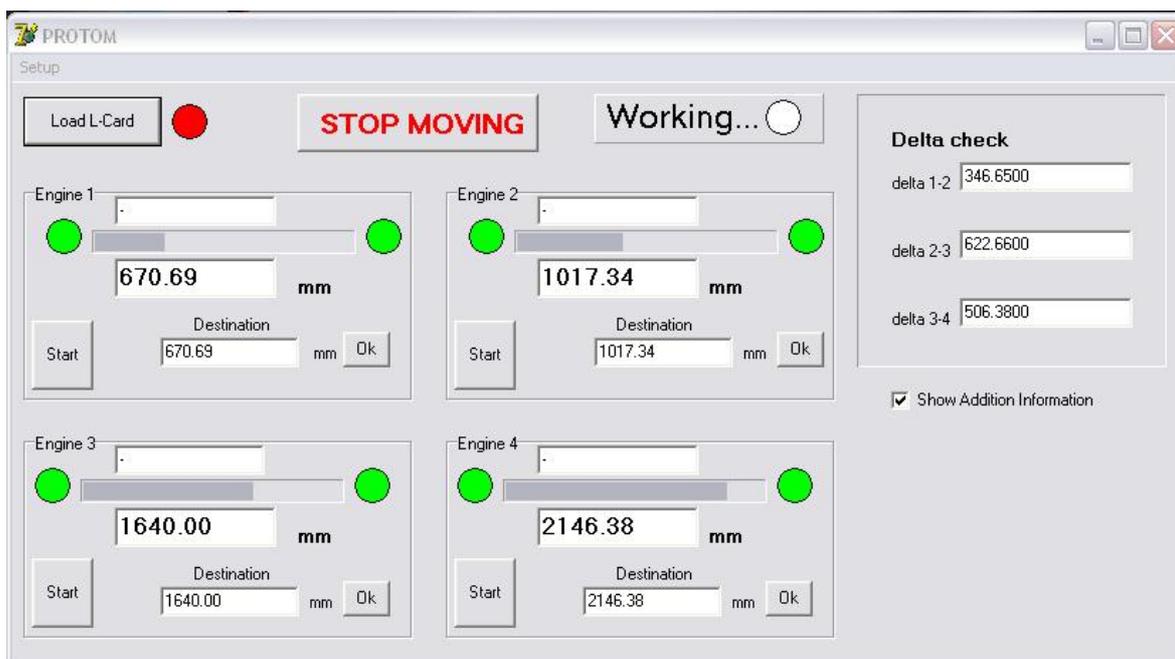


Рисунок 3.15 Главное меню программы PROTOM для управления перемещением ПМК линзами протонного микроскопа ПУМА.

В программе PROTOM (рисунок 3.15) имеется возможность управлять перемещением ПМК линз как в ручном режиме, заданием требуемого положения отдельной линзы, так и осуществлять автоматическую установку всех четырех ПМК линз согласно расчетным значениям, полученным в программе COSY Infinity. Перед началом эксперимента начальные координаты всех четырех ПМК линз уточняются относительно положения исследуемого объекта во взрывозащитной вакуумной камере. В случае автоматической установки положения ПМК линз, в диалоге программы PROTOM, задается энергия пучка протонов и далее используя, предварительно рассчитанные в программе COSY Infinity параметры производится автоматический расчет и установка координат ПМК линз.

3.1.2 Подсистема радиационной безопасности.

Для контроля радиационного фона в экспериментальном зале и пультовой эксперимента, обеспечения безопасности работы персонала и ограничения несанкционированного доступа в экспериментальный зал,

разработана подсистема радиационной безопасности (ПОРБ). Аппаратная часть подсистемы ПОРБ включает в себя: гамма детектор БДМГ-100 фирмы ООО НПП Доза, нейтронный детектор БДМН-100, счетный блок УИМ2-2Д, преобразователь интерфейса RS232-Ethernet фирмы МОХА 4120, разработанное устройство Beam_Stop (вакуумный механический блокиратор прохождения пучка с электронным управлением) (рисунок 3.16).

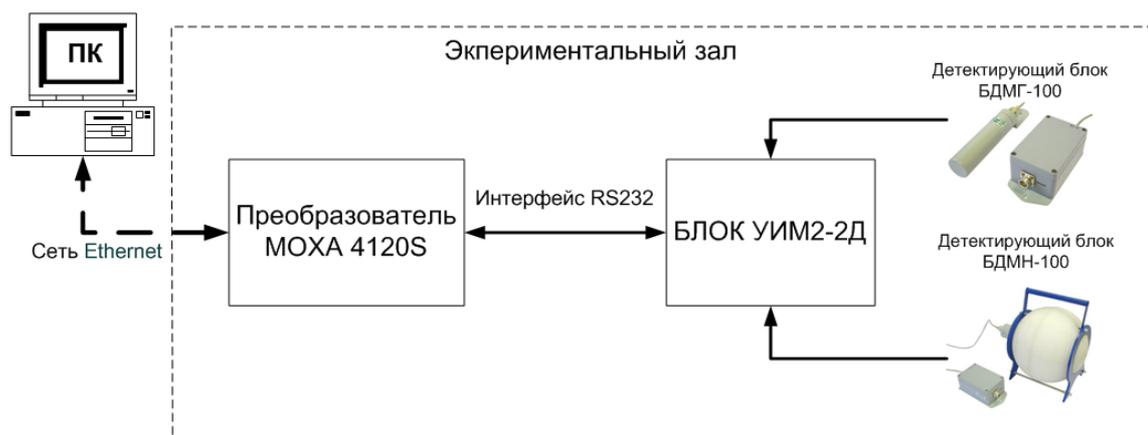


Рисунок 3.16 - Система дозиметрического контроля установки ПУМА.

Гамма и нейтронные детекторы с блоками регистрации УИМ2-2Д размещаются в экспериментальном зале и пульте управления в точках контроля фона. Измеренные значения радиационного фона передаются через сеть Ethernet в разработанную на языке Python программу UIM-ITER, обеспечивающую контроль допустимого радиационного фона. Программа UIM-ITER записывает значения радиационного фона в базу данных MySQL сервера КСА и веб сайт plasma.iter.ru. Программа UIM-ITER работает одновременно в двух режимах: непрерывного отображения радиоактивного фона на веб сайте plasma.iter.ru, с записью данных в журнал базы данных, и режиме фиксирования фона на момент сброса пучка с ускорителя.

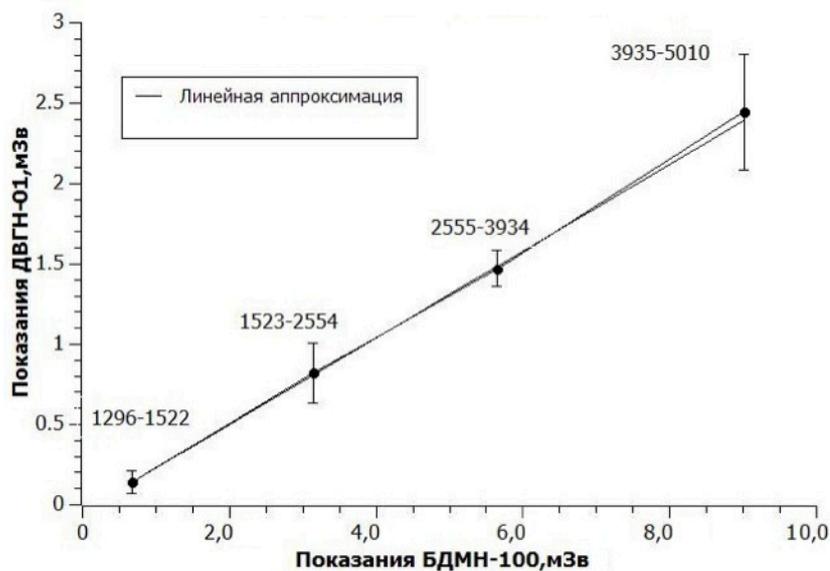


Рисунок 3.17 - Калибровочный график нейтронного детектора БДМН-100 полученный с использованием данных о дозе с образцовых персональных дозиметров ДВГН-01.

В режиме считывания значений нейтронного фона непосредственно после прихода пучка, проведена калибровка блока нейтронного детектирования БДМН-100 с использованием показаний индивидуальных калиброванных дозиметров ДВГН-01 (разработка Института Физики Высоких Энергий г. Протвино). Определенный коэффициент калибровки детектора БДМН-100 составил 3.7 ($F_{\text{бдмн}} = F_{\text{двгн}} * K$) (рисунок 3.17).

Для предотвращения незапланированного вывода пучка протонов из ускорителя в экспериментальный зал было изготовлено устройство Beam_Stop блокирующее прохождение пучка по линии транспортировки при несанкционированном входе в экспериментальный зал, превышении уровня радиационного фона или при работе персонала на установке. Устройство Beam_Stop, представляет собой массивный цилиндр из нержавеющей стали, устанавливаемый в вакууме на оси прохождения пучка частиц. Beam_stop располагается на значительном расстоянии от мишенной камеры в начальной части линии 510 транспортировки пучка. Металлический цилиндр устройства Beam_Stop устанавливается на ось

пучка дистанционно с помощью пневмоцилиндров, управляемых с помощью электромагнитных клапанов (рисунок 3.18).

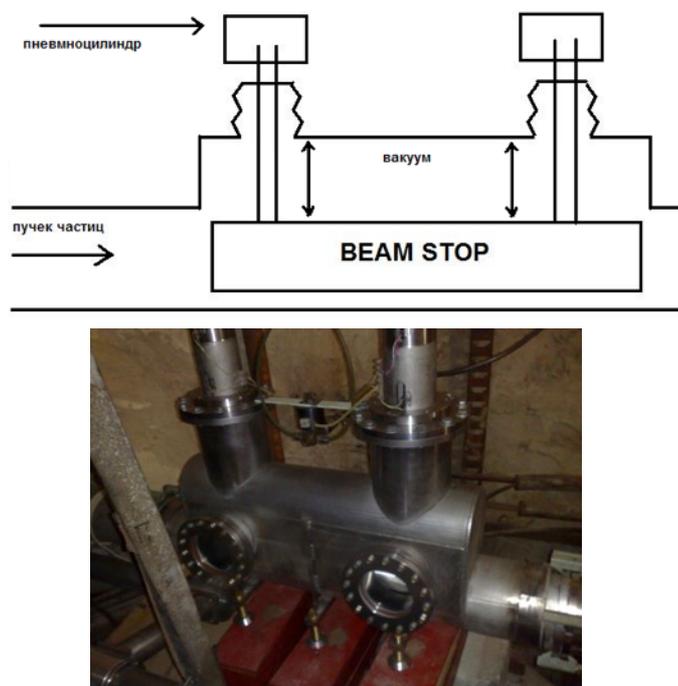


Рисунок 3.18 – Схема (вверху) и фотография (внизу) блокиратора пучка Beam_Stop.

Расчет габаритных размеров проводился с помощью программного кода SRIM2006 [34]. Для ионов углерода с энергией 400 МэВ/а.е.м. пробег составляет 50 мм. Для ионов углерода с энергией 200МэВ/а.е.м. - 12.93 мм. Для протонов с энергией 800 МэВ - 416 мм. Были выбраны следующие габариты цилиндра Beam_Stop: длина=500 мм, диаметр 140 мм, что позволяет обеспечить защиту от пучка протонов с энергией до 900МэВ и ионов углерода с энергией до 2.2 ГэВ/а.е.м. Для управления устройством блокировки пучка разработан и собран электронный блок (рисунок 3.19) состоящий из ручного пульта управления, индицирующий состояние и цифровой платы для персонального компьютера L791 фирмы L-Card.



Рисунок 3.19 - Слева - схема управления блокиратором пучка. Справа – фотография ручного пульта управления блокиратором пучка.

Ручной пульт (рисунок 3.19) служит для аварийной блокировки прохождения пучка. Система блокировки также включает в себя концевой выключатель двери экспериментального зала и индикацию состояния блокиратора пучка при входе в экспериментальный зал. Для индикации состояния Beam_Stop на веб сайте plasma.iterp.ru была разработана программа BeamStop.

3.1.3 Подсистема контроля и управления магнитными элементами линии транспортировки пучка и диагностики пучка

Для управления линией транспортировки пучка и диагностики пучка на основе модулей АПМ была разработана подсистема контроля и управления магнитными элементами линии транспортировки пучка и диагностики пучка (ПУЭД). С помощью ПУЭД осуществляется настройка токов в магнитных элементах линии транспортировки пучка, контроль их параметров в процессе проведения экспериментов, диагностика поперечных размеров пучка в контрольных точках, измерение тока пучка. На рисунке 3.20 показана блок схема подсистемы ПУЭД.

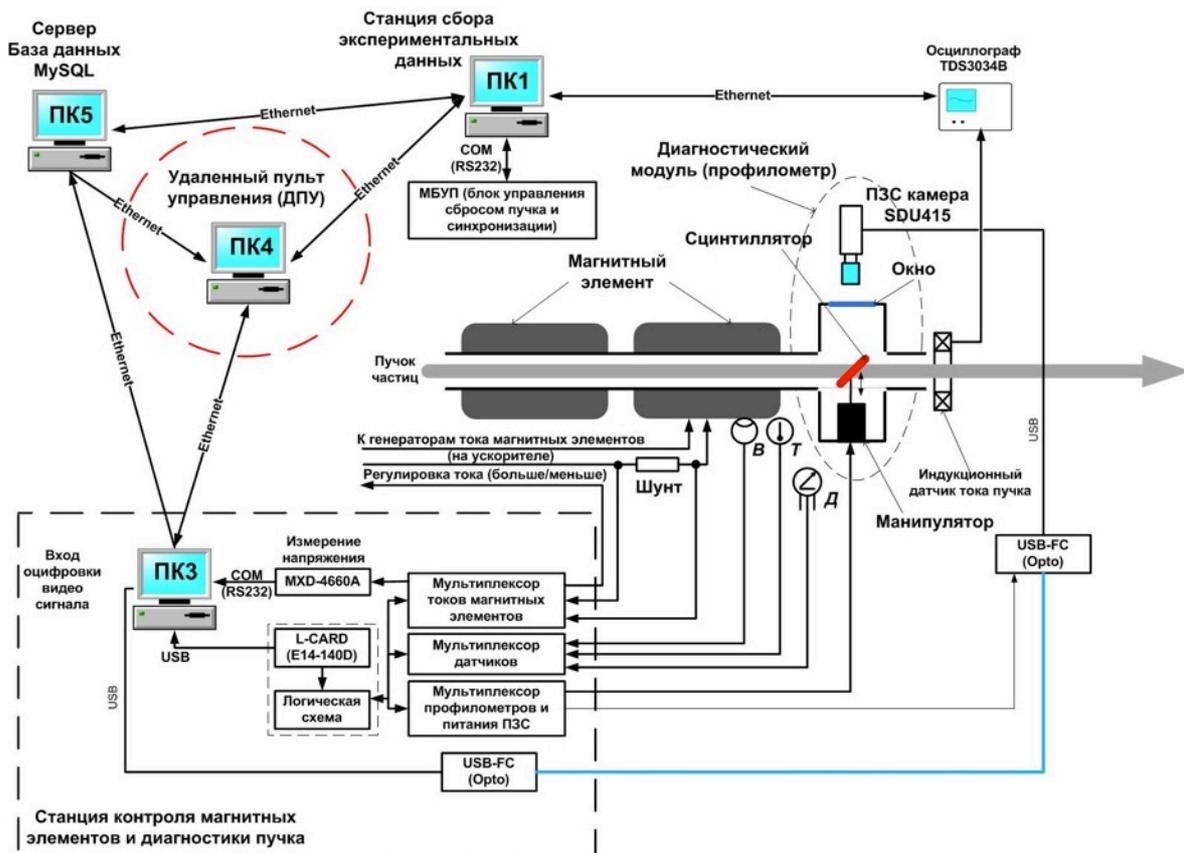


Рисунок 3.20 - Блок-схема подсистемы ПУЭД контроля и управления магнитными элементами линии транспортировки пучка и диагностики пучка.

Целью процедуры настройки пучка является обеспечение необходимых параметров пучка в плоскости перед входом в линию установки ПУМА – его поперечных размеров и интенсивности. Поперечные размеры пучка в девяти точках линии транспортировки пучка p1-p9 (см. рисунок 2.2) измеряются с помощью диагностических модулей, представляющих собой радиационно стойкие керамические сцинтилляционные конверторы (время высвечивания ~20мс) толщиной 1 мм, расположенные в вакуумной камере линии транспортировки пучка. Конвертор, находящийся в процессе эксперимента вне пучка, при настройке пучка перемещается на ось пучка с помощью дистанционно управляемого манипулятора рисунок 3.21.

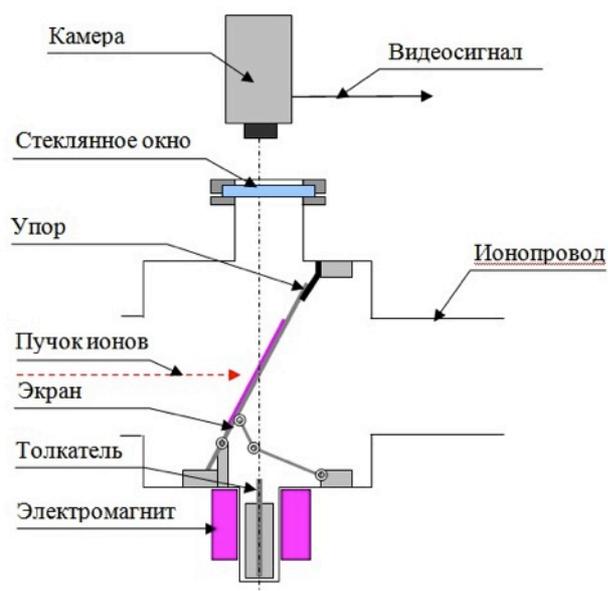
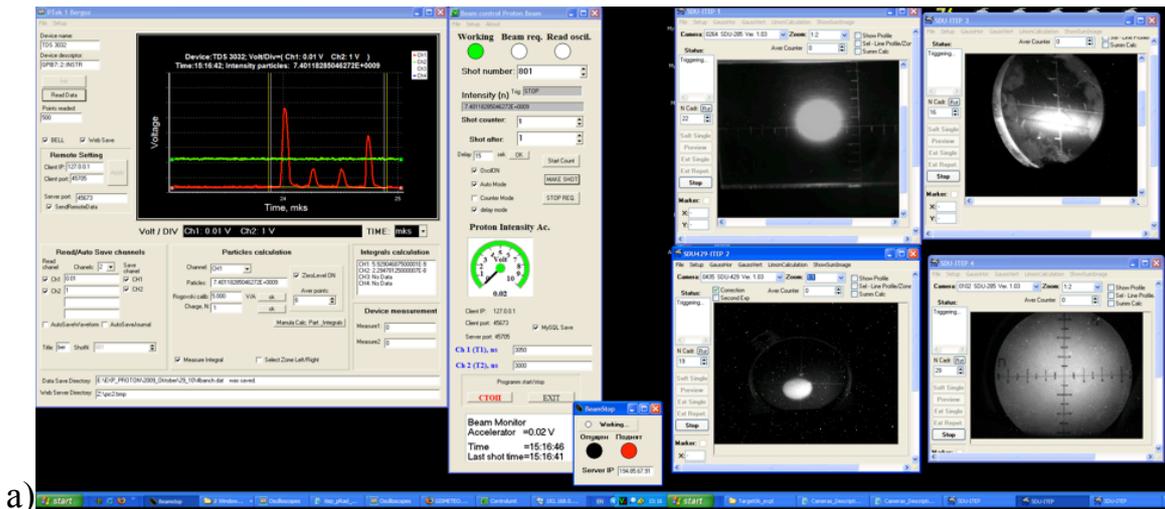


Рисунок 3.21 - Функциональная схема диагностического модуля поперечного профиля пучка.

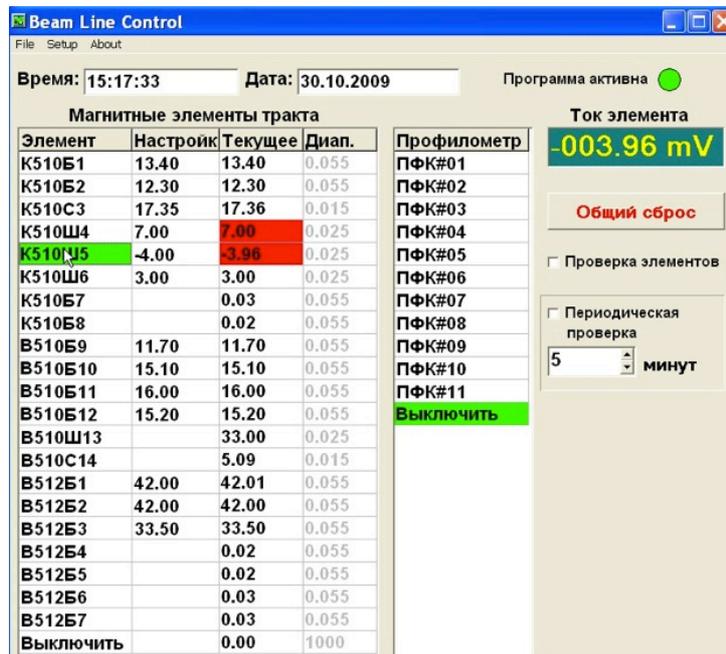
Световое изображение пучка регистрируется с помощью ПЗС камер (SDU-285, SDU415, (SDU429 – версия со сменной ПЗС матрицей) фирмы СпецТелеТехника) с малым временем экспозиции (7 мкс). Для защиты от радиационного излучения ПЗС камеры размещаются на расстоянии ~ 1 м от оси прохождения пучка. Кроме того использование версии ПЗС камеры со сменной ПЗС матрицей, позволяет снизить расходы на ремонт камер, вызванный радиационными повреждениями. Для удаленного подключения ПЗС камер SDU429, SDU415 используются преобразователи интерфейсов USB-Ethernet Lantronix UBOX2100, подключенные в локальную сеть Ethernet. Считанные изображения сохраняются, с помощью программы SDU-ИТЕР, на сервере и отображаются в сети Internet на веб сервере plasma.iter.ru. Интенсивность и временное распределение пучка измеряются с помощью индукционных датчиков FCT-082-05:1, (Bergoz), сигнал с которых считывается с помощью аппаратно-программного модуля, включающего осциллограф TDS3034 и программу РТЕК, рассчитывающую интенсивность пучка частиц.

С помощью многоканального релейного мультиплексора (рисунок 3.21), подсистема ПУЭД контролирует токи (напряжения с шунтов, расположенных на корпусах магнитных элементов линии транспортировки пучка) и состояния блокировок безопасности 32 магнитного элемента линии транспортировки пучка. Магнитные элементы питаются от генераторов постоянного напряжения, расположенных на ускорителе. Для контроля тока в магнитном элементе на корпусе каждого магнитного элемента располагаются шунтирующие сопротивления $1.5 \cdot 10^{-4}$ Ом. Шунтирующие сопротивления подключены к релейному мультиплексору, который подключает к одноканальному измерителю напряжений MXD-4660A (фирма Metex) поочередно все магнитные элементы. Данные от MXD-4660A передаются в ПКЗ (рисунок 3.20) через последовательный порт RS232. Точность измерения тока составляет 0.07 А в диапазоне 0-500 А. Мультиплексор токов позволяет поочередно подключать до 32 магнитных элементов. К ПКЗ через мультиплексор датчиков, имеющий 64 цифровых входа, подключены датчики Т и В (рисунок 3.21), контролирующие температуру и давление воды в системе охлаждения обмоток магнитных элементов. Этот же мультиплексор используется для считывания сигналов с вакуумных датчиков. Управление мультиплексорами, считывание состояния датчиков, управление генераторами токов и подъем сцинтилляторов осуществляется с помощью разработанной а языке Delphi Xe программы Beam Line Control [27] посредством цифрового модуля L-CARD E14-140D. В главном окне программы Beam Line Control (рисунок 3.22b) отображаются величины напряжений на шунтах магнитных элементов линии транспортировки пучка и выделяются те диагностические модули, которые работают в данный момент. Beam Line Control следит за тем, чтобы токи магнитов и линз не отличались от настроенных величин в заданных интервалах. При нарушении этих условий подается звуковой сигнал тревоги и на главном

окне программы красным цветом выделяется аварийный магнитный элемент. Настроенные значения токов магнитных элементов могут быть сохранены/прочитаны из файла. Информация о состоянии магнитных элементов линии транспортировки пучка передается в базу данных сервера КСА и отображается в сети интернет. На рисунке 3.22 показано рабочее поле компьютера оператора проводки пучка.



а)



б)

Рисунок 3.22 - Рабочее поле удаленного пульта оператора проводки пучка.

а) - Слева-направо – программа “РТЕК” – для измерения интенсивности пучка по сигналу с индукционного датчика пучка; программа “BeamControl”- управление сбросами пучка; программа “BeamStop-UNIT”; программы “SDU-ИТЕР” запущенные для четырех диагностических модулей б) - программа “Beam Line Control” - контроль токов магнитных элементов

3.1.4 Сервер экспериментальных данных КСА.

Для обеспечения удаленного контроля за работой КСА и сохранения поступающих экспериментальных данных разработан сервер GNU/Linux_Debian+Apache+MySQL+Samba с веб сайтом <http://plasma.itep.ru>. Файлы со всеми исходными экспериментальными данными (изображения, осциллограммы и т.п.) сохраняются непосредственно на центральном сервере с использованием файлового хранилища Samba Server, а измеренные параметры и имена файлов передаются в базу данных MySQL, через базовый аппаратно-программный модуль АПМ1. В базе данных MySQL для текущего эксперимента создается таблица, в которой для каждого сброса пучка добавляется строка, включающая: данные об интенсивности пучка, уникального неповторяющегося номера сброса пучка (ID номер), имена и пути всех сохраненных файлов, ключевые параметры, считанные из диагностических приборов. Для визуализации экспериментальных данных на сервере разработан набор динамических PHP страниц (рисунок 3.20), позволяющих просматривать, через сеть Internet, поступающие экспериментальные данные.

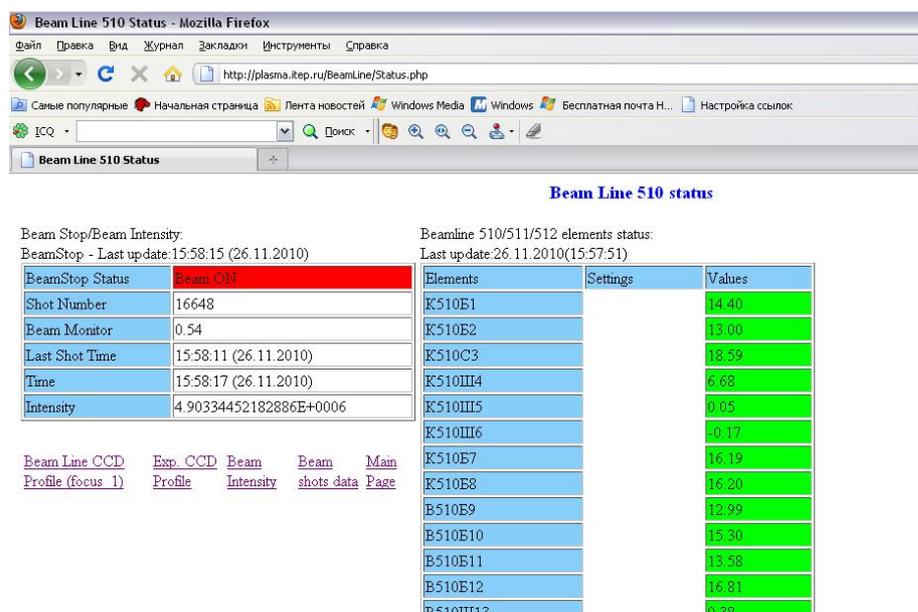


Рисунок 3.23 - Страница web-сайта plasma.itep.ru отображения настроек линии транспортировки пучка и хода эксперимента.

3.1.5 Подсистема контроля и управления экспериментом

Подсистема контроля и управления экспериментом (ПКУЭ) предназначена для проведения экспериментов в автоматическом режиме по заранее разработанному и закодированному плану–заданию (ПЗ) системе КСА. В ПЗ указывается время начала и конца эксперимента, описываются условия проведения каждого сброса пучка ускорителя: интенсивность пучка, положение мишени, положения измерительных устройств и детекторов. Задание параметров ПЗ осуществляется в программе BeamControl. Обмен данными между программами АПМ организован с применением интерфейса TCP/IP socket. Каждая программа АПМ имеет уникальный номер (рисунок 3.24 “Сервер”), который используется как адрес для приема данных от других программ. При настройке конфигурации для текущего эксперимента в каждой программе прописывается направление (рисунок 3.24 “Клиент”) передачи данных. Ведущим в сети является базовый модуль АПМ1, состоящий из блока МБУП и программы Beam Control. Протокол данных посылаемых через TCP/IP socket представляет собой строку, состоящую из набора параметров (названия и пути сохраненных файлов, координата манипулятора, измеренная интенсивность пучка и т.п.) передаваемых в формате JSON. С помощью программы Beam Control, после каждого сброса пучка, в базу данных MySQL на сервере КСА производится запись ключевых параметров: интенсивности пучка, уникального неповторяющегося номера сброса пучка (ID), времени и даты последнего сброса пучка, уровня радиационного фона, имена всех сохраненных файлов (имена включают в себя номер ID), параметры диагностического оборудования. В состав программы Beam Control входят разные отдельно включаемые функции, используемые в экспериментах по радиобиологии и протонной радиографии. Так, например, в экспериментах по радиобиологии в программе Beam Control реализована функция

измерения и ограничения дозы полученной облучаемыми образцами. В программе “Beam Control” указываются условия ПЗ.

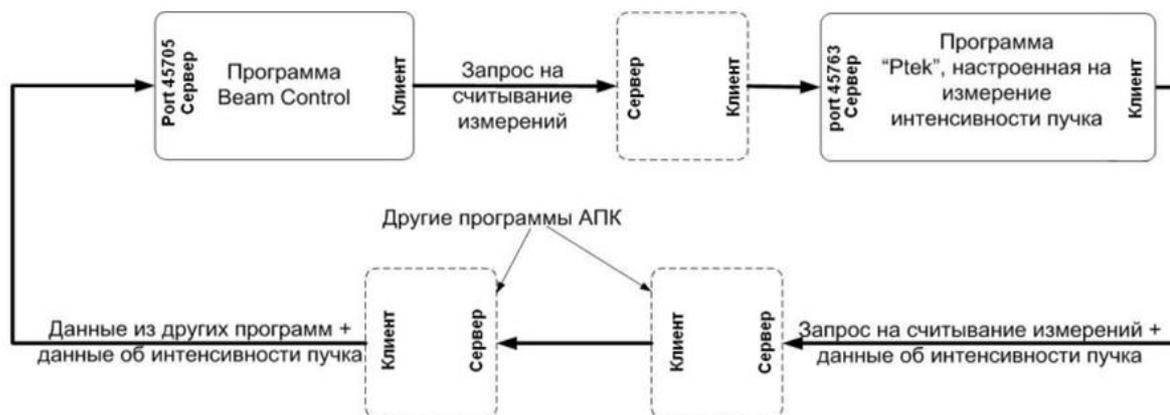


Рисунок 3.24 - Схема передачи данных между программами комплексной системы автоматизации на примере измерения интенсивности пучка.

При проведении радиографических экспериментов на линии 512 установки ПУМА с использованием динамических объектов с взрывными генераторами, необходимо обеспечить общую синхронизацию, провести тщательную настройку измерительной и управляющей аппаратуры эксперимента, а также систем управления и контроля пучка. Проведение данных работ невозможно без комплексной системы контроля, управления и автоматизации эксперимента. Кроме того, в схеме протонного микроскопа требуется обеспечить прецизионное позиционирование ПМК линз, с точностью не хуже 50 мкм. Конфигурация КСА для автоматизированного сбора и обработки экспериментальных данных установки ПУМА показана на рисунке 3.25. Данная конфигурация позволяет: в автоматическом режиме управлять сбросами пучка с ускорителя, считывать протонно-радиографические изображения и проводить обработку с определением пространственного разрешения установки, изменять положение ПМК линз протонного микроскопа, определять интенсивность пучка протонов, автоматически изменять положение (с помощью манипулятора устанавливаемого в

вакуумной камере ВЗК) исследуемых объектов для получения наилучшего пространственного разрешения. На основе данной конфигурации разработана методика автоматической фокусировки радиографических изображений.

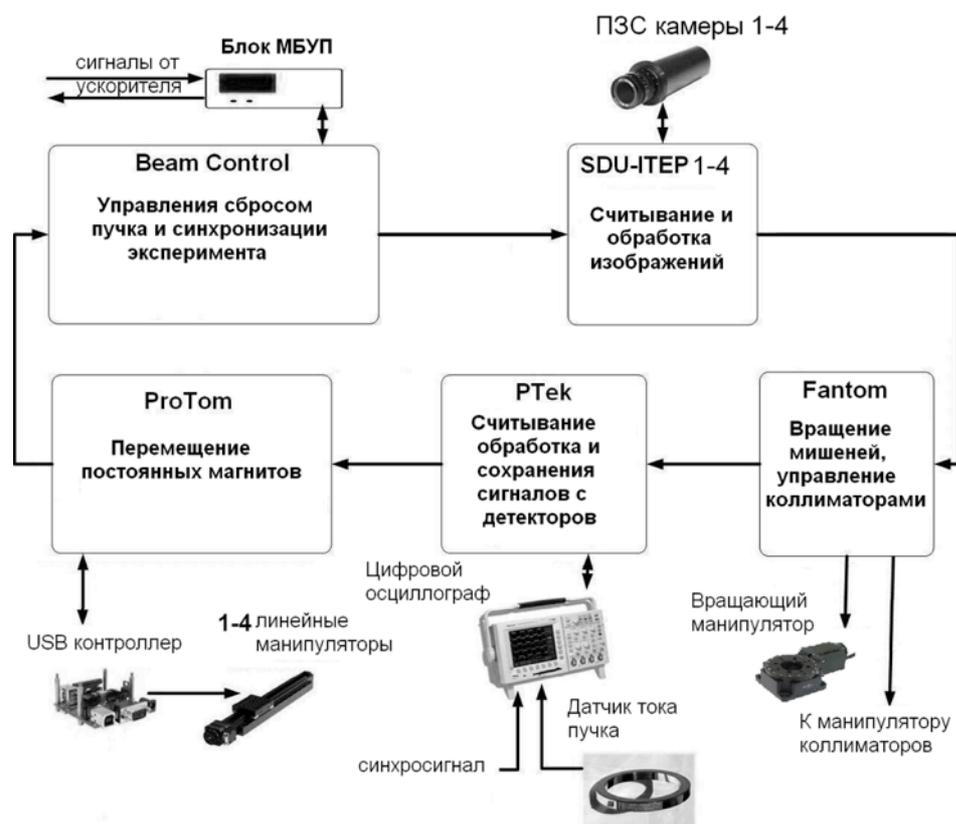


Рисунок 3.25 - Блок схема конфигурации системы КСА для проведения экспериментов по протонной радиографии.

3.2 Методика автофокусировки протонно-радиографических изображений

В процессе проведения экспериментов по протонной радиографии необходимо производить точную настройку магнито-оптической системы в зависимости от массовой толщины исследуемых объектов и энергии пучка. Для ускорения процесса настройки протонного микроскопа и получения наилучшего пространственного разрешения была разработана автоматизированная методика фокусировки радиографических изображений. Данная методика реализована с использованием трех

аппаратно-программных модулей [27,28], включающих программы: PROTOM для перемещения ПМК линз; SDU-ITER для считывания изображений с ПЗС камер SD-285 и обработки радиографических изображений; BeamControl для управления сбросами пучка. Аппаратно-программные модули объединены в единую кольцевую вычислительную сеть с использованием сетевого протокола TCP/IP-Sockets. На рисунок 3.26 показана схема взаимодействия программ в методике автоматической фокусировки радиографических изображений.

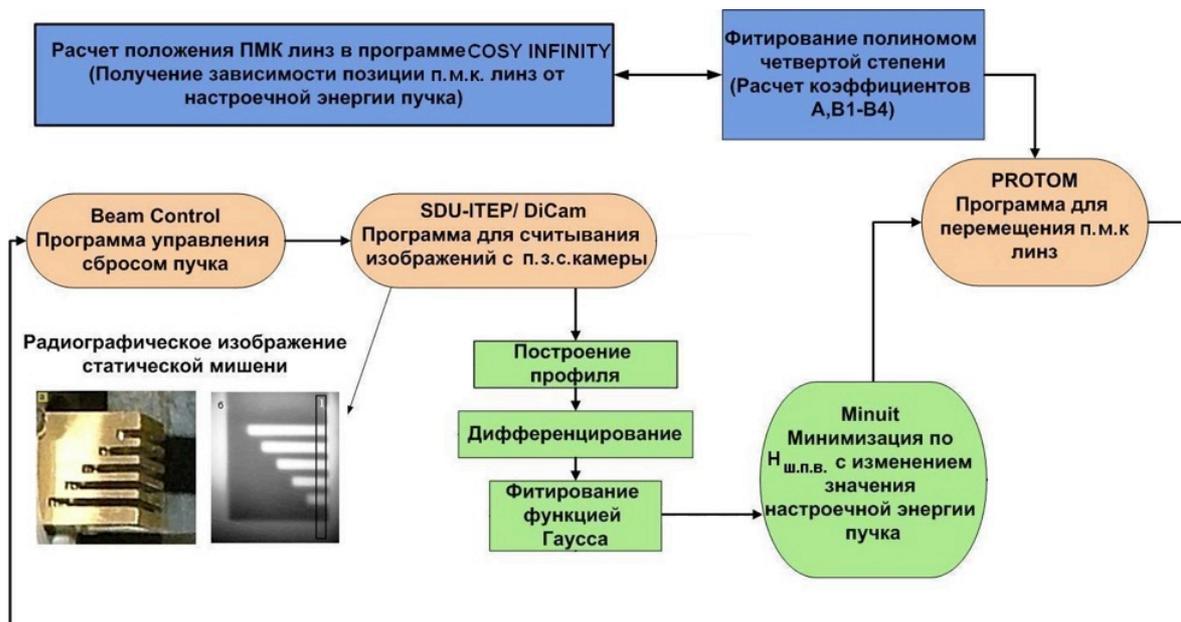


Рисунок 3.26 - Блок схема методики автоматической фокусировки протонно-радиографических изображений.

Работа автоматической системы фокусировки происходит следующим образом:

- перед началом эксперимента оптимальные положения всех четырех ПМК линз рассчитываются с использованием кода COSY Infinity для нескольких настроечных значений энергий пучка на выходе из исследуемого объекта, что соответствует нескольким значениям массовой толщины объекта;
- по рассчитанным зависимостям координат ПМК линз от значения настроечной энергии вычисляется фитирующая функция в виде

полинома четвертой степени $x_i = P_i^4(E)$, где x_i – координата ПМК линзы, i -номер ПМК линзы, E – настроечная энергия. Выбор типа функции определяется наилучшим совпадением с исходными данными координат и энергий пучка протонов. Рассчитанные значения коэффициентов полиномов заносятся в программу PROTOM. Используя значения входной энергии протонов, программа PROTOM рассчитывает начальные координаты ПМК линз. С использованием линейных манипуляторов линзы устанавливаются в эти координаты;

- в программе BeamControl активируется режим автоматического управления сбросом пучка и производится сброс пучка с ускорителя;
- в программе SDU-ITER производится считывание радиографического изображения объекта, построение профиля свечения сцинтиллятора на резкой границе объекта (объект-вакуум). Построенный профиль дифференцируется и фитируется функцией Гаусса с вычислением величины ширины на полувысоте $H_{ш.п.в}$;
- с использованием скрипта MINUIT [35] проводится минимизация параметра $H_{ш.п.в}$ посредством циклического изменения настроечной энергии протонного пучка в программе PROTOM и обработки получаемых профилей радиографических изображений.

Процесс настройки ПМК линз и получение наилучшего пространственного разрешения требует примерно 30 итераций сброса пучка (~10-15 минут) и проходит полностью в автоматическом режиме, что более чем в 10 раз ускоряет процедуру настройки протонного микроскопа. Описанная выше методика штатно используется при проведении всех экспериментов на установке ПУМА.

Глава 4. Экспериментальные результаты

4.1 Исследование динамических процессов методом протонной радиографии

При исследовании эволюции быстропротекающих динамических процессов в вакуумную линию транспортировки протонов устанавливались окна из алюминия толщиной 3 мм, располагаемые непосредственно перед электромагнитной линзой 1 (рисунок 2.4) и перед сцинтиллятором LSO. Использование таких окон необходимо для отделения основного вакуумного объема линии транспортировки пучка (давление 10^{-9} торр) от зоны (рисунок 2.2 по ходу пучка после поворотного магнита В2) образования продуктов детонации при срабатывании динамических объектов. Из-за накопления продуктов срабатывания динамических объектов происходит ухудшение предельного вакуума (давление $>10^{-3}$ торр) в установке ПУМА, что приводит к ухудшению предельного пространственного разрешения ($\sigma_{\text{динам}} = 123 \pm 2$ мкм) радиографической установки, из-за дополнительного рассеяния протонов в вакуумной камере и в защитных окнах.

4.1.1 Исследование детонационных волн в прессованном ТНТ

Проведены эксперименты [28,38,39] по исследованию детонационной волны в цилиндрическом заряде из прессованного ТНТ диаметром 10 мм и плотностью 1.63 г/см^3 . Исследовались составные заряды из нескольких таблеток ТНТ диаметром 10 мм. Полная длина исследованных зарядов составляла 48 мм. Заряды устанавливались внутри взрывозащитной вакуумной камеры ВЗК таким образом, чтобы их ось располагалась на середине поля зрения радиографической установки. Фотография заряда ТНТ диаметром 10 мм приведена на рисунке 4.1. На рисунке 4.1 видны также присоединительные провода электроконтактного датчика, сигнал с которого использовался для проверки синхронизации (сигнал с этого

датчика подавался одновременно с сигналом тока пучка на один осциллограф) срабатывания заряда с моментом прохождения пучка протонов.



Рисунок 4.1 - Заряд из прессованного ТНТ с плотностью $1,63 \text{ г/см}^3$.
Слева - внешний вид заряда, справа - заряда внутри вакуумной камеры.

На рисунке 4.2 приведены протонно-радиографические изображения заряда в статике и в двух последовательных моментах времени, с разницей по времени 250 нс, при детонации ВВ. На рисунке 4.3 показаны профили радиографического изображения детонационной волны в ТНТ на оси заряда для двух последовательных моментов времени, соответствующих двум банчам пучка с интервалом 250 нс, взятые для областей, отмеченных вертикальными прямоугольниками на рисунке 4.2

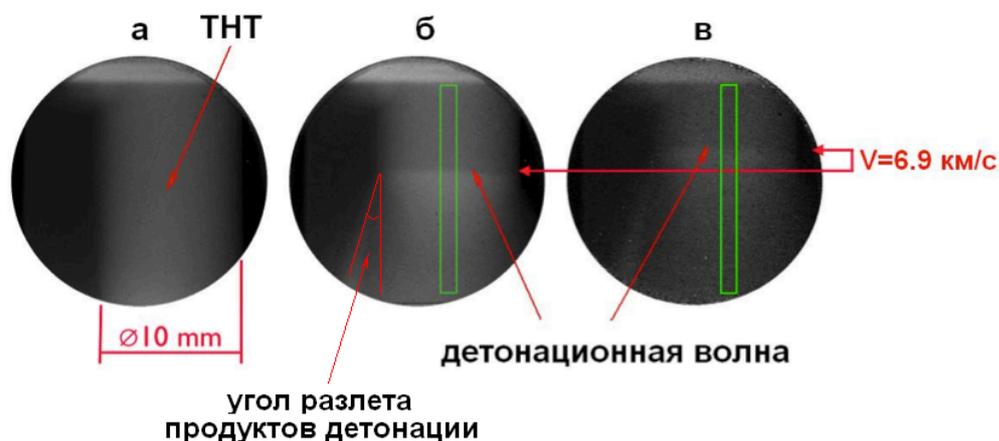


Рисунок 4.2 - Радиографические изображения детонационной волны в цилиндрическом заряде ТНТ диаметром 10 мм: а – статическое изображение объекта; б, в – изображения заряда при детонации для двух последовательных банчей пучка с разницей по времени 250 нс. (направление распространение детонационных волн снизу вверх).

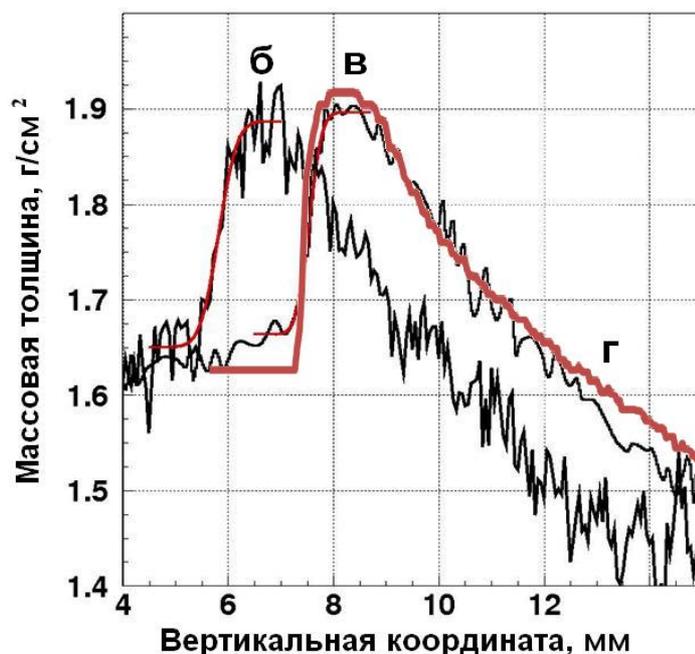


Рисунок 4.3 - Профили фронта детонационной волны в ТНТ, полученные по двум радиографическим изображениям с интервалом 250 нс; б,в – профили соответствующие радиографическим изображениям на рисунке 4.2; г (жирная линия) - расчетный профиль согласно модели Зельдовича-Неймана-Деринга.

По смещению положения детонационных волн между двумя радиографическими кадрами измерена скорость детонации для данного заряда ТНТ, равная $V=6.9\pm 0.2$ км/с, что в пределах точности измерений

совпадает с литературными данными [30]. Длительность переднего фронта зарегистрированной волны, вычисленная по профилям на рисунке 4.2 с учетом измеренной скорости детонации, оказалась порядка 150 нс. Так же измерен угол разлета продуктов детонации, который составляет $25.0 \pm 3.0^\circ$.

4.1.2 Исследование динамических процессов в эмульсионном ВВ

С использованием протонного микроскопа ПУМА выполнены работы по экспериментальному исследованию ударной сжимаемости и структуры детонационных волн в эмульсионных взрывчатых веществах [38-40]. В качестве объекта исследования было выбрано эмульсионное взрывчатое вещество (ЭВВ). ЭВВ, применяемые в горнодобывающей промышленности, состоят из эмульсионной основы и сенсibilизатора. Основу получают, перемешивая водный раствор аммиачной селитры с минеральным маслом и эмульгатором. Эмульсионная основа не детонирует и, для перевода ее в детонационноспособное состояние, к основе добавляют сенсibilизатор. В качестве сенсibilизатора используют полые микросферы диаметром около ста микрон. В экспериментальном исследовании используется ЭВВ содержащее 92,2% окислителя (водный раствор нитрата аммония), 6,6% горючего (дизельное топливо) и 1,2% эмульгатора, сенсibilизированное добавлением 3% по массе полых стеклянных микросфер С15 фирмы ЗМ со средним диаметром ~ 80 мкм. Плотность такого ЭВВ составляла $\rho = 1,07$ г/см³. Использовались заряды в полиэтиленовых оболочках с внутренними диаметрами 15 мм. Выбор плотности и процентного содержания микросфер был осуществлён на основании исследований, указывавших на наилучшую детонационную способность ЭВВ данного состава. На рисунке 4.4 показан внешний вид заряда ЭВВ. Заряд ЭВВ диаметром 15 мм и длиной 75-80 мм (4-5 диаметров) помещался в герметичную полиэтиленовую трубку (1 на рисунке 4.4) с толщиной стенок 0,7 мм.

Детонация в исследуемом ВВ инициировалась детонатором через переходную таблетку ВВ (ТГ 50/50 – 9 г) (2 на рисунке 4.4) и герметизирующую плексигласовую вставку (3 на рисунке 4.4) толщиной 2 мм. Сборка монтировалась в вакуумной камере ВЗК с помощью рейки (5 на рисунке 4.4).



Рисунок 4.4 - Фотография заряда эмульсионного взрывчатого вещества диаметром 15 мм; 1 - пластиковая оболочка с исследуемым зарядом ЭВВ, 2 - инициирующая таблетка ВВ (ТГ 50/50), 3 - плексигласовый фланец, 4 - узел для исследования скорости поверхности с помощью интерферометра VISAR, 5 – крепежная рейка.

В основе большинства представлений о природе критического диаметра лежит известный физический принцип Харитона [41], согласно которому с уменьшением диаметра заряда ВВ увеличивается относительное количество реагирующего ВВ, которое разлетается из зоны химической реакции в стороны. При этом увеличивается потеря энергии из зоны реакции, которая в противном случае шла бы на поддержание детонационного фронта. Когда диаметр заряда достаточно велик, эта потеря незначительна и детонационная волна распространяется практически со скоростью идеальной детонации. Но при диаметре заряда, который называется критическим, относительная потеря энергии возрастает настолько, что в зоне химической реакции нарушается равновесие между выделением энергии и её рассеиванием, и распространение стационарной детонации становится невозможным. Для

выбранного состава ЭВВ диаметр заряда 15 мм близок к критическому значению [42], при котором еще возможна детонация ЭВВ.

Правильность выбора диаметров заряда подтверждена экспериментально на установке ПУМА. На рисунке 4.5 показаны двумерные протонно-радиографические изображения трех взрывных процессов (а-в)) в зарядах ЭВВ диаметром 15 мм. Детонационная волна распространяется сверху вниз (направление детонационной волны и положение фронта ударной волны указаны стрелкой и надписью “ФУВ” на рисунке 4.5). В нижних частях рисунков представлены профили трансмиссии в полосах, расположенных между красными линиями шириной 1.2 мм. Направление распространения волны в профилях – справа налево.

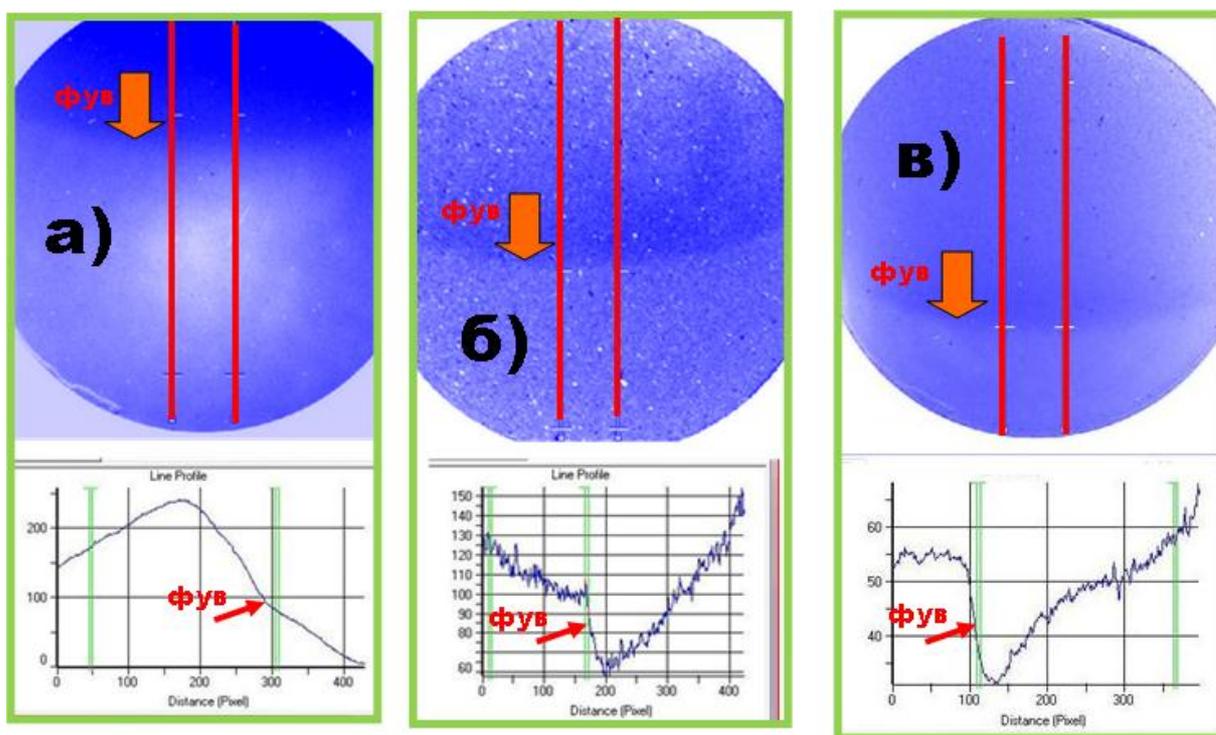


Рисунок 4.5 - Протонно-радиографические изображения взрывных процессов, полученные в разных опытах в одинаковых зарядах ЭВВ плотностью $1,07 \text{ г/см}^3$ диаметром 15 мм.

Вверху- протонно-радиографические изображения. Внизу – вертикальные профили построенные между красными линиями по изображениям; а) - затухающая ударная волна; б) - неустойчивый детонационно-подобный режим; в) - детонационная волна (направление распространения детонационных волн сверху-вниз).

В эксперименте, представленном на рисунке 4.5 а), было зарегистрировано ожидаемое для докритического диаметра затухание детонационной волны. На рисунке 4.5 а) и соответствующих поперечных профилях трансмиссии можно видеть монотонный и растянутый по времени рост плотности за фронтом ударной волны. Такой вид обычно имеет ударная волна, возникающая при затухании первичной детонационной волны от инициирующего активного заряда ВВ при недостаточной величине диаметра заряда. Тем не менее, в эксперименте, результат которых представлены на рисунке 4.5 (б) и в)) показано, что при таком диаметре заряда возможно существование не только затухающих волн, но и само-распространяющихся взрывных процессов. На рисунке 4.5 б) представлен нестационарный детонационно-подобный процесс, имеющий неустойчивый фронт со сложной ячеистой структурой за фронтом, характерный размер которой существенно превышает средний размер неоднородностей в заряде. Скорость распространения этого процесса, тем не менее, оказалась, высока и составила около 4.4 км/с, что соответствует ранее измеренному значению скорости детонации для данного диаметра заряда. В эксперименте, результаты которого представлены на рисунке 4.5 в) наблюдается волна, характерная для классической стационарной детонации, распространяющуюся с той же скоростью 4.4 км/с.

4.1.3. Ударно-волновые процессы в газовых мишенях

С использованием протонного микроскопа ПУМА были проведены экспериментальные работы по измерению плотности неидеальной плазмы [29,40], для которой дебаевский параметр неидеальности, определяемый формулой $\Gamma = 2e^3(\pi n_e)^{1/2}/(k_B T)^{3/2} \sim 1$ [43]. Параметр Γ является отношением потенциальной энергии кулоновского взаимодействия и кинетической энергии частиц в плазме. Здесь e – заряд электрона, n_e – плотность свободных электронов, k_B – постоянная Больцмана,

T – температура. При $\Gamma \sim 1$ энергия потенциального взаимодействия соизмерима с кинетической энергией частиц в плазме и плазма становится неидеальной или иными словами плазма находится в состоянии сильного межчастичного взаимодействия. Если $\Gamma \ll 1$, то говорят что, плазма идеальная. При $\Gamma \gg 1$ плазма называется сильнонеидеальной. Интерес к свойствам плазмы с сильным межчастичным взаимодействием определяется как широким кругом практических применений, так и множеством физических задач и проблем, для понимания и описания которых, ее свойства играют ключевую роль. Наиболее яркими примерами этих задач и применений являются: инерциальный термоядерный синтез, взрывные источники оптического и рентгеновского излучения, астрофизика и физика планет-гигантов. В проведенных исследованиях неидеальная плазма генерировалась при однократном ударно-волновом сжатии газообразного ксенона при начальном давлении от 1 до 5 бар. Мощные ударные волны в исследуемом газе генерировались при помощи энергии конденсированных взрывчатых веществ (смесь тротил/гексоген) в линейных взрывных генераторах. Взрывные генераторы [43] конструировались таким образом, чтобы получить стационарное автомодельное течение ударно-сжатого газа. Плотность в случае автомодельных течений обычно рассчитывается из измеренных гидродинамических параметров потока (скорость движения фронта ударной волны и массовая скорость). Из-за малых пробегов оптического излучения в плотной плазме оптические методы получения информации о течении за фронтом ударной волны не работоспособны. Для прямых измерений плотности используется метод импульсной рентгенографии. Точность этих измерений порядка 10%. Метод протонной радиографии позволяет улучшить точность измерений плотности за фронтом ударных волн.

Схематическое изображение конструкции взрывного генератора, используемой в эксперименте, представлено на рисунке 4.6. Канал генератора (4 на рисунке 4.6) изготавливался из трубки из поливинилхлорида длиной 35мм с внешним диаметром 25мм и толщиной стенок 1.5мм. В качестве активного заряда использовалась прессованная таблетка (2 на рисунке 4.6) из ВВ с высотой 20 мм и диаметром 20 мм, помещенная внутри канала генератора. Взрывчатое вещество инициировалось с помощью электродетонатора, который устанавливался в отверстие таблетки ВВ (1 на рисунке 4.6) (диаметр 20мм, высота 20мм). Передача детонации от таблетки к основному заряду (2 на рисунке 4.6) осуществлялась через фланец (5 на рисунке 4.6) из оргстекла толщиной 2-3 мм. Один торец таблетки подклеивался к фланцу, на другой торец таблетки приклеивалась медная фольга (8 на рисунке 4.6) толщиной 100 мкм. Герметичность генератора обеспечивалась при помощи двух фланцев (5,6 на рисунке 4.6) изготовленных из плексигласа. Поверхность медной фольги использовалась в качестве контрастного объекта для ориентации оси взрывной сборки перпендикулярно оси пучка. Она также служила реперным объектом для определения массовой скорости ударно-сжатой плазмы, которая совпадала со скоростью фольги.

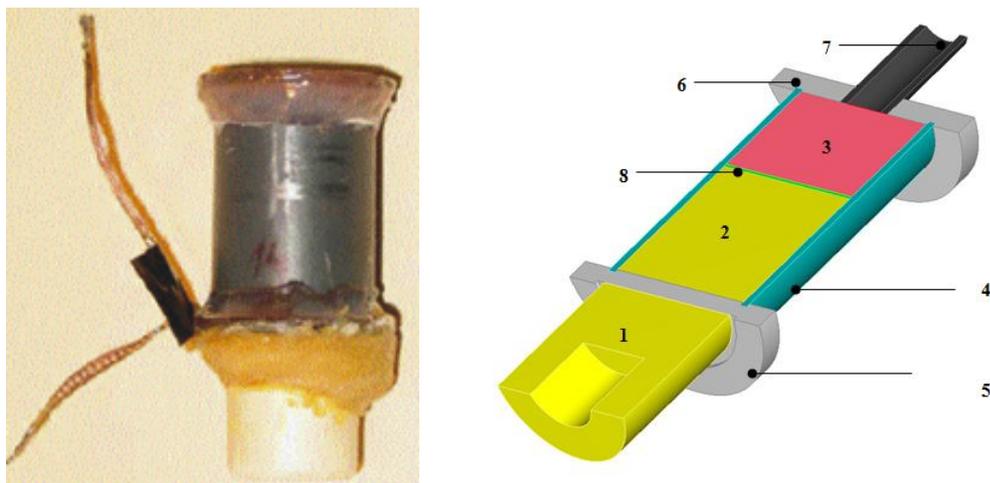


Рисунок 4.6 – Слева фото генератора плазмы, Справа -схема взрывного генератора неидеальной плазмы; 1 - Таблетка взрывчатого вещества с отверстием под электродетонатор, 2 – таблетка ВВ высотой 20 мм, 3 – исследуемый газ, 4 – канал генератора внутренним диаметром 22 мм и высотой 35 мм, 5 – фланец под ВВ, 6 – фланец под газ, 7 – трубка для подключения к системе напуска газа. 8- медная фольга толщиной 100 мкм.

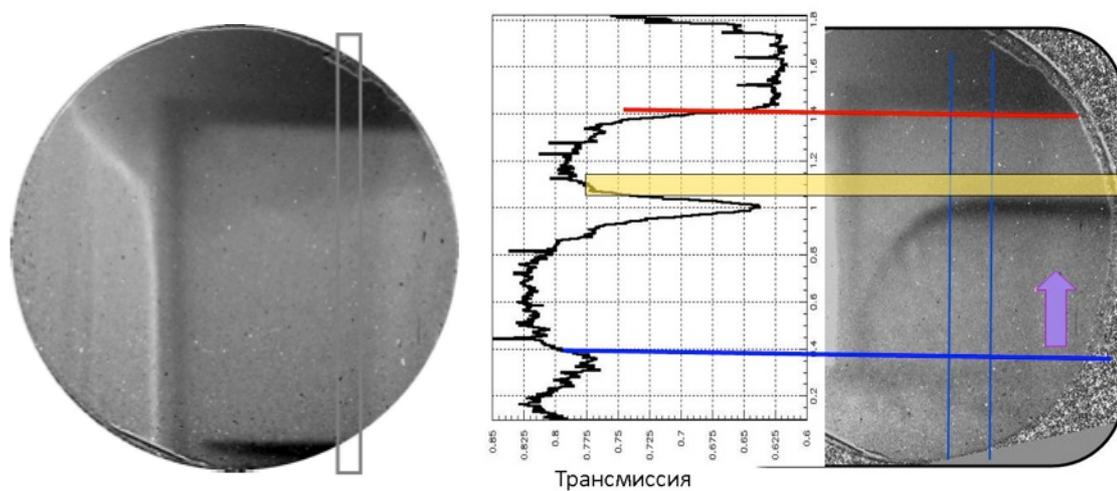


Рисунок 4.7 – Статическое(слева) и фрагмент динамического (справа) протонно-радиографических изображений взрывного генератора неидеальной плазмы с совмещенным вертикальным профилем (по центру) трансмиссии пучка протонов (направление распространения ударной волны снизу вверх, желтой полосой отмечена зона образования неидеальной плазмы)

Анализ процесса сжатия газообразного Хе в плазменном генераторе проводился по протонно-радиографическому изображению. На рисунке 4.7 показан фрагмент этого изображения вместе с совмещенной

профилем трансмиссии в вертикальном профиле, расположенном внутри вертикальных линий. Стрелкой на рисунке 4.7 показано направление движения фольги под действием ударной волны. Фольга на изображении выглядит как темная горизонтальная полоса, изогнутая вниз влево, которая переместилась из нижней части статического изображения за время воздействия на нее ударной волны. Ударно сжатая плазма ксенона образуется в узкой полосе, представленной прямоугольником желтого цвета. Выше (до красной линии) – область газообразного ксенона при начальных условиях. Потемнение изображения в верхней части обусловлено верхним фланцем контейнера. Между фольгой и синей полосой – зона продуктов химической реакции, ниже – область разрушения стенок контейнера. Чтобы перейти от измеренной трансмиссии протонов к плотности используется калибровочная зависимость, получаемая при анализе статических радиографических изображений мишени заполняемой газом до различных начальных давлений в диапазоне 0-9 Бар. В результате проведения экспериментов была определена скорость распространения ударной волны в газе, которая составила 4.3 ± 0.2 км/с. Максимальная плотность неидеальной плазмы Хе достигла значения 0.05 ± 0.005 г/см³.

4.1.4. Исследование процессов струеобразования при ударном нагружении металлических образцов

На установке ПУМА проведены эксперименты по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических пластин [32,44]. Эксперименты проводились с объектом, представляющим собой круглую медную пластину диаметром 15 мм и толщиной 2 мм с двумя пропилами треугольного сечения глубиной 1 мм, расположенными на расстоянии 2.5 мм от центра пластины. Пластина расположена на торце таблетки ВВ (ТГ 50/50) массой 4.5 г и диаметром 15 мм. Ударная волна в пластине

создавалась при детонации ВВ от электродетонатора. На рисунке 4.8 представлено фотография и схема пластины с ВВ. Для данного объекта проводились как протонно-радиографические измерения, так и измерение движения свободной поверхности пластины с использованием интерферометра VISAR [20]. Интерференционные измерения проводились при фокусировке лазерного излучения в центр пластины.

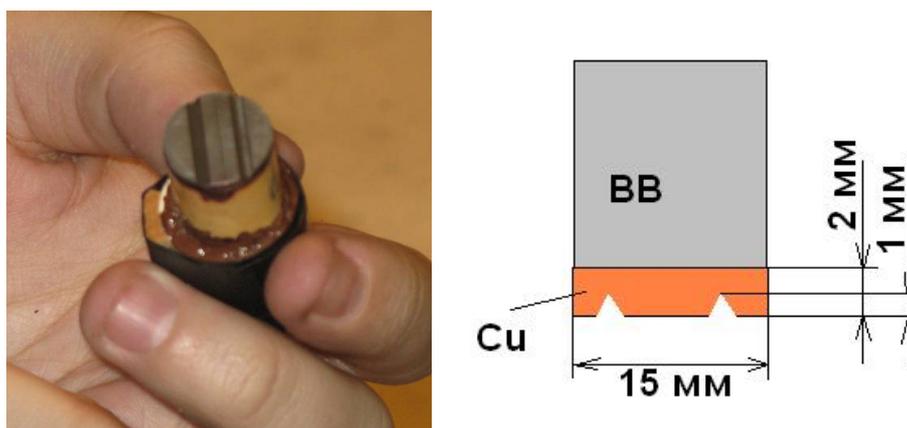


Рисунок 4.8 - Слева - фотография и справа - схема объекта (медная пластина) для исследования процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металла.

На рисунке 4.9а,б представлены протонно-радиографические изображения объекта в статическом и динамическом состояниях соответственно. Съемка динамического процесса осуществлялась спустя 1.94 мкс после выхода ударной волны на свободную поверхность пластины на ее оси. На изображении 4.9б в местах пропилов наблюдаются струи вещества, аналогичные кумулятивным, возникающие в результате прохождения ударной волны по пластине. Кроме того, на динамическом кадре наблюдается откол сегментов по краям пластины.

На рисунке 4.9в представлен результат [32] обработки экспериментальных данных, полученных с интерферометра VISAR. На временной зависимости массовой скорости наблюдаются два скачка: первый определяется приходом ударной волны непосредственно от заряда ВВ, примыкающего к пластине, второй представляет собой

результат взаимодействия косых ударных волн, возникших в зоне пропилов, с поверхностью мишени.

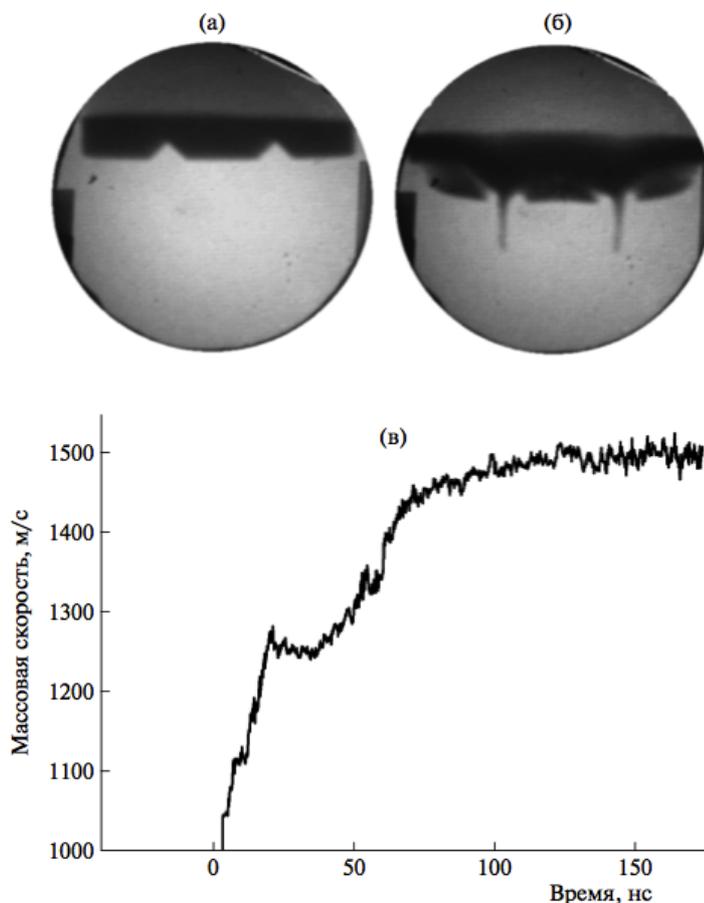


Рисунок 4.9 - Результаты эксперимента по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении медной пластины: а – протонно-радиографические изображения объекта в статическом состоянии; б – через 1.94 мкс после выхода ударной волны на свободную поверхность пластины; в – временная зависимость скорости свободной поверхности пластины, измеренной с помощью интерферометра VISAR.

Средняя скорость струй, определенная (методом протонной радиографии) по смещению их головной части относительно первоначального положения свободной поверхности за известный промежуток времени, равна 2.6 ± 0.2 км/с, что существенно выше средней скорости движения свободной поверхности (1.17 км/с), измеренной методом лазерной интерферометрии с использованием VISAR.

4.2. Исследование статических объектов

4.2.1. Протонно-радиографическая дефектоскопия и томография статических объектов

Изображения статических объектов, полученные с помощью протонного микроскопа ПУМА и пучка протонов с интенсивностью 10^{10} частиц/сброс показаны на рис 4.10. Коэффициент увеличения протонного микроскопа был равен $k=4$.

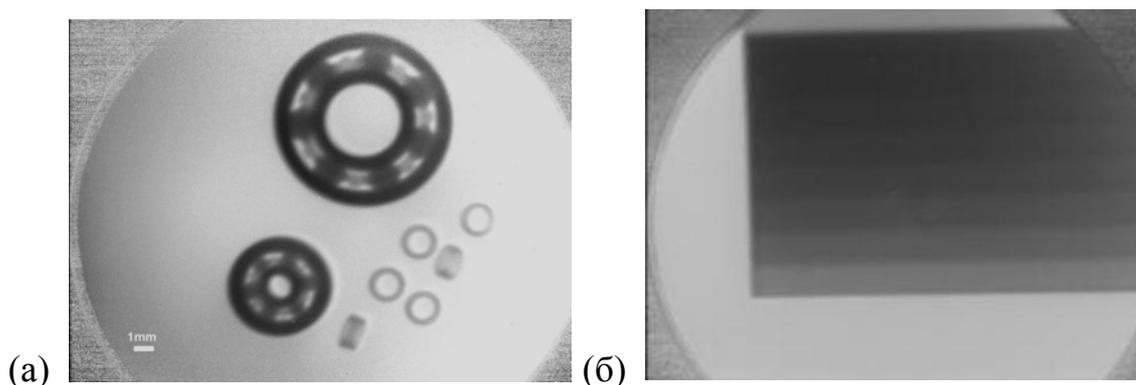


Рисунок 4.10 - Протонно-радиографические изображения статических объектов, (а) – подшипник и ферритовые кольца диаметром 1мм; (б) - лесенка из латуни с шагом по толщине в 1 мм.

Наилучшее пространственное разрешение при исследовании статических объектов составляет от 60 до 115 мкм в зависимости от массовой толщины объекта в диапазоне от 0.46 до 17 г/см² соответственно (см. раздел 2.3.5). Эксперименты по визуализации внутренней структуры статических объектов и тканеэквивалентного пластика (полиметилметакрилат (ПММА) плотностью 1,19 г/см³) были проведены [45] в ИТЭФ на установке протонный микроскоп ПУМА с использованием протонов с энергией 800 МэВ. Набор объектов был изготовлен из ПММА пластин с отверстиями и прорезями различной глубины (различной массовой толщиной) (рисунки 4.11, 4.12).

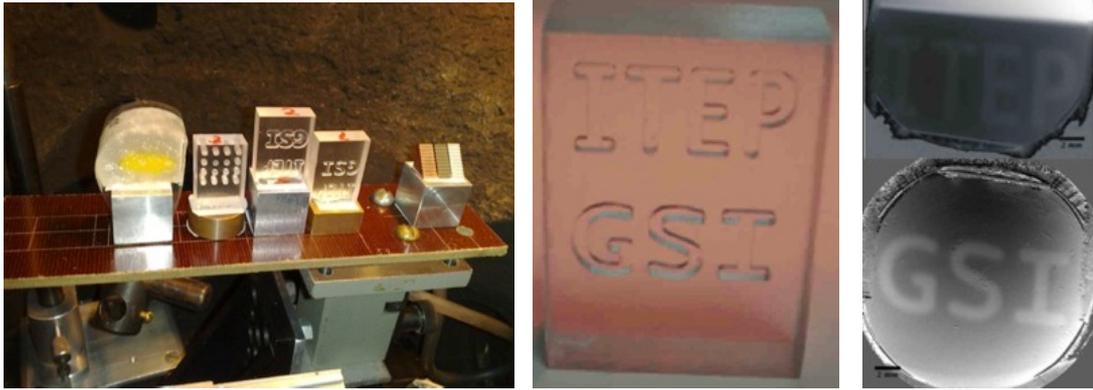


Рисунок 4.11- Слева - статические объекты установленные в держателе вакуумного манипулятор протонного микроскопа ПУМА в ИТЭФ. В центре – фотография мишени из органического стекла с толщиной 8 мм (массовая толщина 0.95 г/см^2) по направлению пучка и надписями нанесенными на поверхности прорезями глубиной 0.5 мм (надпись ITER) и 1 мм (надпись GSI). Справа – протонно-радиографические изображения.

Для определения плотностного разрешения установки проводились протонно-радиографические измерения ПММА объекта толщиной 8мм, в котором выполнены 16 цилиндрических отверстий диаметром 2 мм и глубиной от 0,5 мм до 8,0 мм.

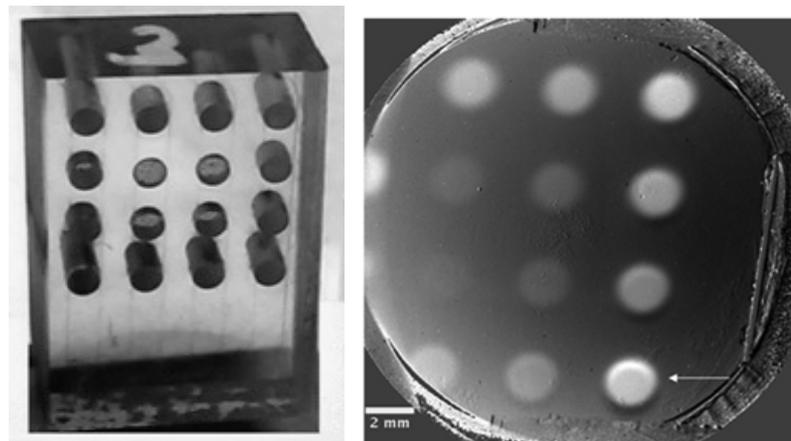


Рисунок. 4.12 - Исследуемый статический объект из ПММА с цилиндрическими отверстиями различной глубины (от 0,5 мм до 8,0 мм), и его изображение, полученное с помощью протонного микроскопа.

Полученные в результате протонной радиографии изображения, дают возможность различить отверстие с минимальной глубиной, что говорит о возможности различать объекты различающиеся по плотности до 6 %.

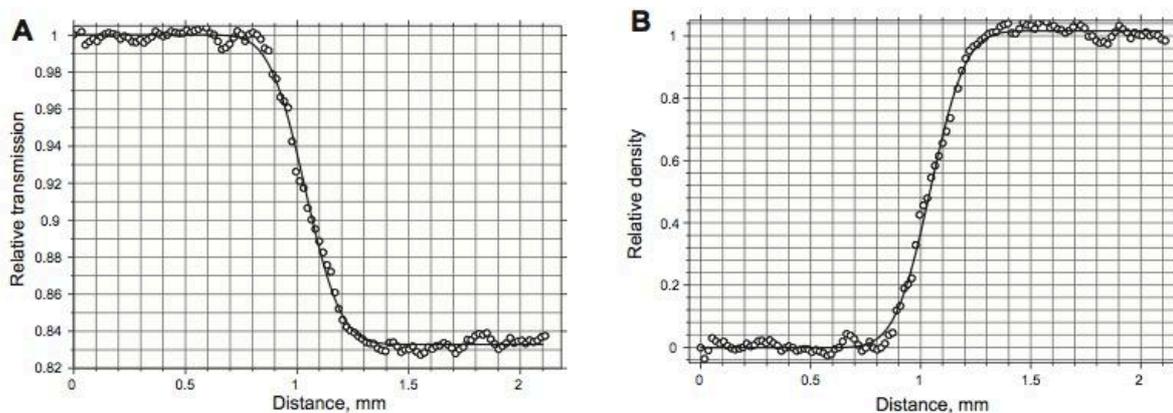


Рисунок 4.13 - Профиль трансмиссии (А) и профиль относительной плотности, измеренные на краю отверстия глубиной 8,0 мм выполненного в ПММА объекте (рисунок 4.12 отверстие, отмеченное белой стрелкой).

Сплошная линия - аппроксимация интегральной функцией Гаусса.

Определенное по профилям на рисунке 4.13 пространственное разрешение составило 150 мкм, причем в линию транспортировки пучка были установлены защитные алюминиевые окна для динамических экспериментов.

На установке ПУМА были проведены эксперименты по трехмерной реконструкции внутренней структуры статического цилиндрического объекта (имитатор тепловыделяющего элемента ядерного реактора), представляющего собой латунный цилиндр диаметром 9.2 мм с набором продольных отверстий диаметром 0.3, 0.4, 0.5, 0.8 и 1.0 мм, помещенный в оболочку из нержавеющей стали с толщиной стенки 0.3 мм. Объект устанавливался на вращательный манипулятор Standa 8MR-151 в вакуумной мишенной камере радиографической установки. Точность вращения 0.6', шаг 2°. При каждом угле установки объекта производилось облучение пучком протонов с одновременной записью и обработкой изображения проекции объекта. Для восстановления внутренней структуры объекта использовался алгебраический метод реконструкции

[46,47] (ART - Algebraic reconstruction techniques) по двумерным протонным радиографическим изображениям. На рисунке 4.14 показана фотография цилиндрического объекта и результат реконструкции поперечного среза, полученный методом ART по 90 проекциям объекта.

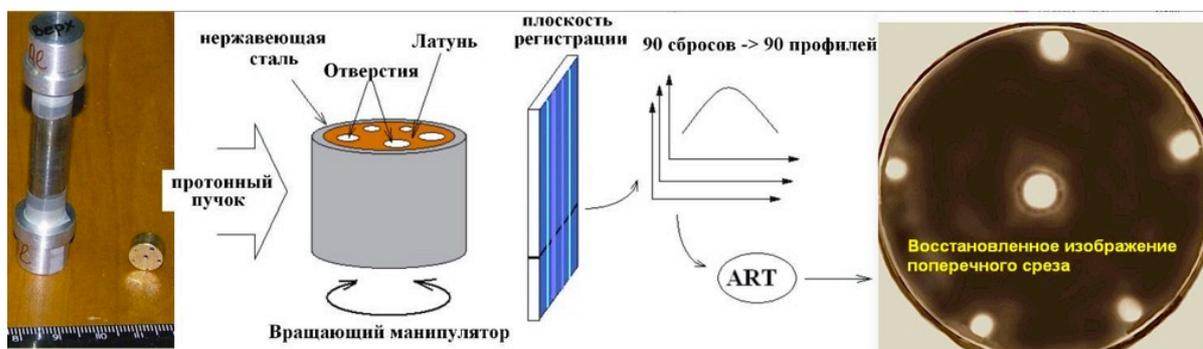


Рисунок 4.14 - Слева – фотография цилиндрического объекта; в центре - схема проведения эксперимента по трехмерной реконструкции внутренней структуры статического объекта; справа - результат реконструкции поперечного среза цилиндра, выполненный по 90 протонно-радиографическим проекциям.

Пространственное разрешение восстановленного по 90 проекциям изображения цилиндрического объекта составляет $\sigma_s = (220 \pm 80)$ мкм.

4.2.2. Исследования биологических объектов

Метод протонной терапии для лечения злокачественных раковых новообразований является отработанным и хорошо известным [48-51]. При использовании протонного пучка с энергией в диапазоне 60-250 МэВ, за счет особенности профиля энерговыведения протонов (увеличение энерговыведения в области пика Брэгга), облучение злокачественных образований происходит с существенно большей дозой относительно окружающих здоровых тканей. Однако из-за многократного кулоновского рассеяния протонов в облучаемых тканях происходит увеличение и расплывание поперечного профиля пучка протонов, что ведет к ухудшению пространственной и дозовой точности облучения

опухолей. Однако как видно из выражения (1) (глава 1) при увеличении энергии пучка протонов происходит уменьшение угла многократного кулоновского рассеяния и улучшение пространственной точности попадания в опухоль [52]. Однако при увеличении энергии протонов до значения ~ 1 ГэВ не возможно обеспечить облучение пациента с использованием повышенного энерговыделения в области пика Брэгга, так как пробег протонов с указанной энергией в живых тканях превышает 3 м. В таком случае единственным способом обеспечить повышенную дозу в опухоли является облучение пациента “напролет” по схеме аналогичной облучению рентгеновским излучением, когда пациент облучается с различных углов. Примером практической реализации такой схемы облучения пациентов протонным пучком с энергией 1 ГэВ являются работы, проводимые с 1975 года в Петербургском Институте Ядерной Физики (ПИЯФ) [53,54]. Данный метод облучения называется методом стереотаксической терапии [54,55]. Диапазон энергий протонного пучка используемого в стереотаксической терапии позволяет использовать методику протонной радиографии для повышения точности облучения опухолей. В данном случае облучение будет проводиться по схеме, показанной на рисунке 4.15. Облучение опухоли будет проводиться с различных углов в горизонтальной плоскости за счет вращения пациента вокруг вертикальной оси, что ведет к уменьшению дозы получаемой здоровыми тканями и увеличению дозы в зоне опухоли. Магнито-оптическая система протонного микроскопа, размещенная за пациентом (по ходу пучка протонов), будет использоваться для корректировки попадания пучка протонов в опухоль в режиме реального времени, что улучшит точность облучения.

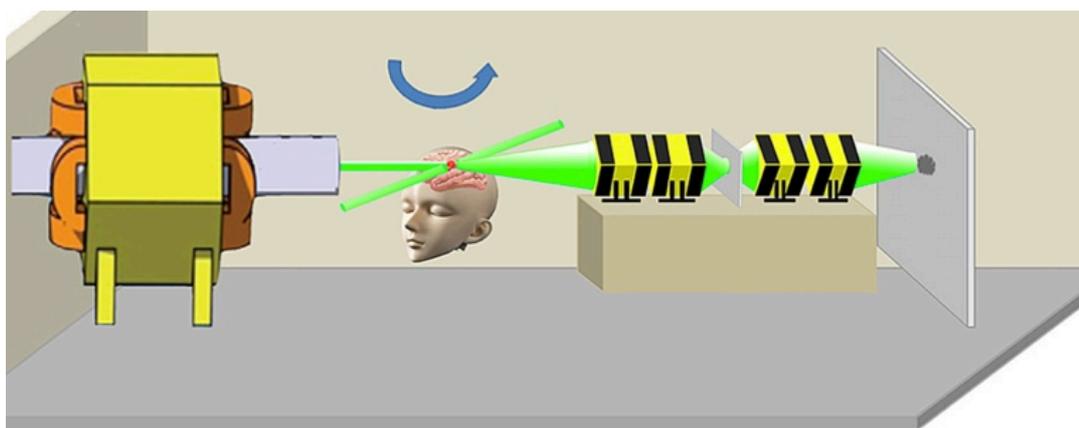


Рисунок 4.15 - Предлагаемая схема облучения пациента высокоэнергетичным пучком протонов с использованием стереотаксической терапии и протонной радиографии [45].

Впервые в мире, методом протонной микроскопии с использованием высокоэнергетичного пучка на протонном микроскопе ПУМА был проведен ряд экспериментов по изучению внутренней структуры статических биологических объектов [45]. В качестве биологического объекта использовалась аквариумная рыбка Данио-рерио (*Zebrafish*), залитая в плитку из парафина (рисунок 4.16.). Исследуемый объект помещался в вакуумную камеру установки ПУМА. Цель эксперимента заключалась в оценке потенциальной возможности различить близкие по плотности части объекта с помощью протонной радиографии. Параметры радиобиологического объекта: плотность парафина $0,91 \pm 0,04$ г/см³, плотность рыбки (за исключением материала костей) $\sim 1,00$ г/см³.

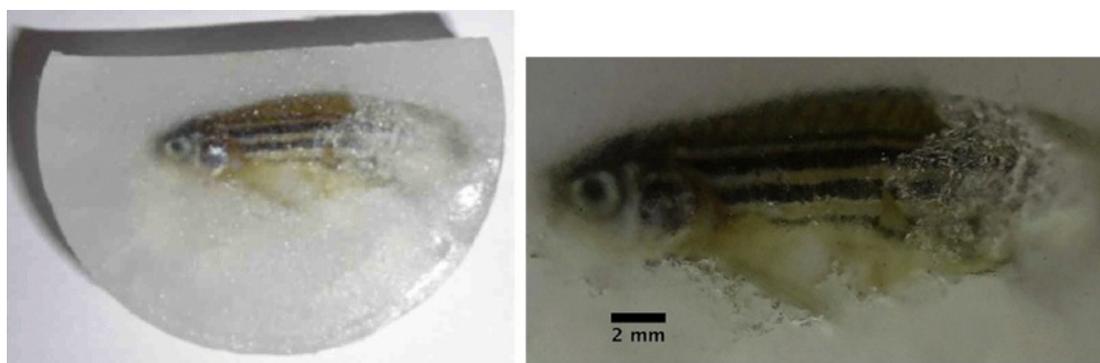


Рисунок 4.16 - Биологический объект для исследования на протонном микроскопе ПУМА - рыбка Данио-рерио залитая парафином. Слева- фотография объекта в сборе. Справа – фотография объекта с увеличением.

Приготовление исследованного объекта проходило следующим образом: образец - рыбка Данио-рерио был обработан, в течении 6 часов, раствором формальдегида (4%), далее при комнатной температуре проводили фракционное обезвоживание образца в растворах этанола различной концентрации (70% (2 раза по 1 часу), 95% (2 раза по 1 часу), 100% (3 раза по 1 часу)) и окончательно в течении 30 минут в ксилоле, далее образец выдерживался в течении ночи при температуре 50°C в парафине и был залит в плитку из парафина толщиной 8 мм. Такая процедура подготовки биологического объекта применялась для сохранения (бальзамации) внутренней структуры и обеспечения возможности проведения исследований в условиях вакуума. На рисунке 4.17 показано протонно-радиографическое изображение полученное усреднением по 100 импульсам пучка (интенсивность одного импульса $\sim 10^{11}$ частиц), что требовалось для повышения контраста изображений.

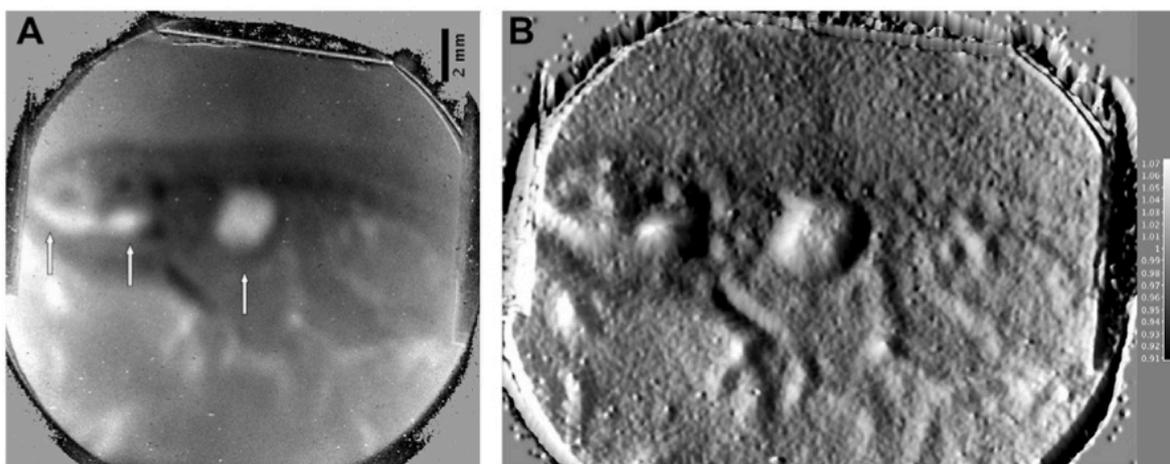


Рисунок 4.17 - Протонно-радиографическое изображение (А) аквариумной рыбки Данио-рерио помещенной в парафиновую пластинуб (В) -трехмерное отображение контраста на радиографическом изображении.

На протонно-радиографическом изображениях рыбки (рисунок 4.17) отчетливо видны светлые регионы (отмечены белыми стрелками) на радиографическом изображении, которые соответствуют плавательному

пузырю, жаберным камерам и полости рта под глазом. Кости и плавники отображаются темным цветом.. С помощью метода протонной радиографии удалось различить элементы биологического объекта разница в плотности которых составляет $0,09 \text{ г/см}^3$ (при толщине около 8 мм), или менее 10%.

Глава 5. Обсуждение результатов

Созданный в ИТЭФ протонный микроскоп ПУМА позволяет проводить протонно-радиографические исследования статических объектов с полем зрения 20 мм и пространственным разрешением от 60 мкм до 115 мкм в диапазоне массовых толщин объекта от 0.46 до 17 г/см^2 соответственно. Временное разрешение 50 нс. Проведен ряд экспериментов по исследованию статических и динамических объектов с массовой толщиной до 20 г/см^2 . Пространственное разрешение созданной установки ПУМА составило $\sigma = 60$ мкм при поле зрения 20 мм, энергии протонов 800 МэВ и коэффициенте увеличения $k=4$, что находится на уровне параметров лучшего, на данный момент, существующего в LANSCE (США) [25] протонного микроскопа ($\sigma = 65$ мкм при поле зрения 44 мм, коэффициенте увеличения $k=3$ и энергии протонов 800 МэВ).

При исследовании детонационных волн в заряде ТНТ диаметром 10 мм (глава 4.1.1) на профилях распределения плотности за фронтом детонационной волны наблюдается хорошее качественное и количественное совпадение с существующими экспериментальными данными [30]. Для исследованного заряда ТНТ проводилось численное двухмерное моделирование (согласно модели Зельдовича-Неймана-Деринга) [56,57] процесса распространения детонационной волны, а также определены поля давления и плотности в объеме мишени [39]. Соответствующие данные приведены на Рисунке 5.1. Угол разлета

продуктов детонации, определенный по данным на рисунке 5.1., составляет 23.8° , что в пределах погрешности измерения совпадает со значением угла $25.0 \pm 3.0^\circ$, измеренным в эксперименте (рисунок 4.2, глава 4).

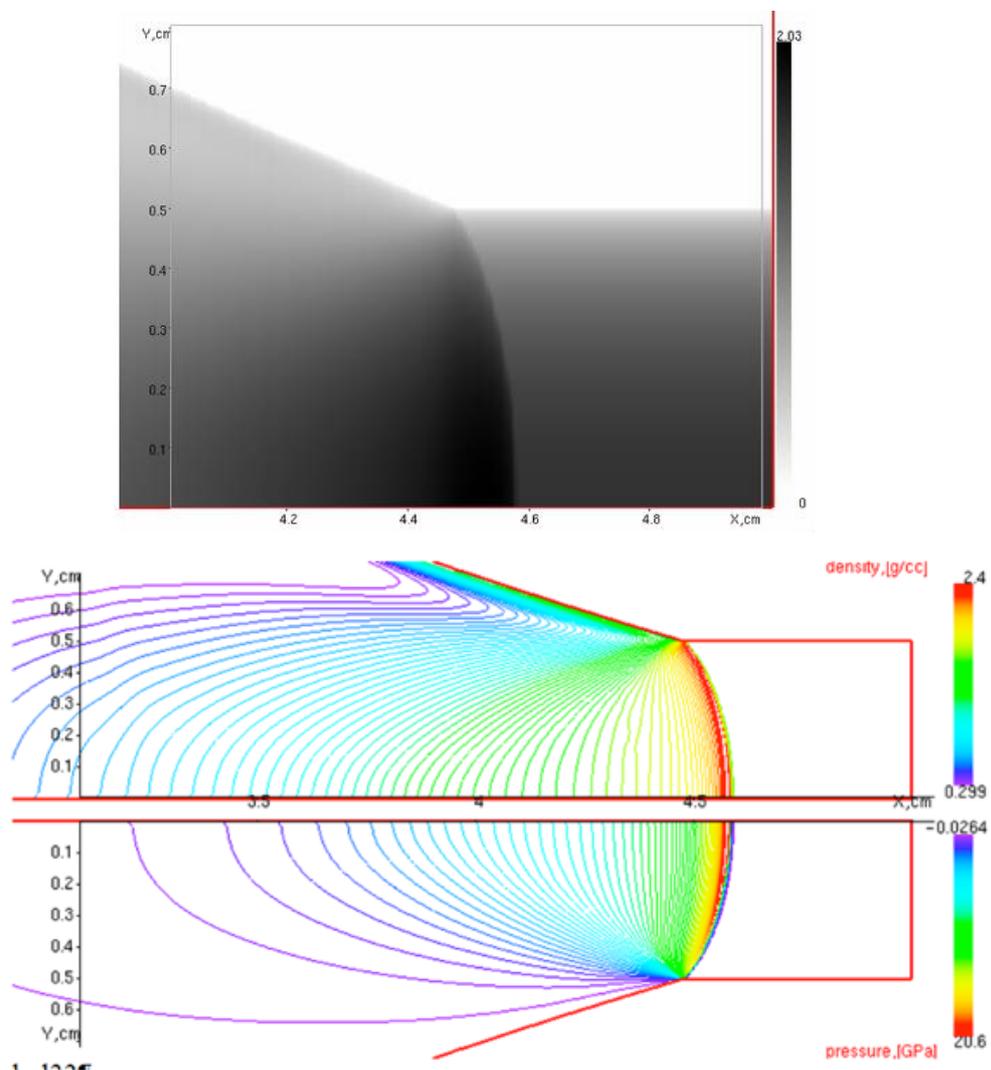


Рисунок 5.1 - Результаты численного 2D-моделирования детонации заряда прессованного тротила плотностью 1.63 г/см^3 диаметром 10 мм: Вверху -распределение линейной плотности; Внизу - распределения объемной плотности и давления.

При исследовании детонационных волн в эмульсионных взрывчатых веществах (глава 4.1.2), в одинаковых зарядах ЭВВ диаметром 15 мм с одинаковой плотностью, составом и в одних и тех же условиях инициирования возможна реализация принципиально разных режимов

протекания быстрой химической реакции: классического детонационного; режима затухающей ударной волны; «переходного» нестационарного детонационно-подобного режима с негладким фронтом (рисунок 4.5). Это может означать, что реализация того или иного режима носит случайный характер, что и должно наблюдаться при диаметре заряда, равном критическому, или очень близком к нему. Срыв стационарного распространения взрывного процесса в этом случае может быть спровоцирован малыми изменениями условий проведения эксперимента, например, флуктуациями плотности заряда, распределения и размера пор, диаметра и толщины стенки оболочки.

При исследовании, в главе 4.1.4, процессов струеобразования при ударно-волновом нагружении металлического образца, показана принципиальная возможность проводить исследования динамических процессов одновременно двумя методами: протонной радиографией и интерферометрией. В данном опыте проведено одновременное измерение скорости струи (методом протонной радиографии) и скорости движения свободной поверхности (интерферометром VISAR) металлического образца. Для определения плотности струй необходимо проводить дополнительные протонно-радиографические измерения с двух взаимно перпендикулярных направлений.

На установке ПУМА показана возможность (глава 4.2.1) проводить измерения дефектов и восстанавливать внутреннюю трехмерную структуру статических объектов плотностью $\sim 10 \text{ г/см}^3$ при характерном размере объекта $\sim 10 \text{ мм}$. В данной работе определены внутренние дефекты (определен диаметр отверстия) с характерным размером от 0.3 мм до 1.0 мм в цилиндрическом объекте, состоящем из латунного цилиндра диаметром 9.2 мм с тонкостенной оболочкой из нержавеющей стали (суммарная массовая толщина 8.2 г/см^2). Данный статический объект имитировал топливный элемент ядерного реактора [58]. Пространственное разрешение (220 мкм), полученное при этом

измерении, объясняется накоплением статистической ошибки в результате восстановления (методом ART [47] по 90 проекциям) результирующего изображения поперечного среза.

В результате исследований биологических объектов, глава 4.2.2., на протонном микроскопе ПУМА впервые было показано, что получение изображений биологических объектов при помощи высокоэнергетической протонной микроскопии принципиально возможно. На основе данных полученных на установке ПУМА предлагается развить методику стереотаксической терапии с одновременного применение контроля дозы методом протонной радиографии. В дальнейшем методика будет развиваться на строящейся в Германии установке протонный микроскоп PRIOR [59] в рамках мегапроекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия). Проект PRIOR будет использовать пучки с энергией 4.5 ГэВ для протонной радиографии с пространственным разрешением менее 10 мкм. Высокая точность доставки пучка, объединенная с получением высокоточных изображений в режиме реального времени и контролем поглощенной дозы излучения должна привести к уменьшению доступных для облучения размеров опухолевых мишеней и улучшенной стереотаксической протонной радиохирургии [53] с радиографическим наведением (СПРсРН) опухолевых и неопухолевых очагов. Возможность уточнять положение очага опухоли в режиме реального времени, безусловно, представляет особенный интерес для радиотерапевтов [55], и установка PRIOR может позволить достичь этой цели. СПРсРН с релятивистскими протонами может быть реализована в уже существующих клинических центрах в Европе и Азии, использующих синхротроны для тяжелоионной терапии, на которых ионы углерода ускоряются до энергии 400 МэВ/а.е.м., что позволит достичь энергии протонов в диапазоне ~1 ГэВ.

Созданная комплексная система КСА [27] (глава 3) автоматизации установки ПУМА и экспериментов по протонной радиографии позволили повысить эффективность использования пучкового времени ускорителей ТВН-ИТЭФ. КСА позволяет организовывать сбор и сохранение всех поступающих экспериментальных данных и управлять режимами сброса пучка с ускорителя. Созданная КСА базируется на широкодоступных научных приборах (осциллографы, генераторы, источники питания, традиционные персональные компьютеры) что снижает стоимость проводимых экспериментов и позволяет оперативно организовывать новые конфигурации экспериментов. С внедрением КСА появилась возможность проводить полностью автоматизированные эксперименты. Систематизированы все поступающие экспериментальные данные на едином сервере с предоставлением доступа к ним всем участникам экспериментов. Разработана автоматизированная система управления магнитными элементами линии транспортировки заряженных частиц и диагностики пучка, что существенно упростило процесс настройки и проводки пучка. КСА успешно эксплуатируется более 4-х лет при проведении экспериментов [27] по протонной радиографии, радиобиологии [60], измерению пробегов ионов на установке ПРИМА и ПУМА в ИТЭФ. На основе модулей КСА разработаны несколько стендов для калибровки детекторов пучка и измерению параметров постоянных магнитов.

На основе системы автоматизации КСА установки ПУМА разработана и создана модернизированная система [61] сбора данных для экспериментальных работ по физике высокой плотности энергии в веществе на пучках тяжелых ионов ($U+73$, энергия 350 МэВ/а.е.м., интенсивность $5 \cdot 10^9$) на эксперименте ННТ на ускорителе SIS-18 (GSI, Darmstadt, Германия). С применением модернизированной КСА в 2010-2011 году на ускорителе SIS-18 проведены эксперименты по изучению фазовых переходов и параметров (коэффициент отражения, температура

поверхности) тугоплавких металлов (Pb, Ta, W) при воздействии пучка тяжелых ионов. Эта версия КСА позволяет в автоматическом режиме управлять режимами вывода пучка с ускорителя, обеспечивает сбор и запись в центральную базу данных информацию от всех диагностических и исполнительных приборов. На рисунке 5.2 показана схема и основные аппаратно-программные модули модернизированной версии КСА. Эта система автоматизации экспериментов построена на основе локальной вычислительной сети в форме звезды, в которой данные от всех программ диагностических приборов через базовый АПМ1, состоящий из программы VeamControl и блока управления сбросами пучка (БУП), передаются в базу данных MySQL сервера. Файлы с экспериментальными данными из диагностических приборов сохраняются непосредственно на сервере с использованием Samba Server. В данной версии КСА большая часть АПМ модулей, по считыванию сохранению и обработке данных из диагностических приборов, построено на основе программ, написанных специалистами GSI на языках Python, Java, LabView с добавлением процедур для обеспечения обмена данными с базовым модулем АПМ1 в рамках протокола TCP/IP Socket. Блок БУП создан на основе индустриального модуля ICPDAS I-7055. Синхронизации диагностических приборов осуществляется на основе АПМ, состоящего из генераторов задержек Stanford DG535, DG645 и программы DG_HHT.

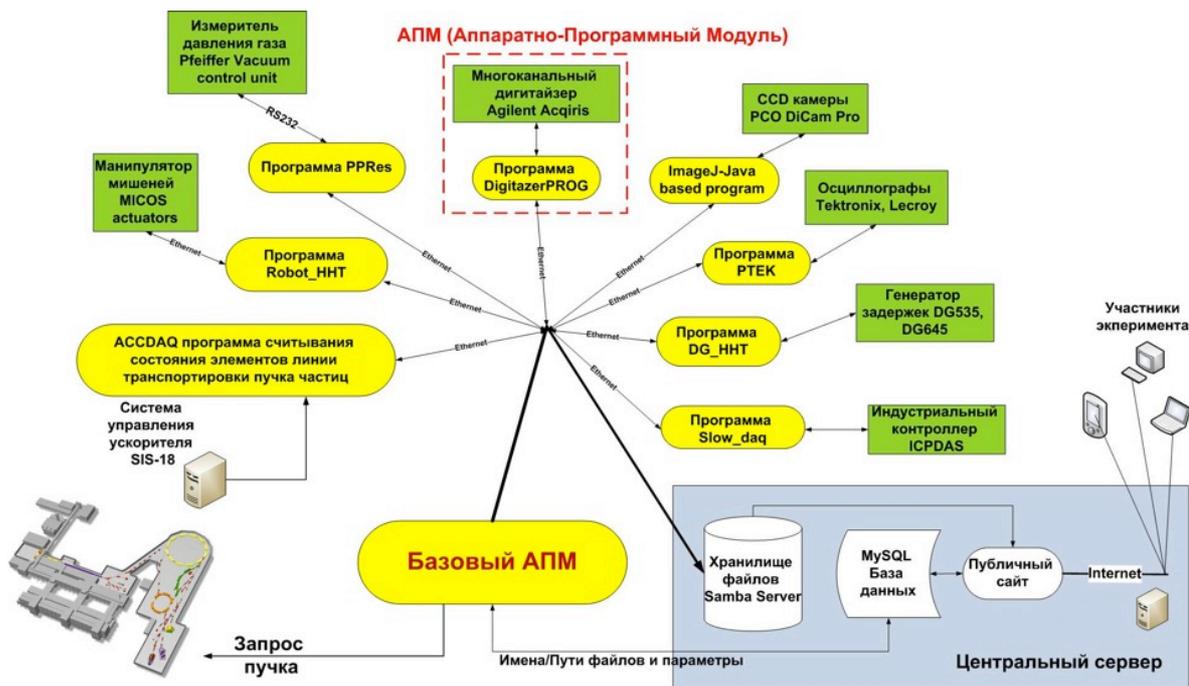


Рисунок 5.2 - Модернизированная версия системы автоматизации КСА для эксперимента S331 (HNT) проводимого в GSI на ускорителе SIS-18.

Данная версия КСА позволяет проводить считывание параметров с более чем 100 удаленных программ с числом записываемых, для каждого сброса, параметров более 1000. Концепция системы КСА установки ПУМА легла в основу системы автоматизации экспериментов [62,63] протонно-радиографической установки PRIOR, создаваемой в рамках международного проекта FAIR.

Заключение

В процессе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

- Создана экспериментальная установка протонный микроскоп ПУМА, позволяющая проводить протонно-радиографические исследования статических и динамических объектов с полем зрения 20 мм и пространственным разрешением от 60 мкм до 115 мкм в диапазоне массовых толщин объекта от 0.46 до 17 г/см² соответственно. Установка использует протонный пучок с энергией 800 МэВ от ускорительного комплекса ТВН-ИТЭФ;
- Для управления установкой ПУМА, сбора и обработки экспериментальных данных, диагностики пучка и управления линией транспортировки пучка создана оригинальная комплексная распределенная система автоматизации экспериментов КСА. На основе системы КСА разработана и реализована оригинальная методика автофокусировки радиографических изображений в схеме протонного микроскопа ПУМА;
- Измерено распределение плотности детонационных волн в цилиндрическом заряде эмульсионного взрывчатого вещества. Показано, что при плотности заряда $\rho \sim 1$ г/см³ и диаметре 15 мм возможна реализация различных режимов формирования детонационной волны (затухающая ударная волна, неустойчивый детонационно-подобный режим, стационарная детонационная волна);
- Измерены параметры детонационных волн (скорость $V = 6.9 \pm 0.2$ км/с, угол разлета продуктов детонации $25.0 \pm 3.0^\circ$) и распределение плотности за фронтом детонационной волны в прессованном ТНТ с плотностью ~ 1.6 г/см³ и диаметром заряда 10 мм методом протонной радиографии, показано, что, распределение плотности соответствует модели Зельдовича-Неймана-Деринга;

- Проведены измерения и визуализация процесса откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металла;
- Впервые, методом высокоэнергетической протонной радиографии, получены изображения биологических объектов, позволившие сделать вывод о возможности одновременного использования стереотаксической терапии и высокоэнергетической протонной микроскопии для повышения точности облучения опухолей.

С использованием установки ПУМА выполнены работы по экспериментальному исследованию ударных и детонационных процессов в конденсированных и эмульсионных взрывчатых веществах, исследования процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических образцов, исследования плотной неидеальной плазмы ксенона и аргона при ударно-волновом нагружении. Проведен ряд уникальных экспериментов по изучению внутренней структуры биологических объектов. Неразрушающим методом были проведены эксперименты по трехмерной реконструкции внутренней структуры статического цилиндрического объекта - имитатора тепловыделяющего элемента ядерного реактора.

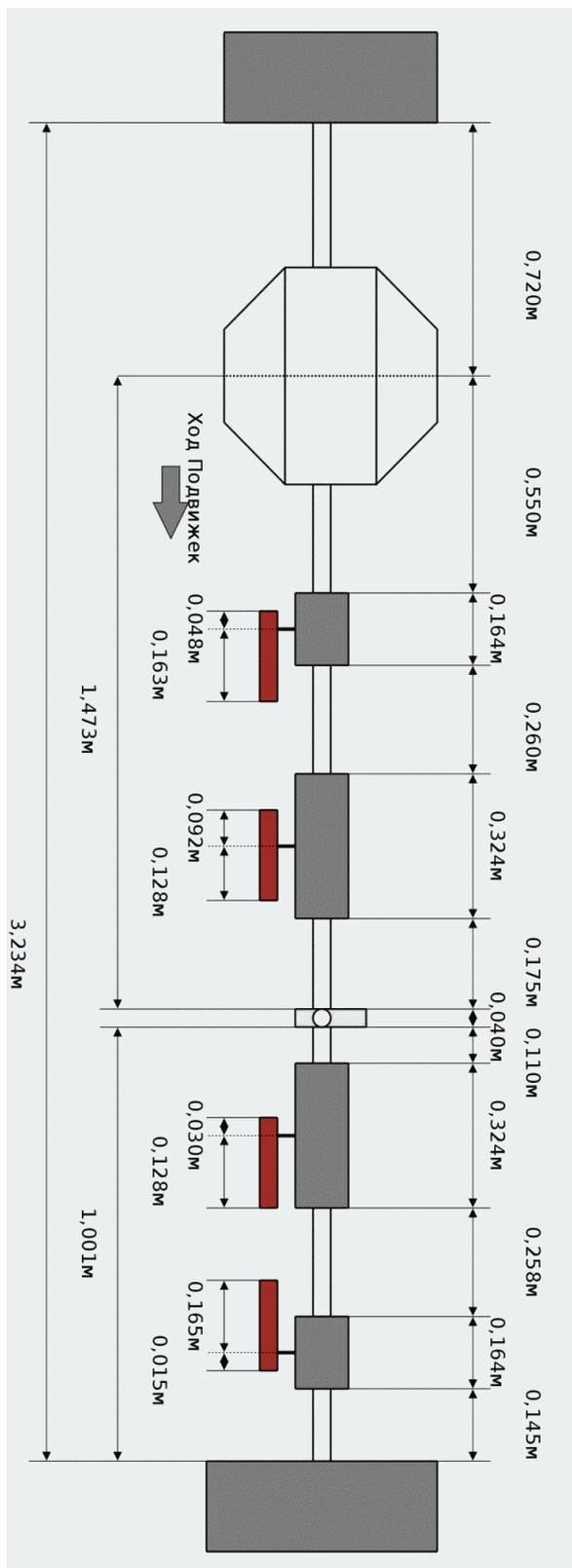
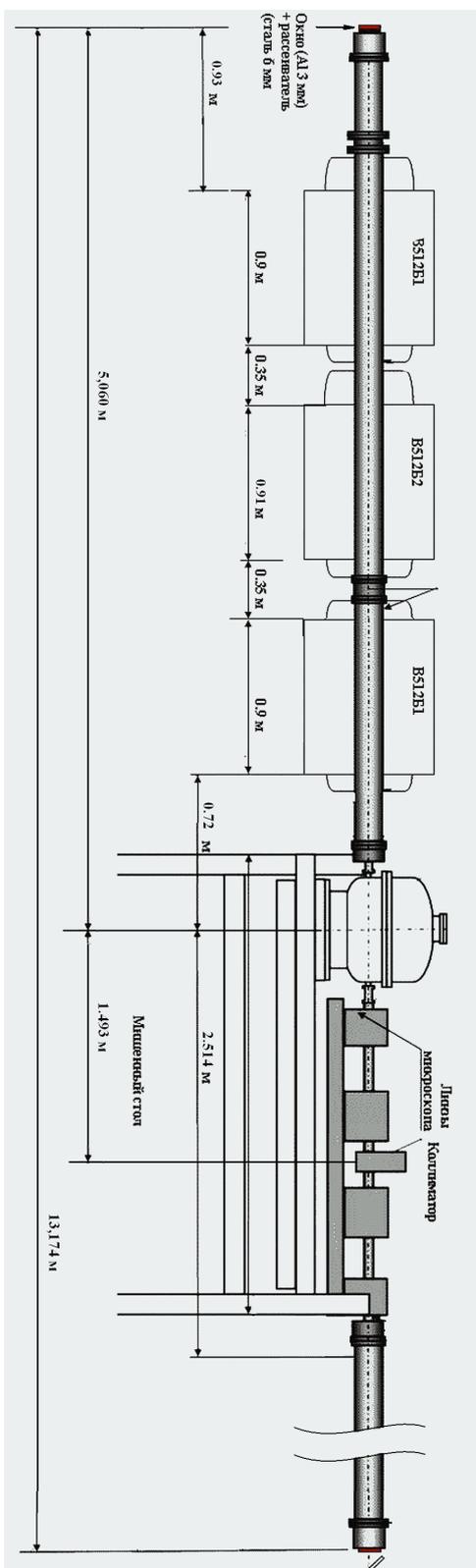
Экспериментальные данные и технические решения, полученные на установке ПУМА, будут использованы при разработке высокоточного (пространственное разрешение <10 мкм) протонного микроскопа PRIOR для проекта FAIR в Дармштадте, Германия.

Пользуясь случаем, автор выражает благодарность всему коллективу лаборатории номер 118 ИТЭФ, своему научному руководителю д.ф-м.н. Голубеву А.А. за помощь и руководство при создании протонно-радиографической установки и проведении экспериментальных работ, член-кор. РАН д.ф-м.н. Шаркову Б.Ю. за поддержку,

к.ф-м.н. Демидову В.С. и к.ф-м.н. Туртикову В.И. за помощь и участие на всех этапах создания представленной работы, Ладыгиной Е.М. за помощь в создании системы автоматизации экспериментов, к.ф-м.н. Кулевому Т.В., к.ф-м.н. Кацу М.М., д.ф-м.н. Куликову В.В. за содержательные беседы по теме диссертации. Выражаю также благодарность сотрудникам МИФИ д.ф-м.н. Кузнецову А.П., к.ф-м.н. Губскому К.Л. за создание интерферометра VISAR. Автор выражает благодарность коллективу ИПХФ РАН, в особенности член-кор. РАН д.ф-м.н. Минцеву В.Б., к.ф-м.н. Шилкину Н.С., к.ф-м.н. Колесникову С., к.ф-м.н. Николаеву Д.Н., д.ф-м.н. Терновому В.Я., к.ф-м.н. Дудину С.В., к.ф-м.н. Уткину А.В. за помощь в подготовке и проведении исследований динамических процессов. Выражаю благодарность сотрудникам РФЯЦ ВНИИЭФ Таценко М.В., Рудневу А.В., Бурцеву В.В., за помощью при создании многокадровой системы регистрации изображений. Выражаю благодарность сотруднику GSI (Дармштадт) Ph.D. Варенцову Д.В. за помощь в исследовании биологических объектов. Хочу выразить отдельную благодарность своему отцу, семье и особенно жене, терпение и участие которых явилось залогом благополучного осуществления данной работы.

Приложение А - Схема установки ПУМА

Слева – общий чертеж установки. Справа – детализация размеров системы формирования и фокусировки изображений.



Список литературы

1. В.Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков; Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества; Успехи Физических Наук, том 178 (2), Стр. 113-138;
2. А.А. Голубев., Докторская диссертация, Москва, ГНЦ ИТЭФ, 2006;
3. C. Sturm, H. Stocker, The facility for antiproton and ion research FAIR, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2011, Volume 8, Issue 8 , pp 865-868;
4. HEDgeHOV collaboration technical proposal, 2005, http://hedgehob.physik.tu-darmstadt.de/HEDgeHOV_Publications_Frameset.html;
5. Koehler A.M., Proton Radiography, Science 160 (1968), p.303;
6. Cookson J.A., Radiography with Protons, Naturwissenschaften 61, 1974, p. 184;
7. O. V. Evdokov, A. N. Kozyrev et al., High-speed X-ray transmission tomography for detonation investigation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575, 2007, p.116–120;
8. Scarpetti, R.D., Status of the DARHT-II Accelerator, Proceedings of PAC07, Albuquerque, 2007, New Mexico, USA, p 831;
9. C.L. Morris et al., Charge particle radiography, Rep.Prog. Phys. 76, 2013, p. 26;
10. A. Aulchenko, V. Zhulanov et al., One-dimensional detector for study of detonation processes with synchrotron radiation beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2005, Vol. 543, Issue 1, p. 350-356;
11. V. Aulchenko, O. Evdokov at al., Development of fast one-dimensional X-ray detector for imaging of explosions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, Vol. A513, Issue 1-2, p. 383-393;

12. Кононов Б.А., Лукин А.Л. Протонная радиография. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1988;
13. King N.P.S., Ables E., Adams K. et al., An 800-MeV proton radiography facility for dynamic experiments, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1999, V. A424, P. 84;
14. Mottershead T., Barlow D., Blind B. et al., Design and operation of a proton microscope for radiography at 800 MeV, Proc. 2003 Particle Accelerator Conference, Portland (Oregon, USA), May 12-16 2003, pp. 702-704;
15. Голубев А.А., Демидов В.С. и др., Применение пучков ускорительно-накопительного комплекса ТВН для диагностики быстропротекающих процессов, Атомная энергия, 2008 .Т. 104, вып.2, с. 99;
16. А.А. Голубев, В.С. Демидов, Е.В. Демидова, С.В. Дудин, А.В. Канцырев, С.А. Колесников и др., Диагностика быстропротекающих процессов пучком заряженных частиц от ускорителя ТВН-ИТЭФ, Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 4;
17. Ю. М. Антипов, А. Г. Афонин и др., Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ, Приборы и Техника Эксперимента, 2010, №3, с. 5-12;
18. <http://pdg.web.cern.ch/pdg/2011/reviews/rpp2011-rev-passage-particles-matter.pdf>;
19. M.A. Koehler et al., Proton radiography, Science 160, 1968, p.303;
20. J.A. Cookson, Radiography with protons, Naturwissenschaften, Vol. 61, 1974, p.184-191;
21. Mottershead C Thomas, Zumbro John D., Magnetic Optics for Proton Radiography, Proceedings of the Particle Accelerator Conference. Canada Vancouvev, 1997, p. 1397–1399;

22. А.Д. Дымников, Г.М. Осетинский, Системы формирования протонных пучков микронных размеров, Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1989, том 20, вып.3;
23. Hermann Wollnik, Optics of Charged Particles, Academic Press Inc., California, 1987;
24. K. Makino, M. Berz, COSY INFINITY Version 9, Nuclear Instruments and Methods A558, 2005, 346-350;
25. F. Merrill; International Workshop on High Energy Proton Microscopy NEPM 2010; <http://www.ficp.ac.ru/hepm2010/presentations/NEPM2010-Merrill.pdf>;
26. Н.Н. Алексеев и др., Ускоритель-Накопитель ИТЭФ-ТВН; Particles and Nuclei Letter, 2004 No3., p.120;
27. А. В. Канцырев и др.; Комплексная система автоматизации экспериментов на быстром выводе ускорительно-накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ, Приборы и Техника Эксперимента, 2010, № 5, с. 47–59;
28. А.В. Канцырев, А.А. Голубев, А.В. Богданов, В.С. Демидов и др., Протонный микроскоп на ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ, Приборы и Техника Эксперимента, 2014, № 1, с. 5–14;
29. Голубев А.А. и др, Отчет о НИР госконтракта РОСАТОМ №Н.4е.45.90.11.1058, 2011;
30. Канель Г.И., Разоренков С.В., Уткин С.В, Фортов В.Е., Ударно-волновые явления в конденсированных средах, М.: Янус-К. 1996;
31. Жарков В. Н., Калинин В. А., Уравнение состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах, М.: Наука, 1968;
32. А. П. Кузнецов, С. А. Колесников, А.А.Голубев, К. Л. Губский, С. В. Дудин, А. В. Канцырев и др., Лазерный интерферометр для измерения массовой скорости конденсированных веществ в ударно-волновых экспериментах на протонно-радиографической установке ТВН-ИТЭФ, Приборы и техника эксперимента 2011, № 3, с. 116–125;

33. Hemsing W.F., Velocity sensing interferometer (VISAR), Rev. Sci. Instrum., 1979, V. 50, p. 73;
34. SRIM - The stopping and range of ions in matter, <http://www.srim.org/>;
35. F.James, MINUIT – Function Minimization and Error Analysis, CERN Program Library Long Writeup D506 (Version 94-1), 1998;
36. V.S. Skachkov et. al., REPM Quadrupole for Proton Microscopy; 2th Workshop on High Energy Proton Microscopy, 2010;
37. Skachkov V.S., Quasi-sheet multipole permanent magnets, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 500, 2003, 43-54;
38. Kolesnikov S. A., Dudin S. V., Lavrov V. V. et al., AIP Conf. Proc., Shock Compression of Condensed Matter – 2011, Chicago, USA, 26june-01july 2011, Vol. 1426, 2012, pp. 390-393;
39. А.А. Голубев и др, Отчет о НИР госконтракта РОСАТОМ №Н.4е.45.90.10.1055, 2010;
40. S. A. Kolesnikov, A. A. Golubev, V. S. Demidov, S. V. Dudin, A. V. Kantsyrev
et al.; Application of charged particle beams of TWAC-ITEP accelerator for diagnostics of high dynamic pressure processes. High Pressure Res, 2010, vol. 30(1), pp. 83-87;
41. Андреев К.К., Харитон Ю.Б., Некоторые соображения о механизме самораспространяющихся реакций, Докл. АН СССР, 1934. т.1, в.7;
42. С.А. Колесников и др., Исследование детонации конденсированных ВВ методом протонной радиографии на ускорителе ИТЭФ-ТВН, Сборник тезисов докладов Международной конференции «XIII Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 2011, с.291-293;
43. В.Е. Фортов, Ю.В. Иванов и др., Взрывной генератор неидеальной плазмы, ДАН, Т.221, 1975, №6, с. 1307-1309;

44. A.Kantsyrev, A.A. Golubev et. al, 4th International Workshop on High Energy Proton Microscopy, “Proton radiography at ITEP” , Darmstadt, Germany, July 15-17, 2013, http://www-aix.gsi.de/conferences/HEPM2013/talks/Jul15-1455_Golubev_Kantsyrev.pdf;
45. D. Varentsov, A. Bogdanov, V.S. Demidov, A.A. Golubev, A. Kantsyrev, et al, First biological images with high-energy proton microscopy, European Journal of Medical Physics (Physica Medica) 29, 2013, pp. 208-213;
46. A. Kak, M. Slaney; Principles of Tomographic Imaging (IEEE Press, New York, 1988, p.50;
47. Gordon R.; Bender R.; Herman G.T., Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography, Journal of theoretical biology 29 (3), 1970, p.471;
48. Halperin E.C., Particle therapy and treatment of cancer, Lancet Oncol. 7, 2006, p.676;
49. Durante M., Loeffler J.S., Charged particles in radiation oncology, Nat. Rev. Clin. Oncol. 7, 2010, 37;
50. Schippers J.M., Lomax A.J., Emerging technologies in proton therapy, Acta Oncol. 50, 2011, p. 50;
51. Schulz-Ertner D., Tsujii H., Particle radiation therapy using proton and heavier ion beams. J. Clin Oncol. 25, 2007, p.953;
52. Durante M., Cucinotta F.A., Physical basis of radiation protection in space travel, Rev. Mod. Phys. 83, 2011, p.1245;
53. А.А. Воробьев, Е.М. Иванов, А.Г.Крившич, Г.А. Рябов и др., ЦЕНТР ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ ПЕТЕРБУРГСКОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Б.П. КОНСТАНТИНОВА, ВАНТ., 2012, No 4(80);
54. В.Б. Низковолос, Докторская диссертация, Санкт-Петербург, Институт Мозга Человека РАН, 2007;

55. Verellen D. et al., Innovations in image-guided radiotherapy, *Nat. Rev. Cancer* 7, 2007, p. 949;
56. V.E.Fortov , B.Goel, et al., Numerical simulation of nonstationary fronts and interfaces by the Godunov method in moving grids, *Nuclear Science and Engineering*. 123, 1996, p. 169-189;
57. А.В. Шутов, диссертация кандидата физико-математических работ, Черногловка, ИПХФ РАН, 2003;
58. Оландер Д., Теоретические основы тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, Пер. с англ. В 3 ч. Ч. 1., ЦНИИАтоминформ, 1982. 612 с.;
59. Merrill F.E. et al., Proton microscopy at FAIR, *AIP Conf. Proc.* 1195, 2009, p.667;
60. Н. В. Марков, А. В. Бахмутова, А. А. Голубев, А. В. Канцырев и др., МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ, *Приборы и Техника Эксперимента*, 2014, № 1, с. 90–96;
61. А.Hug, В. Ionita, А. Kantsyrev, L. Shestov, S. Udrea, D. Varentsov; Data acquisition system for ННТ experiments; GSI Scientific Report 2012; PNI-PP-31, (<http://www-alt.gsi.de/informationen/wti/library/scientificreport2011/PAPERS/PNI-PP-31.pdf>);
62. А. Kantsyrev et. al, Development of PMQ lenses for PRIOR, 4th International Workshop on High Energy Proton Microscopy, Дармштадт, Германия, July 15-17, 2013, http://www-aix.gsi.de/conferences/HEPM2013/talks/Jul16-1215_Kantsyrev.pdf;
63. А. Kantsyrev at al., Data Acquisition and Control System for PRIOR 4th International Workshop on High Energy Proton Microscopy, Дармштадт, Германия, July 15-17, 2013, http://www-aix.gsi.de/conferences/HEPM2013/talks/Jul17-1515_Udrea.pdf.