

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
Зарубиной Елены Юрьевны
на тему: «Диагностика параметров криогенной мишени
для лазерного термоядерного синтеза»
по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация Зарубиной Е.Ю. посвящена диагностике в лабораторных условиях параметров криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза, который, в свою очередь, необходим для проведения исследований свойств вещества в экстремальных состояниях. Такие исследования активно проводятся в ряде стран, а количество сопутствующих исследований, проводимых зарубежными учёными, с целью определения параметров криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза в последние несколько лет значительно увеличилось, что подтверждает востребованность и актуальность исследований, проводимых в данном направлении. В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ г. Саров в рамках национального проекта Российской Федерации создается установка мегаджоульного уровня энергии, на которой планируется проведение исследований по управляемому инерциальному термоядерному синтезу и исследования свойств вещества в экстремальных состояниях. Таким образом, диссертационное исследование Зарубиной Е.Ю., выполненное на тему «Диагностика параметров криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза», несомненно является актуальным.

Соискатель провела теоретические и экспериментальные исследования, в результате чего разработала и реализовала комплекс неразрушающих методов диагностики параметров криогенной мишени на всех стадиях её изготовления: начиная от диагностики параметров корпуса капсул, заканчивая диагностикой твердого слоя топлива в мишени перед её доставкой в мишенную зону лазерной установки для проведения эксперимента.

Во **Введении** проведен обзор текущего состояния работ в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), обоснована актуальность работы, указана степень разработанности темы, сформулированы цель, частные задачи, научная новизна и выносимые на защиту положения, приведена информация об апробации работы и её практической значимости.

Глава 1 содержит подробный обзор методов, применяемых для диагностики криогенной мишени зарубежными учёными.

Глава 2 посвящена реализованным Зарубиной Е.Ю. методам диагностики параметров капсулы. Представлено описание стендов для измерений параметров капсулы двумя методами: конфокальной микроскопии и рентгеновским методом с фазовым контрастом. Стенд конфокальной микроскопии обеспечивает сканирование полной поверхности капсул, с возможностью измерения толщины стенки по всей оптически прозрачной капсуле и вычислением спектров пространственных мод возмущений поверхности капсулы, которые являются источниками развития неустойчивостей при сжатии криогенной мишени, что, в свою очередь, мешает зажиганию мишени при её облучении лазерным излучением.

Глава 3 посвящена описанию разработанных методов диагностики параметров слоя топлива в криогенной мишени. Важно отметить, что разработка методов проведена с учётом того, что рабочая температура для формирования твердого слоя топлива находится вблизи тройной точки используемых изотопов водорода и обеспечивается в криостатах, один из которых располагается к тому же в перчаточном боксе. При этом, применяемые методы диагностики не должны оказывать температурного влияния на топливо. Зарубиной Е.Ю. разработана и реализована экспериментальная база для оптической теневой и рентгеновской фазоконтрастной диагностики параметров топлива. Кроме того, рентгеновская система диагностики используется еще и для диагностики параметров полых оптически непрозрачных капсул. С помощью численного моделирования Зарубиной Е.Ю. выявлены принципы формирования

оптических теневых и рентгеновских фазоконтрастных изображений, а также получены взаимосвязи положения поверхностей капсулы и топлива с характеристическими кольцами на их изображениях.

Разработан метод учёта влияния возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива при диагностике оптическим теневым методом с применением прямого численного моделирования. Для получения твердого слоя топлива заданной толщины разработан метод дозирования жидкого топлива по характерным кольцам на изображениях. Разработаны программы автоматической обработки оптических теневых и рентгеновских фазоконтрастных изображений полых капсул и криогенных мишеней с вычислением параметров поверхностей, необходимых для оценки качества мишени и численного моделирования эксперимента по сжатию мишени с целью предсказания нейтронного выхода.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы.

Научная новизна исследования заключается в: использовании метода конфокальной микроскопии и рентгеновского фазоконтрастного метода с целью проведения неразрушающего контроля параметров капсул; выявлены взаимосвязи для определения параметров поверхностей криогенных мишеней и полых капсул по их оптическим теневым и рентгеновским фазоконтрастным изображениям; разработан метод дозирования жидкого топлива по изображениям мишени; обосновано использование результатов диагностики параметров неоднородного слоя топлива для выявления недостатков постановки эксперимента по получению твердого слоя топлива.

Положения, выносимые на защиту, четко сформулированы на основе полученных результатов, обоснованы численным моделированием и экспериментальными данными и отражают основные результаты исследования. **Достоверность** обеспечивается применением современных экспериментальных методов исследования и метрологически поверенного оборудования, удовлетворительной сходимостью полученных результатов

экспериментальных и теоретических исследований. Научные труды, содержащие описание методов численного моделирования и экспериментальные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также многократно обсуждались на конференциях.

Практическая ценность работы заключается в применении полученных в диссертации результатов для измерения параметров различных мишеней в экспериментах по лазерному нагружению материалов на действующих моделирующих лазерных установках.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, что подтверждает квалификацию Зарубиной Е.Ю. в данной области. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ГОСТов и написана научно-техническим языком. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Многочисленные рисунки исчерпывающим образом иллюстрируют основные положения и выводы. Полученные результаты являются принципиально новыми и оригинальными, а также обладают практической значимостью.

Тем не менее, в работе имеются следующие недостатки.

1. На стр. 50 в алгоритме сшивки кадров не приведено описание или математическая модель, используемая для получения итогового профиля поверхности при совмещении соседних кадров в области перекрытия.

2. На стр. 74 при описании метода сканирования бокса-конвертера приведена разрешающая способность используемого объектива, которая определяется оптимальным временем сканирования и оптимальным объёмом полученного облака точек, однако критерий оптимальности в работе не приведён.

3. В работе не представлено обоснование требуемого количества лучей в задаваемом массиве при двумерном и трёхмерном моделировании прохождения пучка зондирующего излучения через мишень для обеспечения заданной точности.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует пунктам 6, 8, 9, 10 паспорта специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Зарубина Елена Юрьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник научно-исследовательского центра Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого кандидат технических наук, доцент

ЗАПОНОВ Арсений Эдуардович

«04» сентября 2026 г.

Подпись сотрудника Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого Запонова А.Э. удостоверяю:

Начальник отдела кадров

«04» сентября 2026 г.

Контактные данные: тел.: 8-495-524-0739 доб. 2679; e-mail: -

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 20.02.21. Средства поражения и боеприпасы

Адрес места работы: 143900, Россия, Московская обл., г. Балашиха, ул. Карбышева, д.8

Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого