

ОТЗЫВ официального оппонента

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

В современной физике высоких энергий и физике частиц ускорители играют необычайно важную роль, поскольку они являются универсальным инструментом для создания пучков любых сортов частиц относительно высокой интенсивности, а также для создания уникальных прикладных экспериментов в любой постановке. Требования к ускорителям и специализированным каналам и экспериментальным установкам для прикладных работ с точки зрения эксплуатации очень серьезные. Такое оборудование должно быть максимально автоматизировано, иметь возможность в широком спектре изменять режимы использования пучков, работать надежно и бесперебойно, отвечать всем требованиям радиационной безопасности и пр. Крайне необходимо развивать методики и инструменты для расчета и настройки таких экспериментальных ускорителей, каналов и установок для их оптимальной работы.

Диссертация Канцырева А.В. посвящена экспериментальным исследованиям ударно-волновых процессов и статических объектов с использованием разработанного впервые в России протонного микроскопа ПУМА, работающего на базе ускорительного комплекса ИТЭФ.

В экспериментальных исследованиях в области физики высокой плотности энергии в веществе важное место занимают исследования вещества в экстремальном состоянии с измерением пространственного распределения плотности и давления. В таких экспериментах сжатие и разогрев вещества достигается за счет ударно-волнового воздействия с использованием генераторов на основе взрывчатых веществ, электровзрывных генераторов либо за счет объемного энерговыделения тяжелоионного пучка от ускорителя. Созданные в России и США протонно-радиографические экспериментальные установки показали, что метод протонной микроскопии с использованием высокоэнергетичных протонов (≥ 0.8 ГэВ) превосходит по пространственному разрешению и проникающей способности рентгенографические методы при измерении распределения плотности в плотных (≥ 20 г/см²) динамических и статических объектах. В России ранее не существовало протонно-радиографических установок, с высоким пространственным разрешением разработанных по схеме протонного микроскопа.

Актуальность разработки такой установки и проведение с ее помощью исследований ударно-волновых процессов не вызывает сомнений. Такие задачи стоят в настоящее время перед многими организациями и предприятиями, работающими в области фундаментальной науки, медицины, радиобиологии, геологии, систем безопасности и обороны, а также многих других. Разработка эффективно работающей установки потребовала от автора как полной автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных, так и создания системы управления установкой.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Во введении сформулированы актуальность и цели работы, основные результаты и научная новизна, личный вклад диссертанта.

В первой главе упомянуты ранние экспериментальные работы по протонной радиографии, описываются основные физические процессы взаимодействия протонного пучка с веществом и аналитические выражения определяющие трансмиссию пучка в протонно-радиографической установке. Приводится методика расчета и оптимизации ионно-оптической схемы протонного микроскопа и методика обработки протонно-радиографических изображений.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки и основных ее элементов, разработанных диссертантом. В протонном микроскопе ПУМА используется протонный пучок с энергией 800 МэВ. Магнитооптическая секция установки ПУМА, служащая для увеличения и формирования изображения объекта, построена на основе квадрупольных линз на постоянных магнитах (ПМК). В приложении к диссертации указана схема протонного микроскопа ПУМА, включая размеры ионно-оптических элементов. В главе представлены результаты измерения предельных характеристик установки ПУМА. Например пространственное разрешение достигает 60 мкм для исследуемых объектов массовой толщиной 0.46 г/см^2 и 115 мкм для объектов массовой толщиной 17 г/см^2 .

В третьей главе детально описана разработанная автором оригинальная комплексная система автоматизации (КСА) экспериментов на установке ПУМА. Данная система построена на основе отдельных аппаратно-программных модулей, объединяемым в единую локальную вычислительную сеть. Конфигурации КСА служат для автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных, управления линией транспортировки пучка, диагностики пучка и управления протонным микроскопом ПУМА. Автор самостоятельно разработал блоки и программное обеспечение системы автоматизации. Преимуществом КСА является возможность использования стандартного лабораторного и научного оборудования (осциллографы, ПЗС камеры, и т.п.), что существенно снижает стоимость аппаратного обеспечения эксперимента. На основе КСА диссертантом разработана методика автоматической фокуси-

ровки протонно-радиографических изображений, постоянно используемая при проведении экспериментов на установке ПУМА.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям статических объектов и ударно-волновых процессов в динамических объектах на протонном микроскопе ПУМА. Проведены исследования распределения плотности за фронтом детонационных волн в цилиндрическом заряде эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) диаметром 15 мм. Выполнено измерение параметров детонационных волн в заряде прессованного тринитротолуола (ТНТ) диаметром 10 мм. Получены экспериментальные результаты по исследованию процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических объектов. Проведено исследование динамических процессов в ударно сжатом газе Хе. Впервые методом протонной микроскопии проведены исследования структуры биологического объекта. На протонном микроскопе ПУМА продемонстрирована возможность проведения дефектоскопии с томографической реконструкцией структуры объекта имитирующего тепловыделяющий элемент реактора.

В пятой главе проводится обсуждение экспериментальных результатов диссертационной работы. В диссертации разработана и создана 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 и временным разрешением 50 нс. С использованием протонного микроскопа ПУМА измерено распределение плотности за фронтом детонационных волн в заряде эмульсионного взрывчатого вещества, показано, что при плотности заряда $\rho \sim 1$ г/см³ и диаметре 15 мм равновероятна реализация различных режимов формирования детонационной волны: затухающая ударная волна, неустойчивый детонационно-подобный режим, стационарная детонационная волна. Это может свидетельствовать о том, что выбранный диаметр заряда ЭВВ является критическим. Определена скорость ($V=6.9 \pm 0.2$ км/с) в заряде прессованного ТНТ (без оболочки) с плотностью ~ 1.6 г/см³ и диаметром заряда 10 мм, показано, что распределение плотности соответствует модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга. Показана возможность проведения исследования процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлов. Проведенные исследования биологических объектов планируется использовать при разработке радиотерапевтических методик лечения злокачественных образований по схеме стереотоксической терапии.

В целом, автором проделана большая и полезная работа, потребовавшая разносторонней квалификации. Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в развитие новых методов диагностики плотности и давления вещества в экстремальном состоянии при динамических нагрузках и разработке комплексных систем автоматизации уста-

новок с применением ускоренных пучков ионов и протонов. Схема протонного микроскопа ПУМА, проведенные с его помощью эксперименты и система автоматизации КСА будут использованы при создании новейшего протонного микроскопа PRIOR для международного проекта FAIR/GSI в Германии, который должен обеспечить проведение исследований динамических и статических объектов с пространственным разрешением лучше 10 мкм. Автор показал себя высококвалифицированным ученым и инженером, многие проектные решения, методики, программные комплексы могут быть с успехом внедрены в промышленных установках, а полученные научные экспериментальные результаты применены при исследовании детонационных волн и других ударно-волновых процессов. Поэтому практическая и научная ценность данной работы несомненна. Очень интересным и перспективным видится направление протонной радиографии сложных сборок, используемых в атомной энергетике.

Диссертация написана очень грамотным квалифицированным языком, текст читается легко, выстроена логика в подаче материала, и анализе полученных экспериментальных результатов.

В качестве недостатков, на которые можно указать, выделил бы следующие:

1. В тексте диссертации встречаются немногочисленные досадные опечатки (стр. 8, 42, 103, 109 и др.);
2. В главе 2 автор описывает принципы работы согласующего и фокусирующего каналов (ПМК и триплета квадрупольных линз). На мой взгляд необходимо было в тексте диссертации привести детали расчета и оптимизации этих каналов: параметры Твисса и пр., а также фазовые параметры пучка;
3. В главе 3 описано большое количество аппаратно-программных модулей комплексная система автоматизации (КСА) экспериментов на установке ПУМА: ПРОТОМ, ПОРБ, ПУЭД и др. Однако нигде не указан вклад автора, поэтому трудно судить какие элементы системы КСА являются непосредственными разработками автора, а какие плодом коллективного труда.
4. Не совсем ясна ценность результата эксперимента по исследованию заряда ЭВВ с околоскритическим диаметром, а также приведенная интерпретация результатов (глава 5): на мой взгляд для полноты эксперимента необходимо было провести на установке ПУМА эксперименты с зарядами ЭВВ, имеющих диаметры ниже и выше критического размера. Либо, если такие эксперименты проводились ранее - привести системное сравнение результатов.

Указанные недостатки несколько не снижают общую ценность диссертационной работы. Производит очень приятное впечатление большой объем полученных экспериментальных данных, находящихся в хорошем соответствии с теоретическими моделями. Разработанная в работе установка ПУМА и проведенные с ее помощью исследования статических объектов и ударно-волновых процессов в динамических объектах обладают необходимой научной и технической новизной. Полученные на установке ПУМА результаты позволили улучшить пространственное разрешение метода протонной радиографии при реализации его на базе российских установок.

Результаты диссертационной работы своевременно опубликованы в статьях в рецензируемых научных журналах, пять из которых входят в перечень ВАК. Основные результаты работы представлены на российских, международных конференциях и опубликованы в их трудах. Автореферат в целом соответствует содержанию диссертации.

В целом, представленная работа безусловно соответствует требованиям перечня ВАК и Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Канцырев А.В. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – " Приборы и методы экспериментальной физики".

Вице-директор ОИЯИ,
чл.-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук



Трубников Г.В.

03.06.14

Подпись заверяю,
Ученый секретарь ЛФВЭ ОИЯИ
Канд. физ.-мат. наук



Пешехонов Д.В.