

## 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

Диссертация Канцырева А.В. посвящена решению актуальной задачи - разработке протонно-радиографической установки (протонный микроскоп ПУМА), обладающей высоким пространственным разрешением, а также экспериментальному исследованию статических объектов и ударно-волновых процессов в динамических объектах.

В области физики высокой плотности энергии в веществе, при генерации экстремального состояния вещества за счет ударно-волнового воздействия, важно с высоким пространственным и временным разрешением измерять распределение плотности и давления в исследуемом объекте. В случае когда массовая толщина исследуемого объекта  $\geq 20$  г/см<sup>2</sup> протонно-радиографическая методика с использованием магнитной оптики и высокоэнергетичных протонов превосходит по пространственному разрешению и проникающей способности рентгенографические методы. В России ранее было создано несколько протонно-радиографических установок, но пространственное разрешение на них не превышало 250 мкм. Актуальность разработки протонно-радиографической установки с лучшим пространственным разрешением не вызывает сомнений. В работе автора протонно-радиографическая установка создана по схеме протонного микроскопа с увеличением изображения исследуемого объекта и использует пучок протонов с энергией 800 МэВ. Создание протонного микроскопа также потребовало проведения полной автоматизации управления установкой и процесса сбора и обработки экспериментальных данных.

Автор достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Автором изучены и критически проанализированы известные достижения других авторов в области протонной радиографии. Список литературы содержит 63 наименования, в том числе 11 научных публикаций с участием автора. Результаты работы докладывались автором на российских и международных конференциях и семинарах. В целом сам метод протонной радиографии основан на широко известных, и не подлежащих сомнению научных явлениях и процессах. Автором проведено несколько тестовых экспериментов, подтверждающих правильность и обоснованность заявленных параметров и сделанных выводов. Также продемонстрировано совпадение экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Научная новизна работы заключается в том, что впервые в России разработана и создана протонно-

радиографическая установка с увеличением изображения объектов протонный микроскоп ПУМА с пространственным разрешением до 60 мкм и временным разрешением 50 нс. На созданной установке проведены экспериментальные исследования детонационных волн, экспериментально наблюдались процессы разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических объектов, впервые методом высокоэнергетической протонной радиографии получены изображения структуры биологических объектов.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Полный объем диссертационной работы 128 страницы. Во введении сформулированы цели работы, обоснована их актуальность и научная новизна, описана практическая значимость полученных результатов и личный вклад диссертанта, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор экспериментальных работ по протонной радиографии, приводится описание физических процессов, на основе которых разработана методика высокоэнергетической протонной микроскопии. Описываются аналитические выражения определяющие трансмиссию пучка в протонно-радиографической установке и принципы обработки протонно-радиографических изображений с восстановлением информации о пространственном распределении плотности в исследуемом объекте.

Во второй главе подробно описывается экспериментальная установка, включая систему магнитной оптики, созданную на основе квадрупольных линз на постоянных магнитах, многокадровую систему регистрации изображений, взрывозащитную вакуумную мишенную камеру с манипулятором мишеней и лазерный интерферометр для измерения скорости поверхности динамических мишеней. В приложении к диссертации приводится схема протонного микроскопа ПУМА с указанием основных размеров. Наилучшее пространственное разрешение изображений статических и динамических объектов достигнутое на установке ПУМА составило 60 мкм для исследуемых объектов массовой толщиной  $0.46 \text{ г/см}^2$  и 115 мкм для объектов массовой толщиной  $17 \text{ г/см}^2$ . Поле обзора протонного микроскопа ПУМА составляет 20 мм, временное разрешение 50 нс.

Третья глава посвящена созданию оригинальной комплексной системы автоматизации (КСА) экспериментов и установки ПУМА. В состав КСА входят несколько подсистем: сбора, обработки и хранения экспериментальных данных, управления магнитными элементами линии транспортировки пучка заряженных частиц, диагностики пучка, радиационной безопасности, а также отображения экспериментальных данных в режиме реального времени на интернет сайте. Подсистемы представляют собой наборы аппаратно-программных модулей, каждый из которых обслуживает измерительный или исполнительный прибор и соответствующую ему программу считывания, сохранения и обработки экспериментальных

данных. Модули соединяются посредством протокола TCP/IP socket в конфигурации, зависящей от требований эксперимента. Данные от модуля к модулю передаются в режиме реального времени в рамках замкнутой кольцевой сети, что позволяет последовательно обрабатывать поступающие экспериментальные данные. Диссертант приводит детальное описание аппаратных комплектующих и программного обеспечения КСА. Автором создана методика фокусировки протонно-радиографических изображений позволившая с использованием КСА осуществлять фокусировку в автоматическом режиме, что позволило существенно ускорить процесс настройки протонного микроскопа ПУМА.

В четвертой главе приведено описание экспериментальных результатов, полученных с помощью протонного микроскопа ПУМА. Проведены исследования ударно-волновых процессов: измерено распределение плотности за фронтом детонационных волн в цилиндрическом заряде прессованного тринитротолуола (ТНТ) диаметром 10 мм и измерена скорость волны; проведено измерение распределения плотности за фронтом детонационной волны для эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) диаметром 15 мм; измерена скорость процесса струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических объектов; исследованы динамические процессы в ударно сжатом газе Хе. Выполнена томографическая реконструкция структуры статического объекта имитирующего тепловыделяющий элемент ядерного реактора. Впервые методом протонной микроскопии показана возможность проводить исследования структуры биологического объекта.

Пятая глава посвящена обсуждению экспериментальных результатов диссертационной работы. В результате измерения распределения плотности за фронтом детонационных волн в заряде ЭВВ, показано, что при плотности заряда  $\rho \sim 1 \text{ г/см}^3$  и диаметре 15 мм равновероятно формирование затухающей ударной волны, неустойчивого детонационно-подобного режима либо стационарной детонационной волны, что может указывать на то, что выбранный диаметр заряда ЭВВ является критическим. Результаты измерений распределения плотности за фронтом детонационной волны в заряде ТНТ соответствует модели детонации Зельдовича-Неймана-Деринга, что подтверждает работоспособность методики измерения распределения плотности на протонном микроскопе ПУМА. На основе результатов исследования биологических объектов предполагается развить методику стереотаксической радиотерапии злокачественных образований с одновременным контролем дозы методом протонной микроскопии.

Сочетание актуальности задачи с достигнутыми результатами позволяет заключить, что автором проделана большая и полезная работа, потребовавшая разносторонней квалификации. Результаты диссертации имеют большое значение для совершенствования методики диагностики ударно-волновых процессов и дефектоскопических методов.

Созданная автором комплексная система автоматизации универсальна и может быть применена на многих экспериментальных установках использующих пучки от ускорителей. Результаты диссертации будут использованы при создании нового высокоточного (пространственное разрешение  $<10$  мкм) протонного микроскопа PRIOR для международного проекта FAIR в Германии.

Замечания к работе.

1. Название диссертации сформулировано как “Экспериментальные исследования статических и динамических объектов на протонном микроскопе в ИТЭФ”. В то же время более половины объема диссертации посвящено не собственно экспериментальным исследованиям и их результатам, а описанию созданной экспериментальной установки. Среди результатов работы также на первом месте указаны результаты, относящиеся к созданию установки. Добавление в название диссертации слов, касающихся создания экспериментальной установки, более полно отражало бы как содержание диссертации, так и в целом объем проделанной работы.

2. Фраза «Структура протонного пучка для линейных и кольцевых ускорителей протонов обычно состоит из многих последовательных импульсов (банчей) длительностью 10-100 нс...» на странице 9 не является абсолютной по отношению к линейным ускорителям протонов и требует дополнительных пояснений.

3. В разделе «Апробация полученных результатов» на страницах 14,15 написано «...международных семинарах “25, 30 и 32 International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter”...», хотя номер семинара входит в название каждого семинара. То же касается и конференций «“6-я и 7-я Молодежные школы Курчатовского института“». Также вместо рецензируемых журналов написано «реферируемых».

4. Было бы полезным указать характерные значения среднего угла кулоновского рассеяния и разброса по энергии на выходе из исследуемых статических объектов.

5. В процессе изложения материала выводы делаются автором по мере изложения. Однако было бы полезным формулировать выводы и в конце каждой отдельной главы.

6. Имеются опечатки и неточности. Так на странице 25 имеется явно ошибочная ссылка на рис. 1.4, на странице 27 – на рисунок 1.7. На рисунке 2.17 написано «положение пластины», хотя речь идет о крае пластины. На этом же рисунке допущена опечатка в цене большого деления по оси ординат: 5 мкм вместо 50 мкм. При этом в тексте значение пространственного разрешения указано правильно. На странице 84 при упоминании релейного мультиплексора, а также датчиков температуры и давления имеется ссылки на рис

3.21, хотя данные устройства на этом рисунке отсутствуют. В качестве десятичного символа используется иногда точка, иногда запятая.

7. Затруднено восприятие некоторых рисунков. Так на рис. 4.2 указан угол разлета продуктов детонации, а в тексте на странице 95 дано его значение  $25,0^{\circ} \pm 3,0^{\circ}$ . Распознать указанное удастся только после прочтения следующей главы, где на рисунке 5.1 приводятся результаты моделирования процесса.

8. Выглядит перегруженной деталями и подробностями глава 3, в которой описываются вопросы автоматизации управления установкой, сбора и обработки экспериментальных данных. В то же время было бы полезно упомянуть о существующих системах автоматизации подобных экспериментальных установок.

Тем не менее, отмеченные замечания отнюдь не умаляют значения диссертационной работы и не влияют на основные выводы.

Диссертационная работа представляет результаты разработки первого в России протонного микроскопа и проведенных с его помощью исследований статических объектов и ударно-волновых процессов в динамических объектах. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для развития метода протонной радиографии в России. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях и трудах научных конференций, из них 6 в рецензируемых журналах, 5 из которых входит в перечень ВАК. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Основные положения диссертации были доложены автором на научном семинаре Отдела ускорительного комплекса Института ядерных исследований РАН 13 мая 2014 г. Положения и выводы диссертации получили положительную оценку.

Таким образом, диссертационная работа отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Канцырев Алексей Викторович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – "Приборы и методы экспериментальной физики".

Официальный оппонент,

Подпись официального оппонента заверяю

Ученый секретарь ИЯИ



*[Handwritten signature]*  
04.06.14

Фещенко А.В.

А.Д.Селидовкин