

**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«МОСКОВСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ОАО «МРТИ РАН»)**

117519, Москва, Варшавское шоссе, д.132
ИНН 7726700037

тел.(495)315-31-11, факс (495)314-10-53
E – mail: mrti@mrtiran.ru



«Утверждаю»
Генеральный директор
ОАО «МРТИ РАН»

М.В. Хохлов

«30» мая 2014г.

Отзыв

ведущей организации ОАО "МРТИ РАН"
на диссертационную работу Канцырева Алексея Викторовича
“**Экспериментальные исследования статических и динамических объектов
на протонном микроскопе в ИТЭФ**”,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Канцырева А.В. посвящена разработке первой в России протонно-радиографической установки - протонного микроскопа ПУМА с увеличением изображения исследуемого объекта и проведению методом высокоэнергетической протонной микроскопии экспериментальных исследований статических объектов и ударно-волновых процессов в динамических объектах.

Актуальность темы. Измерение распределения плотности в веществе находящемся в экстремальном состоянии является крайне актуальной задачей в области физики высокой плотности энергии в веществе. Данные таких измерений важны для развития перспективных энергетических проектов – управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы, ядерно-энергетических установок, магнито-гидродинамических и магнито-кумулятивных генераторов и т.п. Экстремальное состояние вещества достигается в экспериментальных исследованиях с использованием ударно-волновых взрывных и электровзрывных генераторов либо ускорителей пучков тяжелых ионов. Экспериментальные работы в России и США показали, что метод протонной радиографии с использованием высоко энергетичных протонов и системы магнитной оптики превосходит

по пространственному разрешению и проникающей способности рентгенографические методы, особенно при исследовании внутренней структуры плотных статических и динамических объектов. На протонно-радиографических установках, создаваемых по схеме протонного микроскопа с увеличением изображения исследуемого объекта, достигается наилучшее пространственное разрешение. Метод протонной микроскопии, также, предоставляет уникальные средства для дефектоскопических исследований в области ядерного материаловедения, протонной радиотерапии и радиобиологии. В России ранее не существовало установок разработанных по схеме протонного микроскопа. Все вышесказанное свидетельствует об актуальности диссертационной работы А.В. Канцырева.

Структура и содержание работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Во введении приводятся общие характеристики работы, дана краткая история развития радиографии, определены актуальность темы, цели и задачи диссертации, практическая значимость, личный вклад автора, и сформулированы результаты работы.

В первой главе изложена методика протонной радиографии с использованием магнитной оптики. Приведено описание и аналитические выражения для физических процессов взаимодействия протонов с исследуемым веществом, ведущих к изменению трансмиссии протонного пучка в протонно-радиографической установке. Показаны основные принципы расчета и оптимизации магнитооптической системы протонно-радиографических установок создаваемых по схеме протонного микроскопа. Приведено описание процедуры обработки протонно-радиографических изображений.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, включающей ускоритель протонов ТВН-ИТЭФ, линию транспортировки пучка и первый в России протонный микроскоп ПУМА. Представлена схема магнитной оптики протонного микроскопа ПУМА, состоящая из четырех высокоградиентных квадрупольных линз на постоянных магнитах. Описываются основные элементы установки и результаты их тестирования: многокадровая система регистрации изображений, вакуумная взрывозащитная камера для мишеней, лазерный интерферометр для измерения массовой скорости поверхности динамических объектов. Приводятся основные параметры протонного микроскопа ПУМА. Предельное пространственное разрешение составляет 60 мкм для объектов массовой толщиной 0.46 г/см² и 115 мкм для объектов массовой толщиной 17 г/см² при энергии протонного пучка 800 МэВ.

Третья глава посвящена разработке автором оригинальной комплексной системы автоматизации (КСА) экспериментов и установки ПУМА. Данная система позволяет, как управлять всеми элементами линии транспортировки пучка, так и проводить сбор и

обработку экспериментальных данных в режиме реального времени. Система КСА построена на основе отдельных аппаратно-программных модулей (АПМ) с унифицированным сетевым протоколом передачи данных в рамках локальной вычислительной сети. На основе АПМ автором разработаны конфигурации для проведения различных экспериментов, как на установке ПУМА, так и на экспериментальных установках в международном центре GSI (Дармштадт, Германия). Автором разработана уникальная методика автоматической фокусировки протонно-радиографических изображений, с использованием КСА.

В четвертой и пятой главе приведено описание экспериментов и обсуждение результатов исследований, проведенных на протонном микроскопе ПУМА. Автором были проведены экспериментальные исследования распределения плотности за фронтом детонационных волн в цилиндрическом заряде эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) плотностью $\rho=1,07 \text{ г/см}^2$. Получены экспериментальные результаты по измерению параметров детонационных волн в заряде прессованного тринитротолуола, имеющего диаметр 10мм. Получены экспериментальные результаты по исследованию процессов разрушения за счет образования осколков и струй при ударно-волновых перегрузках металлических объектов. Проведено исследование процесса распространения ударной волны в газе Хе. Выполнены работы по томографической реконструкции и обнаружению дефектов во внутренней структуре объекта, представляющего собой макет тепловыделяющего элемента ядерного реактора. Впервые получены экспериментальные результаты по исследованию структуры биологического объекта.

Научная новизна работы заключается;

в разработке и создании первой в России протонно-радиографической установки - протонного микроскопа ПУМА с увеличением изображения ($k=4$);

в полученных результатах исследования динамических и статических объектов - с пространственным разрешением до 60 мкм при массовой толщине объектов до 20 г/см² и временным разрешением 50 нс;

в полученных результатах исследования статических объектов (включая первые результаты для биологического объекта) и ударно-волновых процессов в динамических объектах; в разработке и создании оригинальной комплексной системы автоматизации КСА экспериментов и установки ПУМА и в создании на базе КСА методики автофокусировки радиографических изображений, которая может быть применена на любой протонно-радиографической установке.

Основные результаты исследований. 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, 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. На протонном микроскопе ПУМА показана возможность проведения исследования процессов разрушения металлов путем откалывания частей образцов и образование струй при ударно-волновой нагрузке на металл. Впервые методом протонной микроскопии получены экспериментальные результаты по исследованию структуры биологических объектов.

Научно-практическая значимость и ценность результатов. Работа вносит существенный вклад в развитие новых методов диагностики плотности и давления вещества в области физики высокой плотности энергии в веществе и неразрушающих дефектоскопических методов. Материалы диссертации могут быть рекомендованы к применению при разработке методов диагностики вещества в экстремальном состоянии, разработке методов неразрушающего контроля и разработке комплексных систем автоматизации установок с применением ускоренных пучков ионов и протонов. Известно, что полученные в диссертации результаты планируется применить для международного проекта FAIR в Германии при создании протонного микроскопа PRIOR, который должен обеспечить проведение исследований динамических и статических объектов с рекордным пространственным ($< 10 \text{ мкм}$) и плотностным ($< 1\%$) разрешением.

Замечания по работе.

- При исследовании ударно-волновых процессов в газе Хе сделана ссылка на калибровочную зависимость для расчета массовой толщины из трансмиссии пучка, но график зависимости не приводится;
- Не в полной мере приводится обзор работ по протонной радиографии проведенных в России;
- Следовало бы привести обзор методики ART, используемой для томографической реконструкции структуры статических объектов;
- Работа содержит некоторое количество орфографических и стилистических ошибок.
- Автор иногда допускает жаргонные определения, например, «угловой» аксептанс, хотя фазовое пространство, частью которого является аксептанс,

не может быть только угловым (стр. 8), или выражение «...на базе быстрого вывода пучков» позволяет предположить наличие у автора диссертации некоей базы, из которой быстро выводятся пучки. (стр. 11).

Общая оценка работы. Диссертация Канцырева А.В. является законченной научной работой посвященной разработке первого в России протонного микроскопа, с высоким пространственным разрешением 60 мкм и проведению с его помощью экспериментальных исследований статических объектов и ударно-волновых процессов в динамических объектах.

Основные результаты диссертационной работы представлены на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в их трудах, а также в шести статьях в рецензируемых научных журналах, пять из которых входят в перечень ВАК. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Сделанные выше замечания не изменяют высокую в целом оценку диссертационной работы. Диссертация Канцырева А.В. соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, автореферат полно отражает результаты выполненной работы, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – " Приборы и методы экспериментальной физики".

Отзыв составил: директор научно-технического центра
ОАО «Московский радиотехнический институт РАН», д.т.н.

Г.И. Кленов

Отзыв заслушан и одобрен на заседании
секции НТС №5 ОАО «МРТИ РАН» протокол №2 от 26 мая 2014г.

Председатель секции НТС №5 ОАО «МРТИ РАН»

Г.И. Кленов

Секретарь секции НТС №5 ОАО «МРТИ РАН»

В.П. Ларионов

Подпись Г.И. Кленова заверяю,

Заместитель директора
ОАО «Московский радиотехнический
Институт РАН»



И.И. Есаков