

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2014 год.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт теоретической и экспериментальной физики» Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», г. Москва

Научный руководитель:

Голубев Александр Александрович, доктор физико-математических наук, зам. директора, ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ” НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва.

Официальные оппоненты:

Трубников Григорий Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, и.о. вице-директора, Объединенный Институт Ядерных Исследований, г. Дубна.

Фещенко Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, зав. отделом ускорительного комплекса, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт Ядерных Исследований РАН, г.Троицк.

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество "Московский радиотехнический институт Российской Академии Наук", г. Москва.

Защита состоится "24" июня 2014 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 в конференц-зале ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ” адресу: г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, д. 25

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан 23 мая 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

/ Васильев В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Исследования по физике высокой плотности энергии в веществе необходимы для получения новых знаний о физических процессах и свойствах материалов в условиях сверхвысоких давлений, плотностей и температур. Крайне важной задачей является измерение параметров вещества (плотности и давления) в экстремальном состоянии под воздействием импульсного драйвера (тяжелоионный пучок, ударная волна, электровзрыв проводника и т.д.) [1]. Большинство существующих в настоящий момент экспериментальных методик не позволяют получать прямую (абсолютную) информацию о ряде важных характеристик вещества, таких, как его плотность и микроструктура, непосредственно в ходе динамического процесса. Такие возможности предоставляет радиографическое исследование с использованием высокоэнергетичных пучков заряженных частиц (в том числе протонов), нейтронов либо рентгеновского излучения.

Протонная радиография [2] с применением высокоэнергетичных (≥ 800 МэВ) протонов обладает большей просвечивающей способностью по отношению к рентгеновскому излучению (средняя длина свободного пробега протонов для мишени из тяжелых металлов ~ 200 г/см², что более чем в восемь раз больше чем для рентгеновский лучей с энергией ~ 4 МэВ). Это особенно актуально при исследовании плотных динамических мишеней. Структура протонного пучка, для линейных и кольцевых ускорителей протонов, обычно состоит из многих последовательных импульсов (так называемых банчей длительностью 10-100 нс), что облегчает создание многокадровой системы регистрации радиографических изображений. Существующие протонно-радиографические установки на ускорителях протонов в России [3] и США [2] 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, что определяет актуальность создания подобной установки в России и проведение с ее помощью исследований динамических процессов.

Цели диссертационной 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 10мм, 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 биологических объектов. 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 объектов позволила провести ряд уникальных исследований статических и динамических мишеней на основе взрывных генераторов. Параметры созданной установки (пространственное разрешение до 60 мкм) позволяют проводить дефектоскопические и томографические исследования внутренней структуры статических объектов. Отлаженная схема установки ПУМА и полученные на ней экспериментальные данные будут использованы при создании протонного микроскопа PRIOR (Proton microscope for FAIR) в GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung, Дармштадт, Германия), который должен обеспечить проведение исследований динамических объектов (в экстремальном состоянии вещества под воздействием тяжелого пучка) с рекордным пространственным ($< 10 \text{ мкм}$) и плотностным ($< 1\%$) разрешением. Созданная комплексная система автоматизации экспериментов на установке ПУМА позволила повысить эффективность использования пучкового времени ускорителя ТВН-ИТЭФ.

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 реализация различных режимов формирования детонационной волны (затухающая ударная волна, неустойчивый детонационно-подобный режим, 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 существенный вклад в создание, эксплуатацию и проведение экспериментов на первой в России протонно-радиографической установке с увеличением изображения объекта – протонный микроскоп ПУМА в ИТЭФ. Он участвовал в разработке схемы установки, расчете основных параметров, создании магнитооптической системы и системы регистрации протонно-радиографических изображений. Диссертант непосредственно участвовал во всех экспериментах и обработке экспериментальных данных на установке ПУМА при исследовании динамических и статических объектов. Диссертантом лично была разработана и создана универсальная комплексная система автоматизации КСА экспериментов и установки 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, система радиационной безопасности.

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), конференциях “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 и 5 входят в список ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Объем диссертации 128 страниц, включая 74 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 63 ссылки.

Содержание работы

Во введении сформулирована цель работы, обосновывается актуальность темы диссертации, поставлены задачи исследований, представлены положения выносимые на защиту.

В первой главе кратко изложены основные процессы взаимодействия высокоэнергетичного протонного пучка с веществом. Приводится описание метода протонной радиографии с использованием магнитной оптики и его сравнение с методом классической рентгенографии. Дается обзор экспериментальных работ по применению метода протонной радиографии.

В главе описана схема и методика расчета магнитооптической системы протонно-радиографической установки. Рассмотрены процессы, вносящие основной вклад в трансмиссию протонного пучка, описан принцип регулировки контраста протонно-радиографических изображений с помощью изменения углового аксептанса линии транспортировки пучка. На рисунке 1 показана характерная схема секции формирования изображения исследуемого объекта установки по протонной радиографии. Для минимизации хроматических aberrаций и согласования магнитооптической схемы протонно-радиографической установки перед плоскостью размещения объекта устанавливается несколько квадрупольных линз.

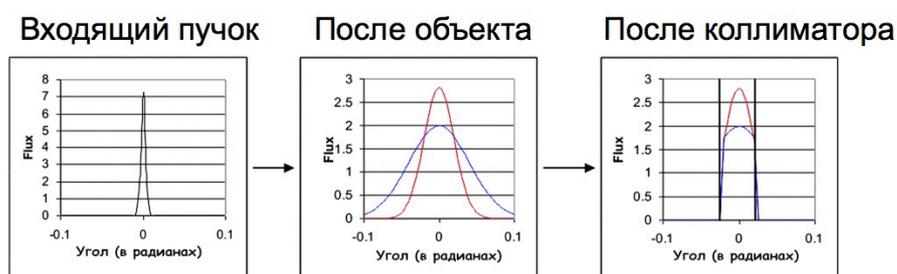
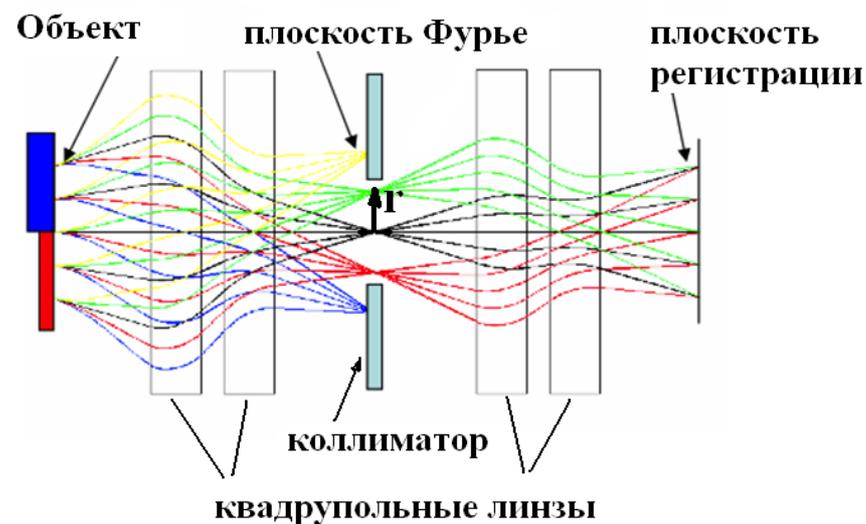


Рисунок 1 – Вверху - секция протонно-радиографической установки служащая для формирования изображения исследуемого объекта (“русский квадруплет”).

Внизу – угловое распределение пучка протонов в трех плоскостях.

Магнитная оптика установки спроектирована таким образом, что в середине формирующей секции располагается так называемая плоскость Фурье, в которой происходит промежуточная фокусировка пучка и разделение в пространстве протонов (r (на рисунке 1) – радиус прохождения протонов в плоскости Фурье), направивших в исследуемом объекте различные углы многократного кулоновского рассеяния (МКР). В эту плоскость для улучшения контраста получаемых изображений помещается коллиматор или антиколлиматор, обеспечивающий отбор протонов, имеющих определённый угол МКР. Результирующая трансмиссия пучка протонов в плоскости регистрации, с учетом кулоновского рассеяния и ядерного взаимодействия описывается выражением:

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

где θ_c - угловой аксептанс установки, λ_c - ядерная длина взаимодействия, x - массовая толщина исследуемого объекта ($\text{г}/\text{см}^2$), x_0 - радиационная длина взаимодействия, p - импульс пучка протонов, βc - скорость протонов.

Параметры λ_c и x_0 определяются химическим составом объекта. Измеряя трансмиссию пучка с учетом знания химического состава исследуемого объекта (λ_c и x_0) можно определить значение x массовой толщины объекта в любой точке его поперечного сечения.

Одним из преимуществ протонной радиографии является возможность визуализации динамических процессов. Так как временная структура протонного пучка обычно состоит из нескольких импульсов (банчей длительностью 10-100 нс), регистрируя на ПЗС камеры изображение исследуемого процесса отдельно от каждого банч пучка, можно получить несколько кадров динамического процесса. В главе особое внимание уделяется необходимости построения магнитооптической схемы протонно-радиографической установки с увеличением изображения исследуемого объекта (протонный микроскоп) (для достижения наилучшего пространственного разрешения). Описываются способы обработки протонно-радиографических изображений с восстановлением данных о плотности исследуемых объектов.

Во второй главе дается общее описание экспериментальной установки. Приведены параметры ускорительно-накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ (ТерраВатный Накопитель, Москва, Россия). Описывается линия транспортировки пучка (установка ПРИМА в ИТЭФ), на базе которой разрабатывался протонный микроскоп ПУМА. Протонный микроскоп ПУМА позволяет проводить измерения распределения

плотности вещества статических и динамических объектов с помощью пучка протонов с энергией 800 МэВ. Протонно-радиографическое изображение изучаемого объекта, помещенного в предметную плоскость установки ПУМА, формируется в плоскости детектора с коэффициентом увеличения $k=4$. Установка рассчитана на проведение 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 массовой 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 (ширина на полувысоте) каждый с интервалом между ними 250 нс, позволяет исследовать динамическое состояние вещества в четырех последовательных радиографических кадрах. Схема магнитной оптики установки представляет собой систему из 7 магнитных квадрупольных линз (рисунок 2). Три электромагнитные квадрупольные линзы МЛ-15 (линзы 1-3 на рисунке 2) обеспечивают оптимальные параметры (размер и угловые характеристики) протонного пучка в плоскости размещения исследуемого объекта "М" (рисунок 1). Для формирования и увеличения изображения объекта на плоскости регистрации "И", используется система из четырех квадрупольных магнитных линз на постоянных магнитах (ПМК) (система формирования изображения на рисунке 2), имеющих высокий градиент магнитного поля (28 Т/м) при малых геометрических размерах (длины 0.16 м и 0.32 м, апертура 32 мм). Настройка резкости изображения производится продольным перемещением линз ПМК с использованием созданных линейных манипуляторов. Рассеиватель, изготовленный из железа толщиной 6 мм, служит для увеличения размеров пучка в плоскости установки объекта. Для проведения экспериментов с динамическими объектами вакуумная

камера установки (давление 10^{-3} торр) защищена входным и выходным защитными окнами из алюминия толщиной 3 мм.

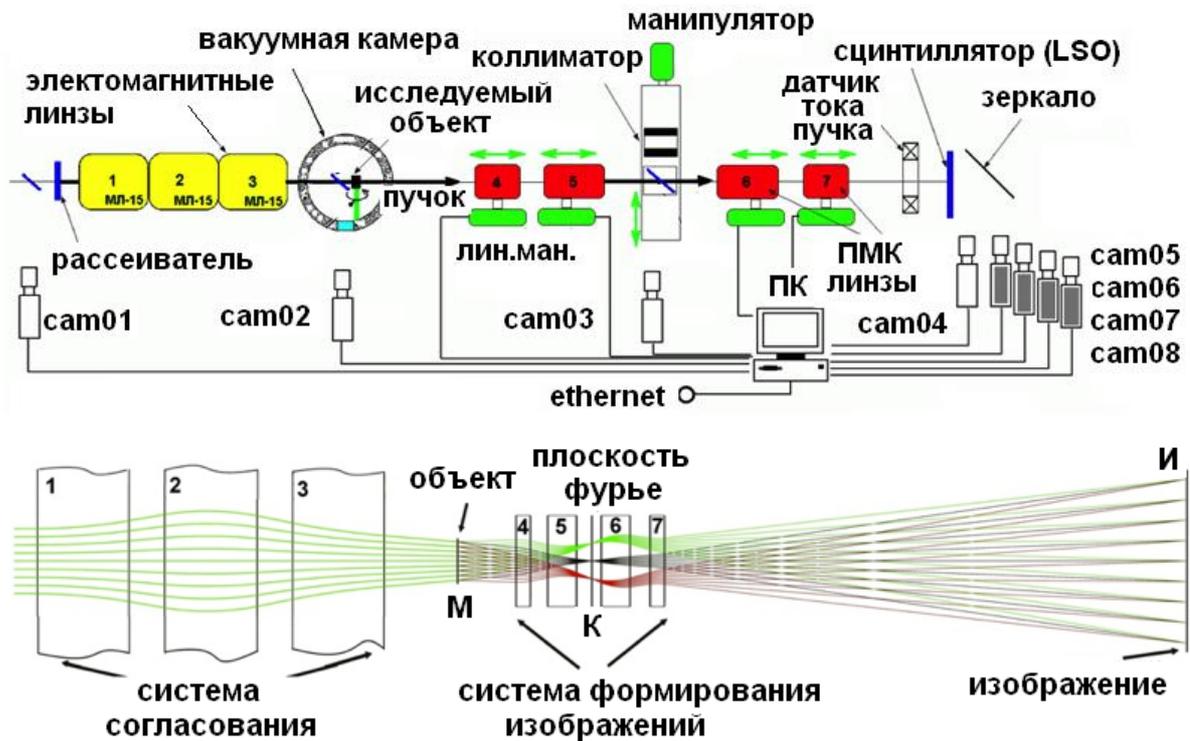


Рисунок 2 - Схема расположения магнитных элементов (вверху) и траектория пучка (внизу) протонного микроскопа ПУМА.

В середине системы формирования изображений (между ПМК линзами 5 и 6) формируется плоскость Фурье “К”. В данной плоскости с помощью манипулятора устанавливаются латунные коллиматоры диаметром 7 или 14 мм или сцинтиллятор, служащий для настройки пучка. Полная длина установки составляет 13 м. Исследуемые объекты помещаются в вакууме во взрывозащитной камере, аттестованной для применения взрывных генераторов массой до 100 г в эквиваленте ТНТ. Для визуализации изображений используется сцинтиллятор силикат лютеция (LSO) толщиной 2.8 мм и диаметром 80 мм. Система регистрации изображений создана на основе четырех ПЗС камер с электронно-оптическими затворами с временем экспозиции каждого кадра 100 нс. Для ударно-волновых экспериментов, проводимых на установке ПУМА был разработан лазерный интерферометр VISAR (Velocity Interferometer System

of Any Reflector), позволяющий измерять скорость перемещения поверхности динамических образцов в диапазоне до 20 км/с с точностью 10 м/с. На рисунке 3 приведено фото установки ПУМА.



Рисунок 3 - Фотография протонного микроскопа ПУМА.

Расчет и оптимизация (для минимизации хроматических aberrаций) схемы магнитной оптики установки ПУМА производился по программе COSY Infinity[4]. Измерение предельного разрешения установки ПУМА выполнено для статического объекта, представляющего собой латунную пластину толщиной 550 мкм (массовая толщина 0.46 г/см²), устанавливаемую перпендикулярно пучку протонов. Под пространственным разрешением установки подразумевается размытие резкой границы изображения объект-вакуум, описываемое шириной (стандартное отклонение σ) аппроксимирующего гауссового распределения. На рисунке 4 представлен профиль радиографического изображения края пластины. Полученное разрешение установки ПУМА, составляет $\sigma=(60 \pm 5)$ мкм для массовой толщины объекта 0.46 г/см². В Таблице 1 приведены основные параметры установки ПУМА.

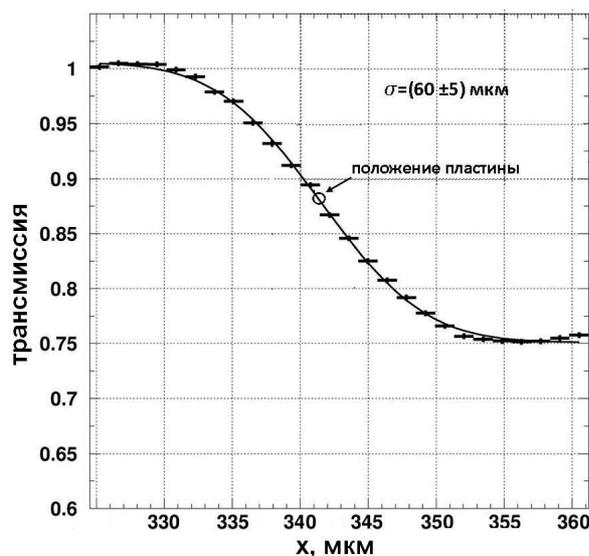


Рисунок 4 - Профиль протонно-радиографического изображения края латунной пластины толщиной 550 мкм, полученного на протонном микроскопе ПУМА.

Таблица 1. Основные параметры протонного-микроскопа ПУМА

Наименование параметра	Значение
Энергия протонного пучка	800 МэВ
Разброс импульса входящего пучка протонов $\Delta p/p$	$\sim 10^{-3}$
Угол расходимости пучка	0.5 мрад
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
Угловой аксептанс установки	9 мрад

В третьей главе дается описание комплексной системы автоматизации КСА экспериментов и установки ПУМА. Система КСА[9] состоит из следующих основных частей:

- подсистема контроля и управления экспериментом (ПКУЭ), предназначена для организации автоматического считывания и обработки экспериментальных данных;

- микроконтроллерный блок управления сбросами пучка (МБУП) и синхронизации;
- подсистема контроля и управления магнитными элементами линии транспортировки пучка и диагностики пучка (ПУЭД);
- подсистема радиационной безопасности (ПОРБ);
- сервер КСА, служащий для хранения и визуализации в сети Интернет (сайт <http://plasma.itep.ru>) экспериментальных данных и параметров экспериментальной установки.

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. Для сбора информации с измерительных приборов создан набор из 15 типов универсальных аппаратно-программных модулей (АПМ)[9], 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, для выполнения в режиме реального времени обработки сигналов детекторов, цифровых изображений и статистического анализа данных. Передача информации от модуля к модулю в локальной сети осуществляется с использованием протокола TCP/IP Socket. В глобальную сеть на сайт <http://plasma.itep.ru> передается информация о текущем состоянии эксперимента. Программное обеспечение КСА написано на языках программирования Delphi XE, Python, Си.

В процессе проведения экспериментов по протонной радиографии необходимо производить точную настройку магнито-оптической системы в зависимости от массовой толщины исследуемых объектов и энергии пучка. При этом протонный микроскоп настраивается для достижения наибольшей резкости радиографических изображения исследуемых

объектов. Для ускорения процесса настройки протонного микроскопа и получения максимального пространственного разрешения была разработана оригинальная автоматизированная методика и система для фокусировки радиографических изображений. Данная система реализована с использованием трех аппаратно-программных модулей, включающих разработанные автором программы: PROTOM[10] для перемещения ПМК линз; SDU-ITEP[9] для считывания с ПЗС камер SDU-285 (фирма Спецтелетехника) и обработки радиографических изображений; BeamControl[9] для управления сбросами пучка и синхронизации. На рисунке 5 показана схема взаимодействия программ в системе автоматической фокусировки радиографических изображений.

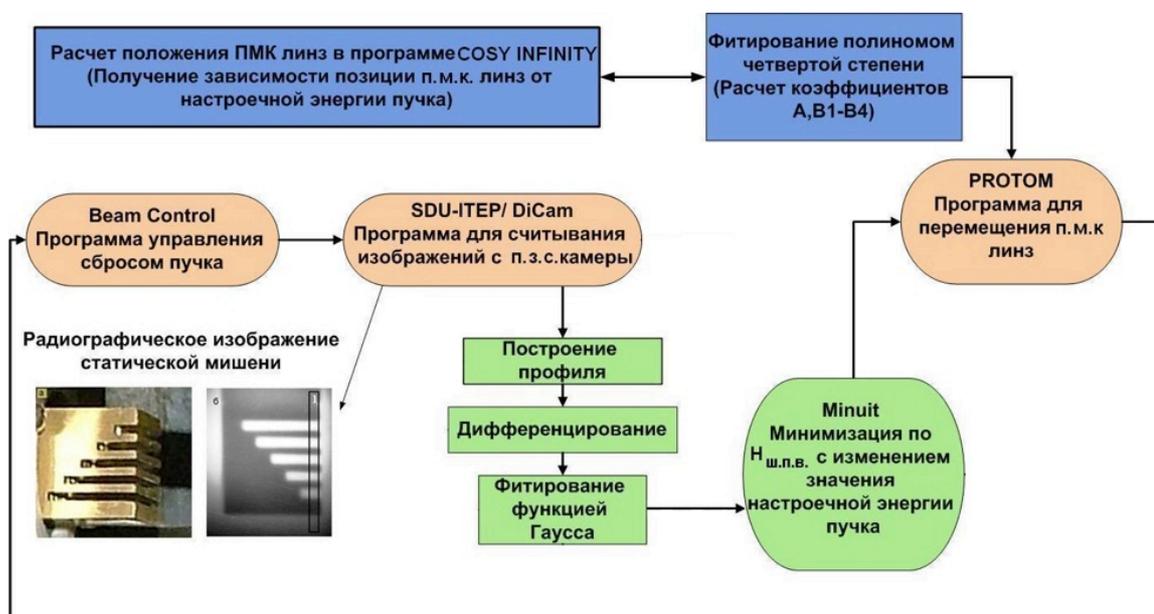


Рисунок 5 - Блок схема системы автоматической фокусировки радиографических изображений.

Процесс настройки установки ПУМА и получение наилучшего пространственного разрешения требует примерно 30 итераций сброса пучка (~10-15 минут) и проходит полностью в автоматическом режиме, что существенно, более чем в 10 раз, ускоряет процедуру настройки протонного микроскопа.

В четвертой и пятой главе приведено описание и обсуждение результатов экспериментальных исследований ударно-волновых

процессов. В главе приведены результаты экспериментов по исследованию детонационной волны в цилиндрическом заряде из прессованного ТНТ диаметром 10 мм и плотностью 1.63 г/см^3 . На рисунке 6 приведены протонно-радиографические изображения заряда в статике и в двух последовательных моментах времени, с разницей по времени 250 нс, при детонации взрывчатого вещества (ВВ). На рисунке 7 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 6.

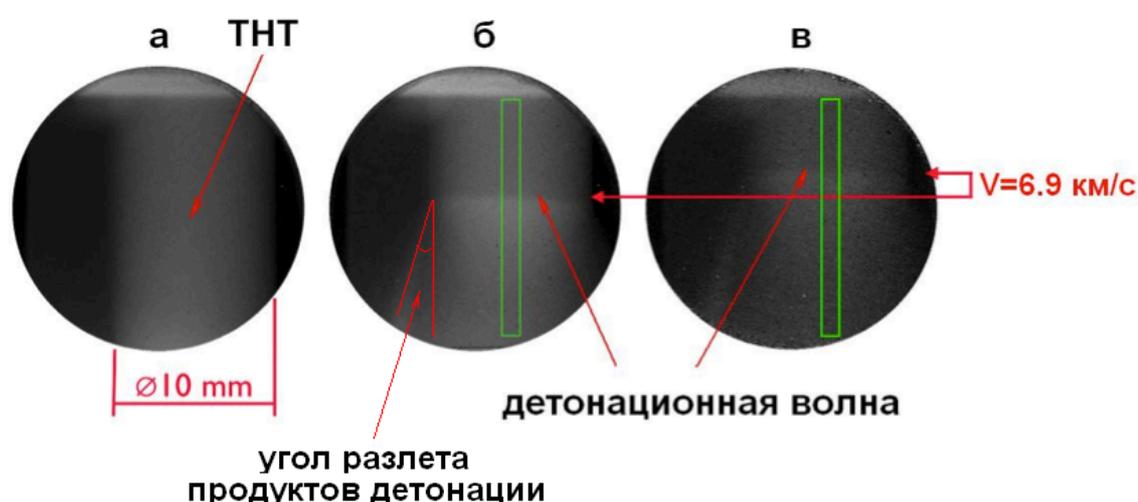


Рисунок 6 - Радиографические изображения детонационной волны в цилиндрическом заряде ТНТ диаметром 10 мм: а – статическое изображение объекта; б, в – изображения заряда при детонации для двух последовательных кадров с интервалом 250 нс.

(направление распространение детонационных волн снизу вверх)

По смещению положения детонационных волн между двумя радиографическими кадрами измерена скорость стационарной детонации для данного заряда ТНТ, равная $V=6.9\pm 0.2 \text{ км/с}$, что в пределах погрешности измерений совпадает с литературными данными [5]. Для исследованного заряда ТНТ проводилось численное 2D-моделирование процесса (рисунок 7г) распространения детонационной волны, согласно модели Зельдовича-Неймана-Деринга[6], а также определены поля

давления и плотности в объеме мишени. Наблюдается хорошее совпадение измеренного профиля плотности с расчетным. Угол разлета продуктов детонации, определенный по данным моделирования, составляет 23.8° , что в пределах погрешности измерения совпадает со значением найденным в эксперименте $25.0 \pm 3.0^\circ$.

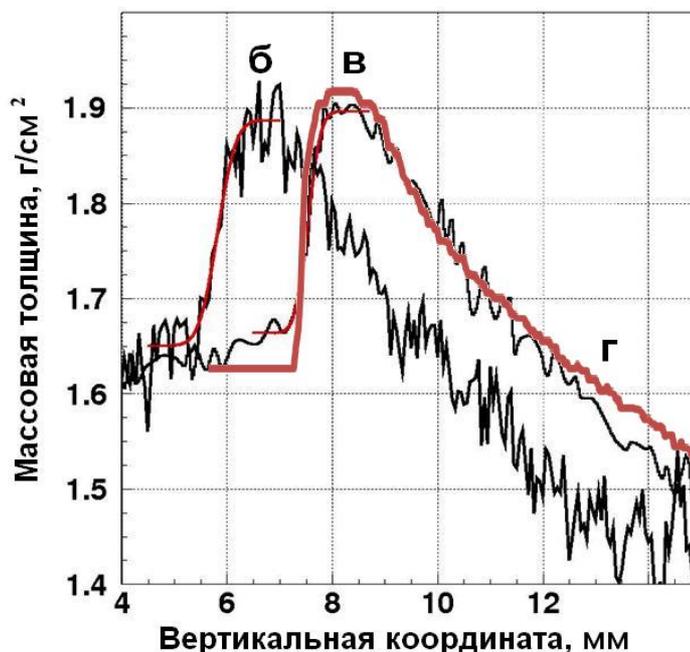


Рисунок 7 - Профили фронта детонационной волны в ТНТ, полученные по двум радиографическим изображениям с интервалом 250 нс; б,в – профили соответствующие радиографическим изображениям на рисунке б; г (жирная линия) - расчетный профиль согласно модели Зельдовича-Неймана-Деринга.

С использованием протонного микроскопа ПУМА выполнены работы по экспериментальному исследованию ударной сжимаемости и структуры детонационных волн в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ) [7]. ЭВВ, применяемое в горнодобывающей промышленности, состоит из эмульсионной основы и сенсibilизатора. Основу получают, перемешивая водный раствор аммиачной селитры с минеральным маслом и эмульгатором. Эмульсионная основа не детонирует. Для возможности детонации к основе добавляют сенсibilизатор. В качестве сенсibilизатора используют полые микросферы. В эксперименте использовалось ЭВВ содержащее 92,2% окислителя (водный раствор

нитрата аммония), 6,6% горючего (дизельное топливо) и 1,2% эмульгатора, сенсублизированное добавлением 3% по массе микросфер марки С15 фирмы 3М и диаметром ~80 мкм. Плотность такого ЭВВ составляла $\rho=1,07$ г/см³. Использовались заряды в полиэтиленовых оболочках с диаметром 15 мм (критический диаметр для данного ЭВВ). Требовалось прямым измерением распределения плотности в детонирующем заряде подтвердить предположение о правильности теоретического выбора критического радиуса заряда. На рисунке 8 показаны двумерные протонно-радиографические изображения трех взрывных процессов (а)-в)) в зарядах ЭВВ диаметром 15 мм.

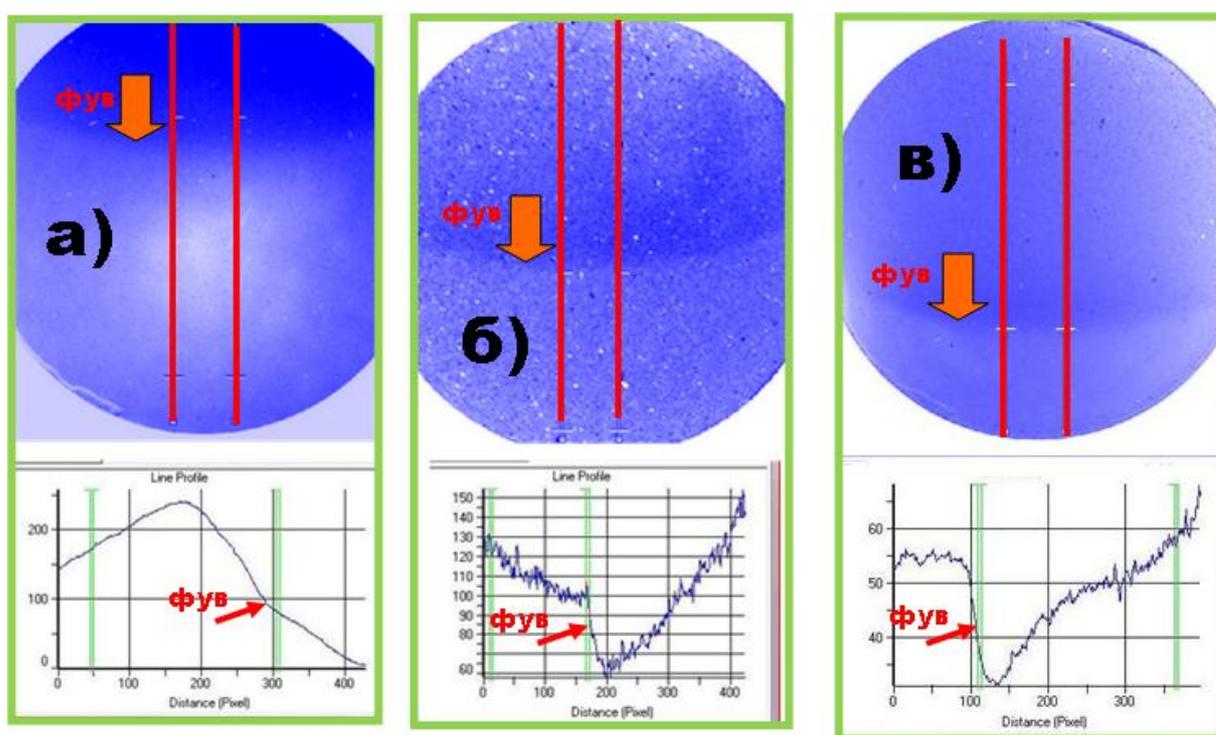


Рисунок 8 - Протонно-радиографические изображения взрывных процессов, полученные для одинаковых зарядов ЭВВ плотностью 1,07 г/см³ диаметром 15 мм. Вверху – протонно-радиографические изображения. Внизу – вертикальные профили, построенные между красными линиями по изображениям; а) затухающая ударная волна; б) неустойчивый детонационно-подобный режим; в) стационарная детонационная волна (направление распространения волн сверху-вниз).

Из полученных результатов следует что, 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 за фронтом детонационной волны: классического детонационного режима; режима затухающей ударной волны; «переходного» нестационарного детонационно-подобного режима с негладким фронтом. 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.

На установке ПУМА проведены эксперименты по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических пластин. 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 в 2.5 мм от центра пластины. Пластина расположена на торце таблетки ВВ (ТГ 50/50) массой 4.5 г. Ударная волна в пластине создавалась при детонации ВВ от электродетонатора. На рисунке 9а,б представлены протонно-радиографические изображения объекта в статическом и динамическом состояниях соответственно. На изображении 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 9в представлен результат обработки экспериментальных данных, полученных с 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.

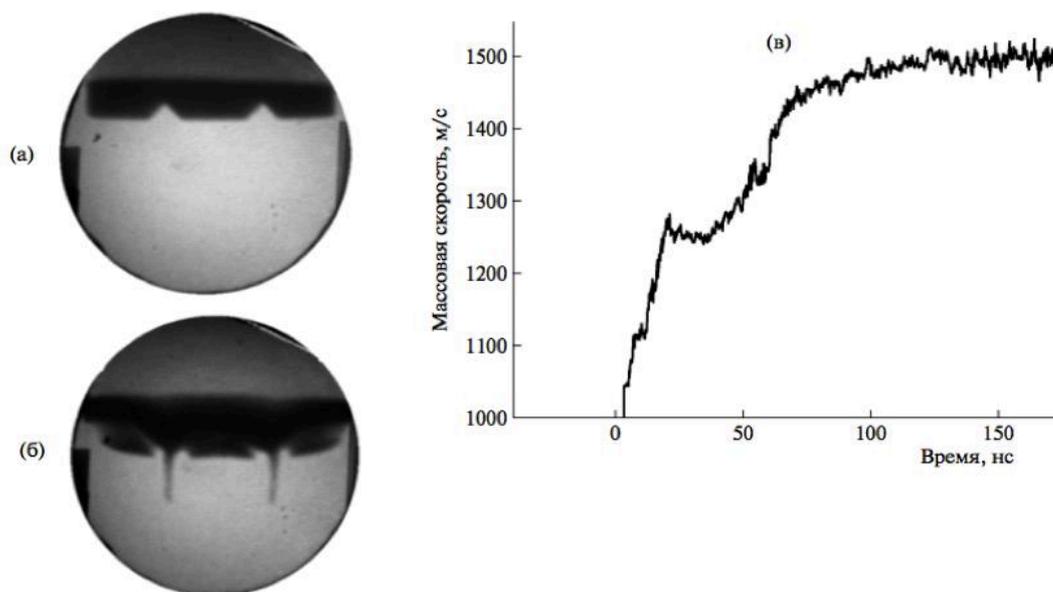


Рисунок 9 - Результаты эксперимента по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении медной пластины:

- а – изображения объекта в статическом состоянии; б – динамический кадр;
- в – зависимость массовой скорости от времени свободной поверхности пластины, измеренной с помощью интерферометра VISAR.

Впервые на протонном микроскопе ПУМА были исследованы биологические объекты. Интерес эксперимента заключался в оценке потенциальной возможности различения близких по плотности частей биологического объекта с помощью высокоэнергетической протонной микроскопии. В качестве биологического объекта были использованы аквариумные рыбки Данио-рерио (Zebrafish), залитые в плитки из парафина толщиной 8 мм. Исследуемый объект помещался в вакуумную камеру установки ПУМА. Параметры радиобиологического объекта: плотность парафина $0,9$ г/см³, плотность рыбки (за исключением материала костей) $\sim 1,00$ г/см³. На рисунке 10 показано протонно-радиографическое

изображение биологического объекта. На основе данных полученных на установке ПУМА предлагается развить методику стереотаксической радиотерапии злокачественных образований с одновременным контролем дозы методом протонной микроскопии. В дальнейшем методика будет развиваться на строящейся в Германии установке протонный микроскоп PRIOR[8] в рамках мегапроекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия).

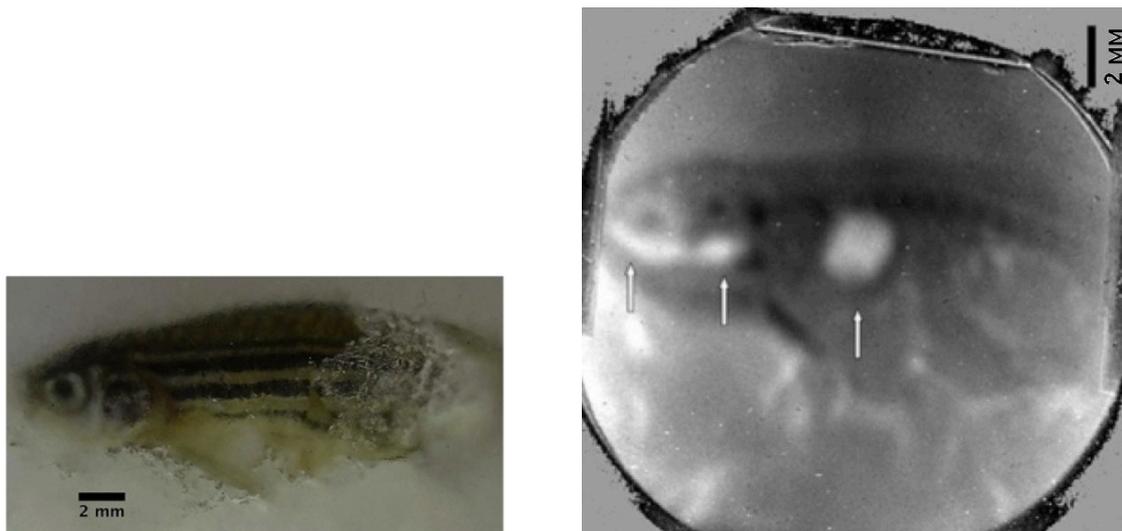


Рисунок 10 - Биологический объект - рыбка Данио-рерио залитая парафином. Слева-фотография объекта. Справа – протонно-радиографическое изображение. Отчетливо видны светлые регионы (отмечены белыми стрелками) на радиографическом изображении, которые соответствуют плавательному пузырю, жаберным камерам и полости рта под глазом. Кости и плавники отображаются темным цветом.

Основные результаты диссертации

- 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 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 микроскопии, получены изображения биологических объектов, позволившие сделать вывод о возможности одновременного использования стереотаксической терапии и протонной радиографии для повышения точности облучения опухолей.

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 и др., Комплексная система автоматизации экспериментов на быстром выводе ускорительно-накопительного комплекса ТВН-ИТЭФ, Приборы и Техника Эксперимента, 2010, № 5, с. 47–59;
3. A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, V.I Turtikov et al., ITER proton microscopy facility, Proceedings of PPPS2013, p.1-5, San-Francisco, USA;
4. 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;
5. S. A. Kolesnikov, .., A. V. Kantsyrev et al., Shockwave and detonation studies at ITER-TWAC proton radiography facility, AIP Conf. Proc. 1426, 2012, p.390-393;
6. А.А. Голубев, В.С. Демидов, Е.В. Демидова, С.В. Дудин, А.В. Канцырев, и др., Диагностика быстропротекающих процессов пучком заряженных частиц от ускорителя ТВН-ИТЭФ, Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 4;

7. 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;
8. 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), p. 83-87.

Литература

- [1] В.Е. Фортов, Д. Хоффманн, Б.Ю. Шарков, Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества, Успехи Физических Наук, том 178 (2), с. 113-138;
- [2] 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;
- [3] Голубев А.А., Демидов В.С., Демидова Е.В. и др., Применение пучков ускорительно-накопительного комплекса ТВН для диагностики быстропротекающих процессов, Атомная энергия, 2008 .Т. 104, вып.2, с. 99;
- [4] K. Makino, M. Berz, COSY INFINITY Version 9, Nuclear Instruments and Methods A558, 2005, p. 346-350;
- [5] Г.И. Канель, С.В. Разоренков, С.В. Уткин, В.Е. Фортов, Ударно-волновые явления в конденсированных средах, М. Янус-К, 1996;
- [6] V.E.Fortov, B.Goel, C-D Munz, A. Ni, A. Shutov, O.Yu.Vorobiev, Numerical simulation of nonstationary fronts and interfaces by the Godunov method in moving grids, Nuclear Science and Engineering. 123, 1996, p.169-189;
- [7] 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, V. 1426, 2012, p. 390-393;
- [8] Merrill F.E. et al., Proton microscopy at FAIR, AIP Conf. Proc. 1195, 2009, p. 667;
- [9] 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;
- [10] А.В. Канцырев, А.А. Голубев и др., Протонный микроскоп на ускорительном комплексе ТВН-ИТЭФ, Приборы и Техника Эксперимента, 2014, № 1, с. 5–14.