

**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 актуальной проблеме лазерного термоядерного синтеза – диагностике параметров криогенной мишени для проведения эксперимента по зажиганию термоядерного топлива на мегаджоульной лазерной установке, создающейся в г. Саров. Успех данного эксперимента, направленного на изучение поведения вещества в экстремальных условиях, во многом зависит от качества мишени: неоднородности ее поверхностей являются источниками гидродинамических неустойчивостей, развитие которых мешает достижению нужных плотностей и температур в центре мишени и инициации термоядерных реакций. **Актуальность** темы не вызывает сомнений: комплексная диагностика параметров криогенной мишени является обязательным условием подготовки экспериментов по зажиганию, а методическое и приборное обеспечение такой диагностики в РФЯЦ-ВНИИЭФ до начала данной работы отсутствовало.

Зарубина Е.Ю. провела масштабную расчетно-теоретическую и экспериментальную работу, в результате которой фактически с нуля создана экспериментальная база и реализован полный комплекс неразрушающих методов диагностики параметров криогенной мишени — от аттестации капсул и элементов мишенного узла до контроля твердого слоя топлива

непосредственно в процессе его формирования. По полноте охвата задачи и достигнутым характеристикам созданный комплекс соответствует уровню ведущих мировых лабораторий, работающих в области лазерного термоядерного синтеза.

**Глава 1** посвящена обзору методов диагностики параметров капсулы и твердого слоя топлива в ведущих научных организациях США, Китая и Франции. Проведен тщательный анализ преимуществ и недостатков методов, убедительно обоснован выбор применяемых в работе методов. Обзор отличается полнотой и глубиной анализа и сам по себе представляет самостоятельную ценность для специалистов в области мишенных технологий.

**Глава 2** содержит описание реализованной экспериментальной базы и методов диагностики параметров капсулы. Автоматизированный стенд измерений параметров капсулы с использованием метода конфокальной микроскопии обеспечивает сканирование полной поверхности капсулы с определением толщины ее стенки, а разработанная программа сшивки экваториальных поверхностей позволяет выполнять обработку экспериментальных данных с получением необходимых характеристик поверхности капсулы. Рентгеновский фазоконтрастный стенд измерений параметров капсул обеспечивает измерение толщины стенки оптически непрозрачных капсул. С помощью численного моделирования объяснен принцип формирования рентгеновского фазоконтрастного изображения капсулы, а также решена обратная задача для определения толщины стенки капсулы по характеристическому кольцу на изображении и автоматизирована обработка экспериментальных изображений. Показано согласие результатов определения толщины стенки капсулы, полученных разными методами. Особо следует отметить высокий уровень автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных (набор данных с одной капсулы включает 1296 топографий) и достигнутое вертикальное разрешение

до 3 нм при анализе спектров пространственных мод возмущений поверхности.

**Глава 3** посвящена методам диагностики параметров слоя топлива в криогенной мишени. Реализована экспериментальная база для оптической теневой и рентгеновской фазоконтрастной диагностики параметров топлива в капсуле криогенной мишени. С помощью численного моделирования объяснены принципы формирования изображений и получены взаимосвязи положения внутренней поверхности топлива с характерными кольцами на изображениях. Предложен метод учета влияния возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива при диагностике оптическим теньевым методом с применением прямого численного моделирования. Предложен метод дозирования жидкого топлива по характерным кольцам на изображениях. Разработаны программы обработки экспериментальных оптических теневых и рентгеновских фазоконтрастных изображений криогенной мишени с вычислением необходимых параметров топлива. Впечатляет объем выполненного численного моделирования: разработанные автором программы двумерной и трехмерной трассировки лучей позволили не только объяснить механизмы формирования изображений, но и предложить метод количественной диагностики сильно возмущенного слоя топлива — задача, которая, по данным литературы, зарубежными группами не решалась.

**Научная новизна** исследования не вызывает сомнений и подтверждается рядом существенных результатов: получены уравнения для определения параметров поверхностей криогенных мишеней и полых капсул по их оптическим теньевым и рентгеновским фазоконтрастным изображениям; продемонстрировано использование метода конфокальной микроскопии и рентгеновского фазоконтрастного метода для неразрушающего контроля параметров капсул; предложен метод дозирования жидкого топлива по изображениям мишени;

продемонстрировано использование результатов диагностики параметров неоднородного слоя топлива для выявления недостатков постановки эксперимента по формированию слоя; продемонстрирована точность вычисления спектров пространственных мод возмущенной внутренней поверхности твердого слоя топлива для используемой конструкции мишени.

Выносимые на защиту положения сформулированы четко и обоснованы численным моделированием, экспериментальными результатами и их согласованностью. **Достоверность** обеспечивается использованием современных экспериментальных методов исследования и экспериментального оборудования, согласованием полученных разными методами экспериментальных результатов, а также использованием современных программных пакетов для численного моделирования и обработки экспериментальных данных. Результаты диссертации прошли всестороннюю апробацию: опубликованы 6 статей в рецензируемых научных журналах, основные результаты докладывались на 17 международных и всероссийских конференциях; личный вклад автора в полученные результаты является определяющим.

**Практическая ценность** работы исключительно высока: созданная экспериментальная база и разработанные методы уже используются для аттестации широкой номенклатуры лазерных мишеней в экспериментах на моделирующих лазерных установках ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и будут непосредственно востребованы при подготовке экспериментов по зажиганию на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии.

Тем не менее, хотелось бы отметить следующие замечания:

1. В расчетах и при решении обратных задач рентгеновского фазоконтрастного (РФК) метода (формулы (2.23), (3.35)–(3.36)) излучение принято монохроматическим с эффективной энергией кванта  $\approx 8\text{--}10$  кэВ, тогда как в качестве источника используется рентгеновская трубка с

вольфрамовым анодом при напряжении 60 кВ. Обоснование выбора эффективной энергии (вклад L-линий вольфрама, тормозного континуума, спектральной чувствительности детектора) в работе не приведено. Поскольку декремент показателя преломления  $\delta$  пропорционален квадрату длины волны излучения, неопределенность эффективной энергии непосредственно переносится в вычисляемую по положению характеристического темного кольца толщину стенки; оценка соответствующей систематической погрешности отсутствует.

2. Обратные задачи РФК метода решены в приближении параллельного пучка, тогда как в эксперименте пучок является расходящимся (расстояние источник–объект 10–11 см, увеличение  $\approx 6$ –7 крат). Влияние расходимости пучка и конечного размера фокусного пятна трубки (геометрической нерезкости) на положение и ширину характеристического темного кольца и на итоговую погрешность определения толщин не проанализировано; размер фокусного пятна в описании стенда не указан, хотя именно он, наряду с размером пикселя, ограничивает достижимое пространственное разрешение при увеличении масштаба съемки.

3. Пренебрежение волновыми (дифракционными) эффектами при моделировании РФК изображений обосновано оценкой размера первой зоны Френеля по расстоянию источник–объект (с. 64), тогда как для схемы съемки с увеличением корректнее использовать эффективное расстояние дефокусировки  $R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ . Полученная оценка ( $\approx 3$  мкм) сопоставима с размером пикселя изображения (2,3–2,5 мкм), поэтому вывод о пренебрежимости дифракции желательно подтвердить волновым расчетом либо прямым количественным сравнением расчетного и экспериментального профилей интенсивности для собственного стенда (в работе такое сравнение выполнено только с литературными данными [74]).

4. Литературный обзор по рентгеновскому фазовому контрасту ограничен работами, выполненными в рамках программ инерциального термоядерного синтеза. Основополагающие работы по фазоконтрастной визуализации со свободным распространением пучка (А. Snigirev и др., 1995; S.W. Wilkins и др., 1996) и количественные методы восстановления фазы (например, метод D. Paganin) не рассмотрены; их сопоставление с используемым рефракционным подходом «по характеристическим кольцам» позволило бы строже обосновать выбор метода.

5. Имеется ряд редакционных недочетов: нумерация рисунков в главе 3 перескакивает с 3.40 на 3.42; в тексте дважды даны ссылки на несуществующий пункт 3.2.1.7 (с. 138, 141); номер формулы (3.30) использован дважды (с. 118 и 122); в п. 1.1.1.2 ссылка [40], по-видимому, должна быть [42]; в ссылке [44] год издания указан как 2026 вместо 2006.

Вместе с тем, указанные замечания носят преимущественно рекомендательный характер, не затрагивают основных результатов и выводов работы и не умаляют высокой значимости диссертационного исследования. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой высокого уровня и отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует 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, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник отделения «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»  
БУЗМАКОВ Алексей Владимирович

12 августа 2026г.

Контактные данные:

тел.: 1

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация: 1.3.7. Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

119333, г. Москва, Ленинский проспект, 59

Отделение «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» Курчатовского  
комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»

Тел.: +7 (499) 135-5100; e-mail: buzmakov@crys.ras.ru

Подпись сотрудника

«Института кристаллографии им. А.В. Шубникова»

Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники

НИЦ «Курчатовский институт»

Бузмакова А.В. удостоверяю:

Заместитель директора –  
главный ученый секретарь

О.А. Алексеева