

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Институт лазерно-физических исследований
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА, физический факультет

На правах рукописи

Зарубина Елена Юрьевна

**Диагностика параметров криогенной мишени
для лазерного термоядерного синтеза**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:
доктор физико-математических наук,
профессор
Савельев-Трофимов Андрей Борисович,
кандидат физико-математических наук
Чугров Иван Александрович

Саров, Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Методы диагностики параметров элементов криогенной мишени для ЛТС.	
Литературный обзор	18
1.1. Капсула	18
1.1.1 Методы контурных линий.....	18
1.1.1.1 Оптический теневой метод.....	18
1.1.1.2 Рентгеновский метод	19
1.1.1.3 Атомно-силовая микроскопия.....	20
1.1.1.4 Лазерное конфокальное сканирование	21
1.1.2 Широкопольные методы	22
1.1.2.1 Микроскопия.....	22
1.1.2.2 Интерферометрия	25
1.2 Элементы криогенной мишени NIF.....	26
1.3 Твердый слой топлива в капсуле.....	30
1.3.1 Оптический теневой метод.....	31
1.3.2 Рентгеновский фазоконтрастный метод	34
1.3.3 Оптический интерферометрический метод	38
1.3.4 Сравнение методов	39
1.3.5 Показатели преломления материалов криогенной мишени в видимом диапазоне....	42
1.4 Заключение по главе	43
Глава 2. Измерение параметров мишенного узла криогенной мишени	46
2.1 Капсула	46
2.1.1 Широкопольный метод конфокальной микроскопии	46
2.1.2 Рентгеновский фазоконтрастный метод	59
2.1.2.1 Двумерное численное моделирование распространения рентгеновского излучения через полую капсулу.....	61
2.1.2.2 Решение обратной задачи.....	65
2.1.2.3 Обработка экспериментальных рентгеновских фазоконтрастных изображений	67
2.1.2.4 Видимость дефектов на рентгеновских фазоконтрастных изображениях	69
2.2 Элементы мишенного узла	72
2.2.1 Капилляр для наполнения капсулы топливом.....	72
2.2.2 Бокс-конвертер.....	73
2.3 Мишенный узел в сборе.....	79
2.4 Заключение по главе	87

Глава 3. Диагностика параметров топлива в капсуле	89
3.1 Экспериментальные стенды.....	89
3.2 Численное моделирование	92
3.2.1 Оптический теневой метод.....	92
3.2.1.1 Двумерное численное моделирование распространения пучка видимого излучения через криогенную мишень.....	92
3.2.1.2 Решение обратных задач	97
3.2.1.3 Оценка возникающих ошибок при диагностике параметров твердого слоя топлива оптическим теневым методом с помощью двумерного численного моделирования	99
3.2.1.4 Трехмерное численное моделирование распространения пучка видимого излучения через криогенную мишень с возмущениями поверхностей	109
3.2.1.5 Метод учета возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива при диагностике параметров топлива	114
3.2.1.6 Влияние положения свободной поверхности жидкого топлива на положение характеристических колец.....	122
3.2.2 Рентгеновский фазоконтрастный метод	125
3.2.2.1 Двумерное численное моделирование распространения пучка рентгеновского излучения через криогенную мишень.....	125
3.2.2.2 Решение обратной задачи.....	128
3.2.2.3 Трехмерное численное моделирование распространения пучка рентгеновского излучения через криогенную мишень с возмущениями поверхностей	130
3.2.2.4 Точность восстановления двумерного спектра пространственных мод возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива по двум анализируемым экваторам.....	132
3.3 Обработка результатов эксперимента по формированию твердого слоя топлива в капсуле	136
3.3.1 Видимость дефектов на оптических теневых изображениях.....	136
3.3.2 Диагностика параметров жидкого и твердого топлива в капсуле с использованием оптического теневого метода.....	138
3.3.3 Сравнение рентгеновского фазоконтрастного метода и оптического теневого метода	145
3.4 Заключение по главе	148
Заключение	150
Благодарности	152

Список сокращений и терминов	153
Список публикаций автора по материалам диссертации.....	155
Список литературы.....	157

Введение

Актуальность темы исследования.

Одним из направлений исследований, предусмотренных в рамках федерального проекта ФП-3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (продлена до 2030 года Указом Президента Российской Федерации от 14.04.2022 г. № 202), является направление «Лазерный термоядерный синтез и технологии» [1, 2]. Глобальной целью данных работ является обеспечение экономической и энергетической безопасности страны. Цель работ в области инерционного, а именно, лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), являющегося альтернативой магнитному управляемому термоядерному синтезу (УТС), — это фундаментальные исследования физики высоких плотностей энергии и экстремального состояния вещества.

Термоядерный синтез потенциально является экологически чистым, безопасным и неограниченным в ресурсах источником энергии. В качестве такого источника может выступать реакция синтеза двух изотопов водорода (дейтерия и трития) с образованием гелия и нейтрона с общей энергией 17,6 МэВ. Для зажигания термоядерного дейтерий-тритиевого (DT) топлива может быть использована криогенная мишень, представляющая собой полую сферическую капсулу (оболочка-аблятор) диаметром около 2 мм, на внутренней поверхности которой равномерно распределен слой DT льда. При воздействии на такую мишень мощного импульса лазерного или рентгеновского излучения нагретая капсула начинает «испаряться», и под действием импульса отдачи неиспаренная часть мишени сжимается с образованием в центре термоядерной плазмы при сверхвысоких температурах (100 млн градусов, или 10 кэВ), что обеспечивает условия для преодоления ядрами дейтерия и трития кулоновского потенциального барьера и инициации термоядерных реакций синтеза [3, 4]. Если энергия реакций синтеза как минимум равна энергии лазерного импульса, затраченной на создание и удержание плазмы, зажигание термоядерной криогенной мишени считается достигнутым.

В 1997 г. в США началось строительство лазерной установки NIF, а 2009 г. выполнен запуск установки со 192 каналами с общей энергией лазерного излучения (ЛИ) на мишени 1,8 МДж (в настоящее время после модернизации достигнуто 2,2 МДж) при длине волны ЛИ $\lambda_{3\omega}=0,351$ мкм (третья гармоника Nd-лазера) [5]. К 2023 г. проект объединил усилия 38 научных организаций («The Indirect Drive ICF Collaboration») [6]. В 2014 г. во Франции запущена установка LMJ (готова половина из 176 каналов, проектная энергетика 1,6 МДж, $\lambda_{3\omega}=0,351$ мкм) [7]. В 2022 г. в России завершён первый этап создания лазерной установки с

проектной энергетикой на мишени 2,8 МДж и длиной волны ЛИ $\lambda_{2\omega}=0,5265$ мкм (вторая гармоника Nd-лазера). Введены в эксплуатацию 32 канала. Пиковая мощность лазерного импульса – до 500 ТВт при длительности импульса 5-20 нс [8, 4].

Традиционным режимом зажигания криогенной мишени (сокращенно - КМ) является искровое зажигание, при котором сначала запускается «слабая» ударная волна, а затем осуществляется адиабатическое сжатие мишени таким образом, чтобы в момент максимальной плотности температура в газовой части мишени достигла температуры горения [4]. Такой режим может быть реализован при воздействии на аблятор мишени или профилированного импульса высокоинтенсивного ЛИ (КМ прямого сжатия), или квазиравновесного рентгеновского излучения (РИ), которое генерируется в результате конверсии ЛИ, облучающего внутреннюю поверхность бокса-конвертера из материала с высоким Z (КМ непрямого сжатия). Схемы прямого и непрямого сжатия КМ показаны на рисунке 1 [9]. При прямом сжатии обеспечивается высокая эффективность использования лазерной энергии (до $\approx 90\%$). Однородность воздействия определяется однородностью ЛИ и количеством лазерных пучков, но при таком сжатии мишень в большей степени подвержена развитию гидродинамических неустойчивостей, которые существенно снижают степень сжатия термоядерного топлива. Схема непрямого сжатия уменьшает требования к однородности ЛИ, обеспечивает более однородное воздействие РИ на аблятор по сравнению с ЛИ. Мелкомасштабные неоднородности поверхностей капсулы оказываются более стабильны к развитию гидродинамических неустойчивостей вследствие более высокого темпа абляции, поэтому, несмотря на то что эффективность конверсии ЛИ в РИ составляет всего порядка 50%, схема непрямого сжатия является основной схемой достижения зажигания термоядерной мишени в проводимых в настоящее время мировых исследованиях.

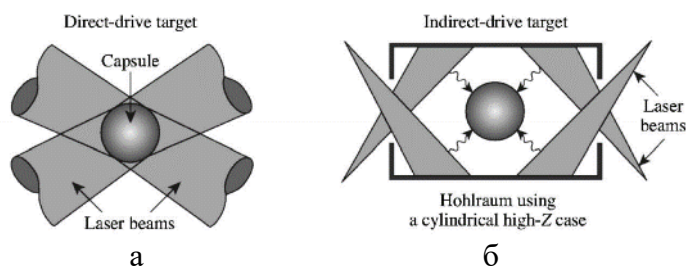


Рисунок 1 – Принципиальные схемы сжатия КМ:
а) прямое сжатие, б) не прямое сжатие [9]

В схеме непрямого сжатия криогенная мишень представляет собой расположенную в центре бокса-конвертера капсулу со сферически симметричным твердым слоем изотопов водорода на ее внутренней поверхности.

В процессе проведения исследований и экспериментов по сжатию КМ при непрямом сжатии материал капсулы менялся от полимера (СН), чистого бериллия (Ве), многослойной

конструкции с разными слоями и разными уровнями легирующих примесей (например, полимер, легированный германием $\text{CH}(\text{Ge}_n)$, бериллий, легированный медью $\text{Be}(\text{Cu}_n)$) [10, 11] до высокоплотного углерода (HDC) [12]. Последний вариант капсулы превосходит другие материалы в плане стабильности сжатия (имплозии) мишени.

Всего до настоящего времени на установке NIF было проведено 10 успешных экспериментов (в период с 2021 г. по 2025 г.) по зажиганию КМ непрямого сжатия, представленной на рисунке 2, с капсулой из HDC [13]. Рекордный энергетический выход составил 8,6 МДж при вложенной энергии ЛИ 2,2 МДж. В данных экспериментах дефекты капсулы имеют масштаб ≈ 100 нм, неоднородность РИ на поверхности капсулы $\approx 1\%$, а сжатие топлива по радиусу составляет ≈ 18 раз. При этом рост энергетического выхода до 60-80 МДж остается главной задачей для расширения области исследования различных вопросов физики высоких плотностей энергии и других практических применений. Для достижения таких параметров в части конструкции КМ непрямого сжатия предлагается увеличение размеров мишени, массы DT топлива, изменение геометрии бокса-конвертера с цилиндрической на «frustratum» (показана на рисунке 2, б) и возврат к применению капсул из бериллия.

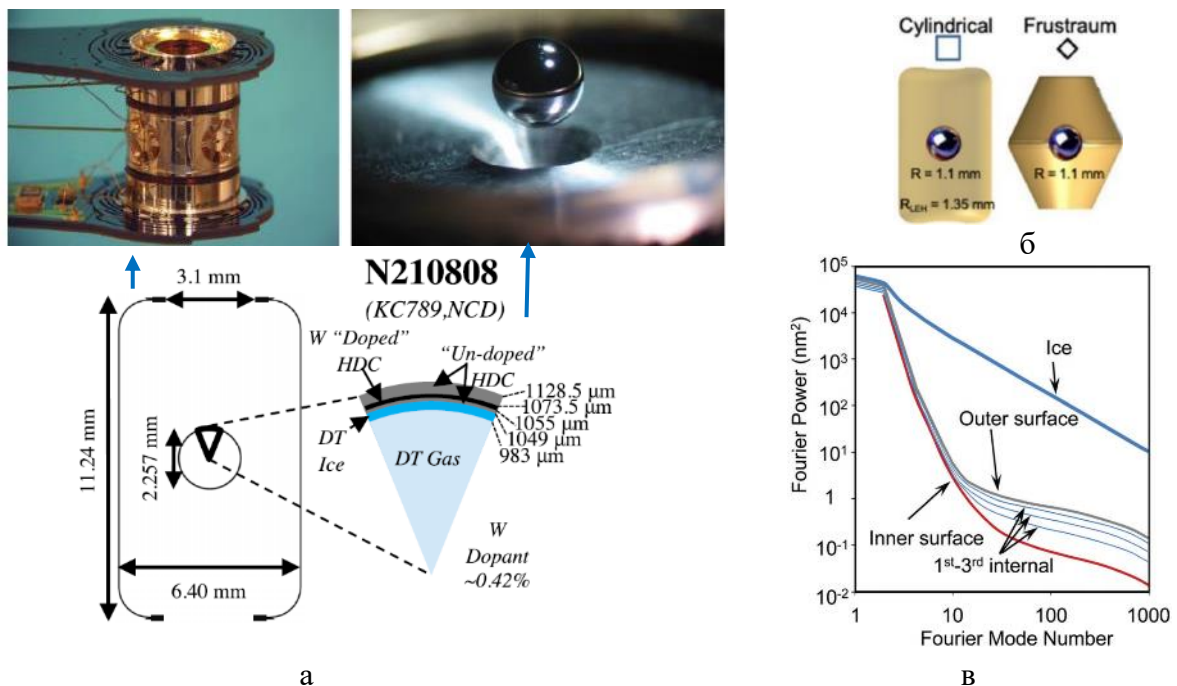


Рисунок 2 – КМ непрямого сжатия, применяемая на установке NIF:

- а) цилиндрический бокс-конвертер и HDC капсула с твердым слоем DT топлива и DT газом [13], б) сравнение разных геометрий бокса-конвертера: цилиндрическая и «frustratum» [13], в) требования к поверхностям КМ: максимально допустимый одномерный спектр амплитудно-частотных характеристик поверхностей капсулы и твердого слоя топлива для экваториальных профилей поверхностей [14]

Для достижения зажигания КМ ее поверхности должны удовлетворять высоким требованиям. Требования к поверхностям капсулы и твердого слоя топлива КМ в экспериментах на NIF сформулированы в виде одномерного спектра пространственных мод

(СПМ) возмущений поверхности [14], который представлен на рисунке 2, в. Горизонтальная ось спектра представляет собой номера мод (гармонических компонент) возмущений поверхности, вертикальная координата - квадрат амплитуды для каждой моды. Разные моды возмущений поверхности по-разному влияют на имплозию: низкие моды неоднородностей приводят к снижению степени сжатия, а высокие моды вызывают развитие турбулентного перемешивания на поверхностях раздела сред при сжатии. Характеристики поверхностей КМ (одномерные СПМ $P_{1D}(n)$, двумерные СПМ $P_{2D}(l)$ полных поверхностей, шероховатости и параметры локальных неоднородностей), положение первоначального зерна кристалла в жидком топливе при формировании монокристаллического слоя твердого топлива и др.) необходимы для моделирования процесса имплозии и предсказания нейтронного выхода [15].

Выравнивание твердого слоя топлива (сокращенно - ТСТ, криослоя, льда) DT в капсуле КМ происходит за счет бета-распада трития без каких-либо внешних воздействий, поэтому твердый слой DT топлива, соответствующий требованиям, можно получать как в оптически прозрачных капсулах (изготовленных, например, из полистирола (ПС), поли-альфа-метилстирола (ПАМС)), так и в оптически непрозрачных (например, из чистого бериллия Be, бериллия легированного медью Be(Cu_n), высокоплотного углерода HDC). С целью снижения рисков при работе с тритием в качестве топлива в капсуле может использоваться чистый дейтерий (D₂). Сечение DD-реакции и энерговыделение значительно ниже, чем в DT-реакции, поэтому в экспериментах по зажиганию КМ используется DT-топливо, но процесс отработки технологии получения твердого слоя топлива с требуемыми характеристиками и развития методов диагностики параметров топлива может выполняться на D₂-топливе [16]. Недостаток данного подхода связан с тем, что выравнивание твердого D₂-топлива возможно только при внешнем воздействии на слой с помощью инфракрасного (ИК) излучения с длиной волны, близкой к максимуму поглощения D₂ (3,16 мкм). Поэтому получение твердого слоя D₂-топлива возможно только в прозрачных для длины волны ИК-излучения капсулах [17].

Перед постановкой КМ непрямого сжатия в эксперимент по зажиганию на установке NIF выполняется диагностика параметров топлива только по трем взаимно ортогональным осям наблюдения рентгеновским методом с фазовым контрастом (сокращенно - методом РФК) [18]. При такой системе диагностики может быть пропущено много неоднородностей твердого слоя топлива. Но количество осей наблюдения не может быть увеличено ввиду того, что отношение площади окон для ввода ЛИ к площади внутренней поверхности бокса-конвертера не должно превышать определенного значения для эффективного преобразования ЛИ в РИ. Поэтому значительное количество исследований касательно формирования и диагностики параметров ТСТ проводится на множестве дополнительных исследовательских экспериментальных стендов установок NIF и OMEGA, такие как: эксперименты по

формированию ТСТ в боксах различных конструкций (цилиндрические боксы-конвертеры различных размеров с разными конструктивными элементами [18, 19, 20], массивные сферы выравнивания с диаметром от 15 до 25 мм [21-25]), эксперименты по формированию твердого DT-слоя с помощью бета-выравнивания [19] и по формированию твердого D₂-слоя с использованием ИК излучения [20], эксперименты на оптически прозрачных капсулах только с оптической теневой (сокращенно - ОТ) диагностикой параметров ТСТ [26, 27], только с оптической интерферометрической (сокращенно - ОИ) диагностикой [28], со взаимодополняющими ОТ и ОИ диагностиками [18], с ОТ и РФК диагностиками [29]; эксперименты на оптически непрозрачных капсулах только с РФК диагностикой [15]. В большинстве из упомянутых экспериментальных стендов капсула с топливом может вращаться относительно диагностических осей с целью изучения возможностей полного трехмерного восстановления внутренней поверхности ТСТ (при этом в экспериментах по зажиганию КМ не вращается), а также с целью валидации диагностических методик. Изготовление и измерение параметров остальных элементов КМ для установки NIF выполняется в ряде институтов США [30], а также с привлечением научных организаций других стран [12, 31].

Параллельно с экспериментами по зажиганию КМ непрямого сжатия на NIF проводится ряд исследований на других конструкциях КМ: эксперименты на КМ прямого сжатия [32, 21], на двухоболочечных КМ [33, 34], которые по расчетам могут зажечься при более низкой температуре (3 кэВ), и др.

Принципиальным отличием конструкции криогенной мишени для лазерной установки РФЯЦ-ВНИИЭФ (см. рисунок 3 [35]) от конструкции КМ для лазерной установки NIF является сферическая форма бокса-конвертера, позволяющая достичь более высокую симметрию облучения капсулы. В боксе-конвертере предусмотрено шесть окон для ввода ЛИ, располагающихся в центрах граней куба, четыре из которых (в горизонтальной экваториальной плоскости бокса-конвертера) могут использоваться в том числе и для диагностики качества внутренней поверхности твердого слоя топлива.

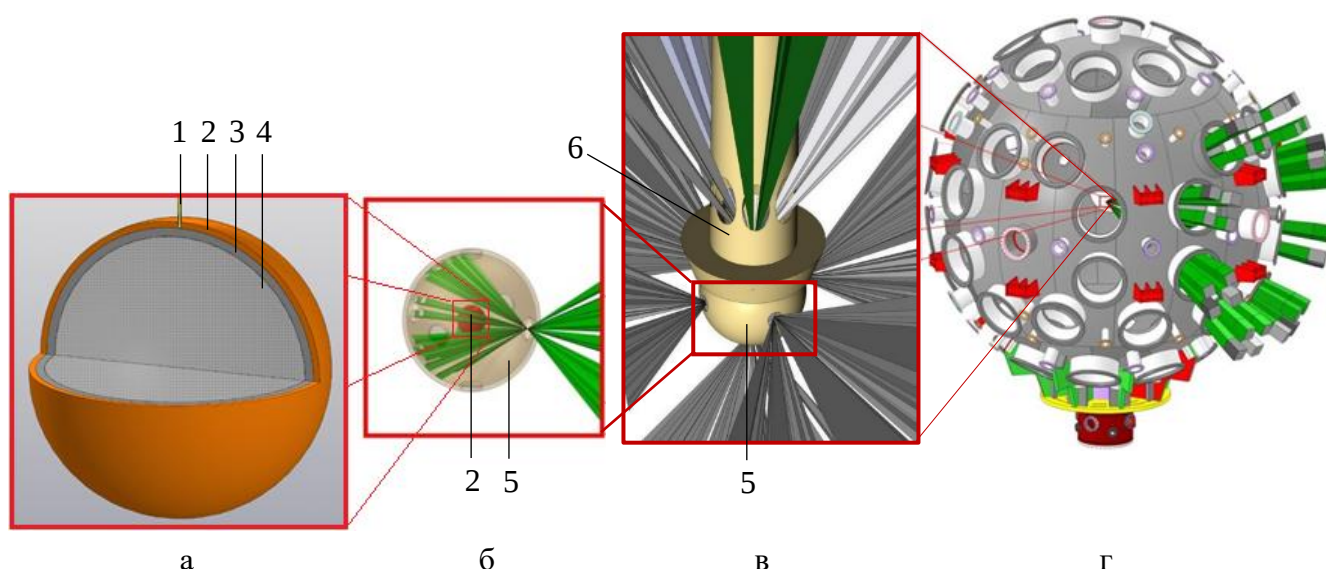


Рисунок 3 – КМ непрямого сжатия РФЯЦ-ВНИИЭФ:

а) 1 – капилляр, 2 - капсула диаметром ≈ 2 мм, 3 - твердый слой DT-топлива, 4 – насыщенный пар DT-топлива; б) бокс-конвертер 5 с внутренним диаметром 9 мм и установленной внутри капсулой 2 (показано заведение ЛИ в одно из шести окон бокса); в) мишенный узел (бокс-конвертер 5 с капсулой 2 внутри, установленный на держатель бокса-конвертера б), в) камера взаимодействия диаметром 10 м

Первоначально проведение экспериментов по сжатию планировалось на КМ с капсулой диаметром ≈ 2 мм из СН или Be(Cu), твердым слоем DT-топлива и внутренним диаметром сферического бокса-конвертера 9 мм. По результатам численного моделирования были выдвинуты требования к поверхностям капсулы и твердого слоя топлива, которые приведены в таблице 1 [36]. Требования к поверхностям при использовании Be-капсулы ниже, поскольку такая капсула имеет большую массу, меньшие рентгеновские альбедо и большие скорости абляции, чем СН, в результате чего при сжатии она более стабильна к развитию различных газодинамических неустойчивостей.

Таблица 1 – Требования к поверхностям капсулы и твердого слоя топлива КМ непрямого сжатия РФЯЦ-ВНИИЭФ

	СН-капсула	Be- капсула
Допустимая шероховатость внешней поверхности капсулы	10 нм	30 нм
Допустимая шероховатость внутренней поверхности твердого DT-слоя	< 1 мкм	2 мкм
Несферичность и неконцентричность поверхностей капсулы и твердого слоя топлива	<1%	

В связи с осуществлением зажигания на КМ с капсулой из HDC на NIF, в РФЯЦ-ВНИИЭФ проведено численное моделирование по зажиганию мишени с HDC-капсулой в условиях использования сферического бокса-конвертера [37]. По результатам расчетов выявлена проблема с доставкой ЛИ на поверхность капсулы из-за сферической геометрии бокса-конвертера и отличающейся длины волны ЛИ, в связи с чем рассматривается вариант

увеличения размеров бокса-конвертера до диаметра 14 мм с размерами окон для ввода ЛИ 2 мм, при этом диаметр и толщина стенки НДС-капсулы составят 3,35 мм и 75 мкм соответственно, толщина твердого слоя ДТ-топлива – 100 мкм (модель увеличенной КМ непрямого сжатия).

КМ прямого сжатия предполагает сферически-симметричное облучение лазерным излучением. На мегаджоульной лазерной установке РФЯЦ-ВНИИЭФ это обеспечивается благодаря геометрии ввода ЛИ в камеру взаимодействия, обладающей симметрией куба. Поэтому наряду с КМ непрямого сжатия предложена КМ прямого сжатия с искровым режимом зажигания, где применяется СН-капсула диаметром 3,194 мм, толщиной стенки 34 мкм и твердым слоем ДТ-топлива толщиной 149 мкм [38]. Для такой КМ по результатам численного моделирования получено, что для успешного зажигания амплитуда возмущений поверхности раздела капсулы и твердого ДТ-слоя не должна превышать несколько сотен нм [39]. Стоит отметить, что геометрия ввода ЛИ в камеру взаимодействия установки NIF, разработанная для цилиндрического бокса-конвертера, делает невозможным достижение однородного облучения капсулы в криогенной мишени прямого сжатия.

Для зажигания КМ прямого сжатия сходящейся сфокусированной ударной волной (режим УВ-зажигания, «shock ignition»), образующейся при воздействии лазерного импульса второй гармоники Nd-лазера, предложена КМ с СН-капсулой диаметром 3,724 мм, толщиной стенки 22 мкм и твердым слоем ДТ-топлива толщиной 215 мкм [40]. Центральная область зажигания при таком режиме образуется за счет двухступенчатого профилированного лазерного импульса, который обеспечивает более сильное разделение процессов нагрева и сжатия КМ, в отличие от традиционного искрового зажигания, а центральная область зажигания образуется в результате столкновения одной или нескольких расходящихся ударных волн со сходящейся зажигающей ударной волной.

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ проводится работа по получению КМ непрямого сжатия с требуемыми характеристиками. Отрабатываются технологии изготовления капсул из различных материалов (ПС, ПАМС, СН, Ве и др.) разных диаметров и толщиной стенки, капилляров, боксов-конвертеров и других составляющих мишенного узла элементов; отрабатываются технологии сборки элементов мишенного узла и технология получения твердого слоя топлива в КМ. Криогенная мишень (КМ) – это сама капсула с топливом, а под мишенным узлом (сокращенно – КМУ – криогенный мишенный узел) понимается вся конструкция, которая необходима для получения КМ, поэтому элементами КМУ, кроме капсулы и топлива, являются капилляр для наполнения капсулы топливом, поддерживающие капсулу тенты, бокс-конвертер, окна бокса-конвертера для ввода ЛИ, капилляр для

наполнения бокса-конвертера гелием, держатель бокса-конвертера с отверстиями для ввода ЛИ в верхнее окно бокса-конвертера, датчики температур и другие элементы [36].

Неотъемлемой частью процессов отработки технологий изготовления составляющих КМУ элементов является измерение параметров этих элементов и их сборок, самыми сложными из которых с точки зрения диагностики являются капсула и ТСТ, поскольку диагностические методы должны быть неразрушающими и обеспечивающими достаточный уровень точности.

Как показывает многолетняя практика, конструкция КМ для ЛТС может варьироваться в зависимости от исследовательской задачи, при этом постоянно совершенствуется, что влечет за собой непрерывное освоение новых технологий изготовления всех элементов КМУ. Соответственно, это влечет за собой непрерывное развитие и совершенствование диагностических методов для выявления соответствия криогенной мишени всем требованиям, предъявляемым для постановки мишени в эксперимент по зажиганию на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии.

Таким образом, *актуальность* темы исследования заключается в необходимости проведения комплексной диагностики параметров криогенной мишени и составных частей мишенного узла как в процессе отработки технологии получения мишени, так и перед постановкой мишени в эксперимент по зажиганию на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии.

Степень разработанности темы.

Существуют известные методы диагностики параметров капсулы и твердого слоя топлива, но информация, предоставляемая в публикациях, недостаточна для воспроизведения методов. В каждой научной организации, которая занимается данной проблемой, разрабатываются и постоянно совершенствуются свои программные пакеты для конкретного экспериментального оборудования и используемого метода. При этом программные пакеты обработки экспериментальных данных являются уникальными, не раскрываются и не распространяются. Это обуславливает необходимость создания собственной экспериментальной базы в РФЯЦ-ВНИИЭФ, разработки для конкретного оборудования диагностических методов и программ обработки экспериментальных данных, что до начала работы по теме диссертационного исследования в РФЯЦ-ВНИИЭФ не проводилось.

Цель диссертационного исследования. Целью исследования является создание экспериментальной базы и разработка методов диагностики параметров криогенной мишени и составляющих мишенного узла элементов.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка конструкции и создание стенда для измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии (одномерные и двумерный спектры пространственных мод (СПМ) возмущений внешней поверхности, а для оптически прозрачных капсул – также СПМ возмущений внутренней поверхности, толщина и разнотолщинность стенки). Разработка метода измерений параметров полной поверхности капсул. Разработка программы сшивки и анализа экваториальных поверхностей капсул. Получение трехмерной карты дефектов поверхностей.

2. Разработка методов измерений составных частей мишенного узла и узла в целом.

3. Создание систем оптической теневой диагностики параметров топлива в оптически прозрачной капсуле. Разработка и создание рентгеновской фазоконтрастной системы для диагностики параметров топлива (одномерные СПМ и двумерный СПМ внутренней поверхности, толщина и разнотолщинность слоя) в оптически прозрачной/непрозрачной капсуле, а также для измерений толщины и разнотолщинности стенки оптически непрозрачных полых капсул.

4. Двумерное численное моделирование прохождения видимого и рентгеновского излучения через криогенную мишень для нахождения взаимосвязей положений поверхностей с характерными особенностями на оптическом теневом и рентгеновском фазоконтрастном изображениях криомишени. Трехмерное численное моделирование для исследования влияния ряда факторов на формирование оптического теневого и рентгеновского фазоконтрастного изображений криомишени и, соответственно, на корректность вычисления параметров жидкого (форма поверхности, объем топлива) и твердого топлива. Оценка точности вычисления двумерного СПМ внутренней поверхности топлива с использованием трехмерной модели поверхности с гармоническими возмущениями поверхностей.

5. Разработка метода дозирования жидкого топлива по оптическому теневому и рентгеновскому фазоконтрастному изображению для получения твердого слоя топлива требуемой толщины. Разработка программ для автоматического анализа оптических теневых и рентгеновских фазоконтрастных изображений криогенной мишени с вычислением параметров твердого слоя топлива и трехмерным восстановлением внутренней поверхности твердого слоя топлива для анализа результатов эксперимента по формированию твердого слоя топлива.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования является криогенная мишень. Предметом исследования является реализация экспериментальных методов, обеспечивающих диагностику параметров капсулы и твердого слоя топлива криогенной мишени (одномерные и двумерные спектры

пространственных мод возмущений поверхности, дефекты поверхностей, толщины и разнотолщинности слоев).

Научная новизна работы.

1. Показано, что метод конфокальной микроскопии можно применять не только для анализа параметров внешней поверхности капсулы и получения трехмерной карты дефектов поверхности, но и для неразрушающего контроля оптически прозрачных капсул: определения толщины стенки и анализа внутренней поверхности капсул при отсутствии дефектов в объеме и на внешней поверхности.

2. Показано, что по характеристическим яркому и бледному кольцам на оптических теневых изображениях криогенной мишени можно определять параметры твердого слоя топлива в плоскости экватора капсулы.

3. Предложен метод дозирования жидкого топлива для получения твердого слоя топлива требуемой толщины по характеристическому бледному кольцу на оптическом теневом изображении капсулы.

4. Показано, что по характеристическим темным кольцам на рентгеновском фазоконтрастном изображении полый капсулы, а также криогенной мишени можно определять параметры внутренних поверхностей однородных и неоднородных по толщине слоев в плоскости экватора.

5. Показано, что точность вычисления спектров пространственных мод возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива зависит от числа плоскостей наблюдения и ориентации двумерных мод возмущений относительно плоскостей наблюдения.

6. Показано, что диагностика параметров неоднородного по толщине твердого слоя топлива по двум осям наблюдения с трехмерным восстановлением внутренней поверхности твердого слоя топлива относительно мишенного узла с применением температурных расчетов позволяет выявлять недостатки конструкции мишенного узла.

Практическая значимость работы.

Созданная в процессе работы по теме диссертационного исследования экспериментальная база и разработанный комплекс диагностических методов используются не только для измерения элементов криогенной мишени для ЛТС, но и для измерения параметров широкой номенклатуры лазерных мишеней: простых и сложносоставных, однослойных и многослойных, оптически прозрачных и непрозрачных мишеней сферической и цилиндрической формы в экспериментах по лазерному нагружению материалов и отработке диагностических методик на моделирующих лазерных установках ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Методология диссертационного исследования.

В рамках диссертационной работы были использованы следующие современные методы:

- экспериментальные методы: метод конфокальной микроскопии для сканирования поверхностей капсул, метод оптической профилометрии «focus variation» для сканирования полусфер бокса-конвертера и мишенного узла, оптический теневой (ОТ) и рентгеновский фазоконтрастный (РФК) методы для получения изображений капсул и капсул с топливом;
- методы численного моделирования: моделирование распространения видимого и рентгеновского излучения через полые капсулы и капсулы с топливом с формированием изображений для определения механизма формирования изображений и оценки корректности ОТ и РФК методов;
- методы анализа: обработка экспериментальных данных с помощью разработанных программ анализа ОТ и РФК изображений, разработанной программы автоматической сшивки и анализа экваториальных поверхностей капсул, промышленного ПО для сшивки и анализа трехмерных моделей полусфер бокса-конвертера и мишенного узла.

Положения, выносимые на защиту.

1. Стенд измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии с автоматизированными сбором и обработкой данных позволяет выполнять анализ спектров пространственных мод (гармонических компонент) возмущений поверхностей капсул с разрешением до 3 нм, получать трехмерную карту дефектов поверхности, а для оптически прозрачных капсул - также выполнять анализ толщины стенки капсул с точностью 0,5%.

2. Рентгеновская фазоконтрастная система диагностики параметров полых капсул, а также криогенной мишени с автоматизированным анализом изображений позволяет определять спектры пространственных мод возмущений поверхностей и толщины слоев с разрешением до 2,5 мкм.

3. Оптическая теневая система диагностики параметров твердого слоя топлива с автоматизированным анализом изображений позволяет определять спектры пространственных мод возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива и толщину слоя с разрешением до 0,6 мкм при нулевой разнотолщинности слоя топлива.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается использованием комплекса современных методов исследования: оптической конфокальной микроскопии, оптической профилометрии «focus variation», оптического теневого метода, рентгеновского фазоконтрастного метода, использованием современного ПО для численного моделирования и обработки экспериментальных данных, хорошей воспроизводимостью результатов, полученных на

современном оборудовании ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», а также подтверждается публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях и итогами обсуждения результатов на научных конференциях.

Публикации и апробация работы.

Диссертационная работа включает в себя исследования, выполненные в период с 2018 по 2026 годы в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, в Институте лазерно-физических исследований и в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, на физическом факультете, на кафедре общей физики и волновых процессов.

По теме диссертации опубликовано 42 печатных работы, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях [A1-A6] (5 из которых – в изданиях, индексируемых в Web of Science, Scopus и RSCI [A1-A5]), а также 20 статей в сборниках трудов конференций, 16 тезисов докладов.

Основные результаты диссертации докладывались на 10 Международных и 7 Российских конференциях:

- XX, XXV Харитоновские тематические научные чтения. Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии, г. Саров, 2018, 2024.
- XII, XIII, XIV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям Национального центра физики и математики (НЦФМ) и Института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, 2019, 2022, 2023.
- 17-я, 19-я, 20-я, 21-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке», г. Саров, октябрь 2018, 2021, 2022, 2023.
- XVI Международная конференция «Забабахинские научные чтения – 2023», г. Снежинск, 2023.
- 15-я, 16-я, 17-я Международная школа молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова «IHISM», г. Саров, 2022, 2023, 2024.
- 21-я Международная конференция «Оптика лазеров» (ICLO 2024), г. Санкт-Петербург, 2024.
- 40-я Фортовская международная конференция «Взаимодействие интенсивных потоков энергии с веществом», п. Терскол, Приэльбрусье, 2025.
- 52-я, 53-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород Московской обл., 2025, 2026.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке и сборке конструкции стенда измерения параметров капсул, автоматизации работы стенда, разработке метода сбора данных с полных поверхностей капсулы, получении и обработке экспериментальных данных, получении трехмерных карт дефектов поверхности капсул;
- измерении параметров полусфер боксов-конвертеров на всех этапах их изготовления и в процессе отработки технологии изготовления, измерении параметров мишенного узла;
- разработке конструкции и сборке ОТ систем для непрерывного наблюдения за формированием твердого слоя топлива в капсуле и диагностики параметров слоя;
- выполнении двумерного численного моделирования для получения взаимосвязей между положениями характеристических особенностей на ОТ и РФК изображениях с параметрами внутренних поверхностей капсулы и внутренней поверхности твердого слоя топлива, а также параметрами свободной поверхности жидкого топлива;
- выполнении трехмерного численного ОТ и РФК моделирования для исследования влияния различных факторов на формирование изображений и корректность диагностики;
- разработке метода диагностики параметров возмущенной поверхности топлива по ОТ изображению;
- разработке метода для осуществления дозирования жидкого топлива по ОТ и РФК изображениям для получения твердого слоя топлива требуемой толщины в КМ;
- разработке программ для автоматического контроля параметров твердого слоя топлива, в том числе с возмущенной внутренней поверхностью, по ОТ и РФК изображениям с трехмерным восстановлением внутренней поверхности твердого слоя топлива;
- обработке результатов формирования твердого слоя топлива в капсуле;
- выполнении температурных расчетов мишенного узла для анализа результатов экспериментов по формированию слоя топлива.

Автор принимал участие в:

- разработке программы автоматической сшивки экваториальных поверхностей капсулы;
- разработке конструкции и сборке стенда РФК диагностики параметров капсул и КМ;
- в проведении экспериментов по получению твердого слоя топлива в КМ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, включающего в себя 106 наименований. Работа изложена на 165 страницах, содержит 6 таблиц, 110 рисунков.

Глава 1. Методы диагностики параметров элементов криогенной мишени для ЛТС.

Литературный обзор

Исследования в области разработки методов диагностики параметров КМ проводятся в научно-исследовательских центрах разных стран мира: США (установки OMEGA и NIF, а также входящие в «The Indirect Drive ICF Collaboration» институты других стран), Китай (установки серии ShenGuang), Франция (установка LMJ), Российская Федерация (установка мегаджоульного уровня энергии РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФИАН).

Основными элементами криогенного мишенного узла (КМУ) с критичными для зажигания параметрами являются капсула, твердый слой топлива (ТСТ) и бокс-конвертер. Измерения параметров капсулы подразумевают собой измерения геометрических параметров ее внешней и внутренней поверхностей. Также измерениям подлежат все остальные составляющие КМУ элементы как в отдельности, так и в сборке. Капсула, размещенная в боксе-конвертере с герметично закрытыми окнами, устанавливается в криостат и при криогенных температурах наполняется топливом. Капсула с твердым слоем топлива — это КМ. Диагностика параметров ТСТ в капсуле выполняется в процессе получения КМ и перед отправкой готовой, удовлетворяющей всем требованиям криогенной мишени в камеру взаимодействия лазерной установки для проведения эксперимента по зажиганию.

1.1. Капсула

Существующие методы для диагностики качества внешней и внутренней поверхностей капсул в общем случае могут быть разделены на методы контурных линий и широкопольные методы. Методы контурных линий включают в себя контактный метод атомно-силовой микроскопии и бесконтактные методы, такие как: оптическая теневая диагностика, рентгеновская диагностика, лазерное конфокальное сканирование. Широкопольные методы являются бесконтактными и включают в себя микроскопию и интерферометрию. Методы микроскопии включают в себя сканирующую электронную микроскопию, конфокальную микроскопию и цифровую голографическую микроскопию. Интерферометрические методы включают в себя дифракционную интерферометрию фазового сдвига и нуль-интерферометрическую микроскопию.

1.1.1 Методы контурных линий

1.1.1.1 Оптический теневой метод

В ФИАН был предложен контурный оптический теневой метод для реконструкции формы внутренней поверхности как однослойных (капсул), так и двухслойных (капсул с твердым слоем топлива) мишеней [41]. Метод основан на обработке параметров яркого кольца, наблюдаемого на наборе теневых изображений, полученных при вращении мишени, закрепленной на оси, перпендикулярной оси наблюдения.

1.1.1.2 Рентгеновский метод

Для измерения параметров поверхностей капсул может использоваться контурный рентгеновский метод [40]. РИ просвечивает капсулу, а образующееся рентгеновское изображение используется для получения контурных линий части капсулы. Расстояние до источника РИ обычно 70 мм, до детектора 10 мм, поэтому расходимость пучка РИ через классическую капсулу диаметром 2 мм пренебрежимо мала. Капсула вращается с шагом 2° или 4° и собирается набор изображений. После анализа всех изображений в среде LabVIEW выполняется трехмерная реконструкция поверхности. Достижимая точность измерений составляет 0,3 мкм.

В работах [11, 43, 44] (установка NIF) описаны способы измерения профилей многослойных капсул (Be, Be легированный Cu, CH, CH легированный Ge), в которых уровни легирования изменяются вдоль радиуса капсулы, как показано на рисунке 1.1, методом контактной радиографии.

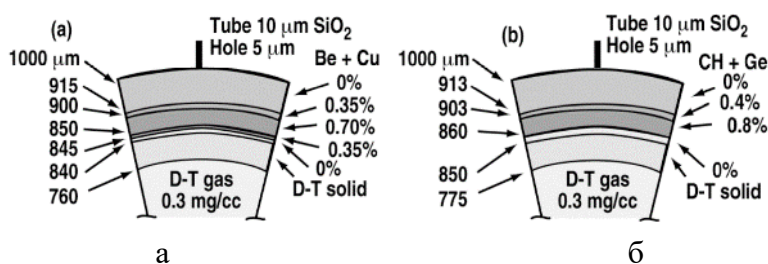


Рисунок 1.1 – Две альтернативных модели криомишени NIF с профилированными абляторами (% означает относительные концентрации легирующей примеси в ат. %) [11]

В работе [45] приведено сравнение четырех методов оценки параметров многослойных капсул. Контактная радиография (CR) используется для измерения партии капсул, где получают профили легирования капсул с высоким разрешением. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS) требует разрушения одной капсулы из партии для получения профилей легирования кислорода, аргона и меди. Дифференциальная радиография (DR) требует предварительных знаний о профиле кислорода в капсуле и обеспечивает

отдельные профили легирующих элементов. Полученные средние концентрации затем проверяются с помощью метода рентгеновской краевой спектроскопии поглощения (XAS).

1.1.1.3 Атомно-силовая микроскопия

В работе [46] китайских исследователей описан метод измерения параметров полной внешней поверхности капсулы с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) и устройства вращения капсулы с аэростатическим подшипником, благодаря чему достигается разрешение измерений профилей поверхности капсулы на уровне 1,7 нм, и ошибка при перекладывании капсулы по углу составляет менее 2,5°. Это контактный контурный метод измерения только внешней поверхности капсулы. Капсула устанавливается на вакуумный держатель и вращается в зоне измерения атомно-силового микроскопа, как показано на рисунке 1.2. Вакуумный держатель установлен на вертикально расположенный аэростатический подшипник, обеспечивающий высокоточное медленное вращение (угловая неточность менее 0,005°). Для того чтобы измерить произвольные кольцевые трассы поверхности капсулы, сбоку установлен аксиальный поворотный столик для переориентации капсулы в пространстве.

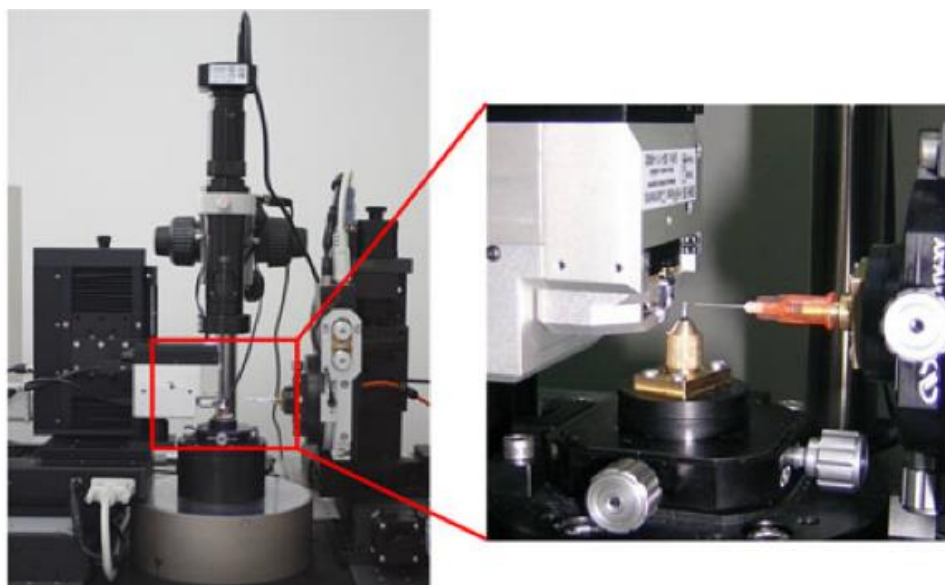


Рисунок 1.2 – Фотография прибора на основе АСМ для сканирования профиля внешней поверхности капсулы [46]

Для капсулы диаметром 2 мм сканируются 4 трассы, расположенные под углом 45° друг к другу. Каждая из орбит шириной 800 мкм включает в себя контурные линии с промежутком 1 мкм. Результаты сканирования показаны на рисунке 1.3. Прибор измеряет только отклонение от окружности. После предварительной обработки все данные комбинируются, выравниваются и в итоге получается карта сферической поверхности $R(\theta, \phi)$.

φ). Угловое разрешение $R(\theta, \varphi)$ составляет 1° , а $R(\theta, \varphi)$ выражается как комбинация функций сферических гармоник. По отдельным кольцевым данным преобразованием Фурье строится одномерный СМП.

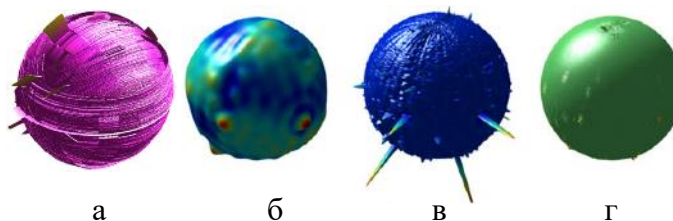


Рисунок 1.3 – Результаты сканирования внешней поверхности капсулы с помощью АСМ: а) орбиты, покрывающие полную поверхность. Реконструкция поверхности для мод различных порядков: б) 0-20, в) 21-250, г) 251-301 [46]

Полная поверхность капсулы восстанавливается для различных мод возмущений поверхности: от 0 до 20 моды – низкие частоты, от 21 до 250 моды – средние частоты, от 251 до 301 моды – высокие частоты, показанные на рисунке 1.3. Разные моды имеют разное влияние на развитие гидродинамической неустойчивости в процессе имплозии, для точной оценки которого должна быть получена амплитуда флуктуаций для каждой конкретной моды. Таким образом, кривая спектра пространственных мод (СПМ), которая дает отношение между частотами флуктуаций поверхности и их амплитудами, является важным параметром для оценки характеристик капсул, применяемых в экспериментах по ЛТС. По сравнению с одномерным, двумерный СПМ более информативен для характеристики полной поверхности капсулы и вычисляется с помощью анализа данных со всей поверхности.

Аналогичный метод на базе АСМ описан в работе [47]: так называемый «Spheremapper» (топограф сферы) включает в себя АСМ и прецизионное устройство вращения / переключивания капсулы.

1.1.1.4 Лазерное конфокальное сканирование

В работах [48-52] китайских исследователей описан лазерный дифференциальный конфокальный метод (LDC) с высоким пространственным разрешением для непрерывного измерения трехмерных профилей внешней и внутренней поверхностей капсулы и анализа ее пространственной однородности по толщине. Метод обеспечивает измерения с фокусировкой на вершине поверхности капсулы вдоль радиального направления с использованием лазерного сенсора. Повторяемость измерений для внешнего профиля составляет 14 нм, для внутреннего профиля 24 нм, для однородности по толщине стенки капсулы 22 нм [48]. Принцип измерений показан на рисунке 1.4. Лазерный пучок фокусируется на вершине внешней поверхности капсулы, измеряется оптическое положение вершины, затем фокус смещается на внутреннюю

поверхность, измеряется ее оптическое положение. Затем капсула поворачивается вертикальным держателем на определенный угол, и процедура повторяется. Всего измеряется 4096 точек на окружность (в одной плоскости). После этого горизонтальным держателем капсула снимается, поворачивается на 10° , возвращается на вертикальный держатель и сканируется следующий кольцевой профиль. Недостатком данного метода является то, что между просканированными контурными линиями, расположенными под углом 10° друг к другу относительно центра капсулы, может быть не учтено много дефектов поверхности, а уменьшение шага угла поворота приведет к увеличению количества перекладываний капсулы между держателями и, как следствие, увеличению времени измерений.

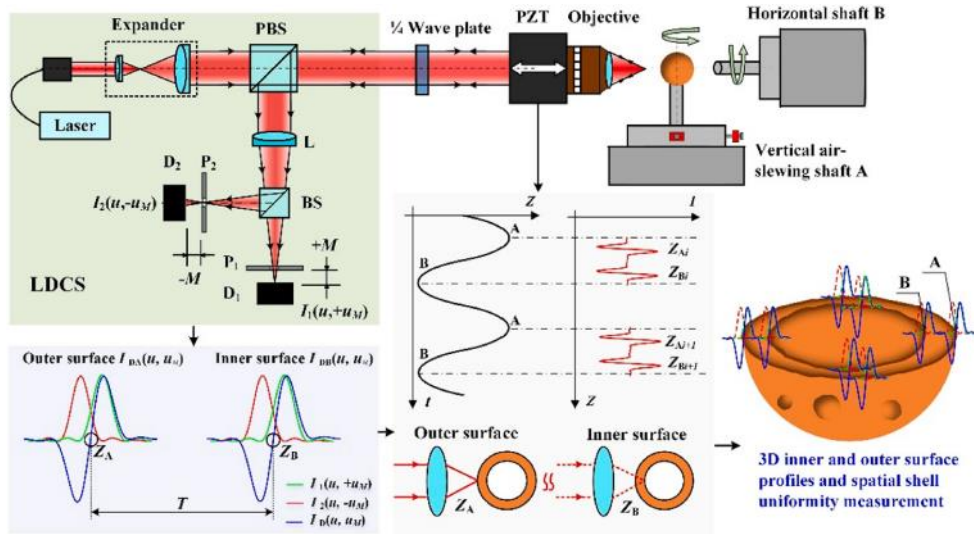


Рисунок 1.4 – Принцип трехмерных измерений внешней и внутренней поверхностей капсулы и ее толщины стенки [49]

1.1.2 Широкопольные методы

1.1.2.1 Микроскопия

В работе [53] американских исследователей (LLNL) приведено сравнение измерений параметров одного дефекта на внешней поверхности капсулы с помощью нескольких методов: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), конфокальная микроскопия, дифракционная интерферометрия фазового сдвига (PSDI), вертикальная сканирующая интерферометрия белого света (VSI) и атомно-силовая микроскопия (АСМ). Сравнение измерений контрольного дефекта различными методами приведено на рисунке 1.5. Метод АСМ удовлетворяет требованиям к точности измерений, но время сканирования, по утверждению авторов, чрезмерно долгое, поэтому этот метод не рассматривался в работе. Метод PSDI хорошо использовать для измерения гладких сферических поверхностей, т.к. при измерении малых

дефектов (с пространственными размерами 3×5 мкм и высотой 0,5 мкм), рассеивающих свет, он дает достаточно большую ошибку по сравнению с методом СЭМ, как это видно на рисунке 1.5, а, б. Метод VSI также непригоден для малых рассеивающих свет дефектов, топографии содержат много ошибочных пиков и впадин (см. рисунок 1.5, в). Сравнение измерений большого числа дефектов на конфокальном микроскопе с измерениями, полученными методом СЭМ, показало, что конфокальное профилирование поверхности – наиболее подходящий метод измерения как гладких, так и шероховатых поверхностей капсул (см. рисунок 1.5, г), а также позволяет проводить измерения за относительно небольшое время по сравнению с АСМ.

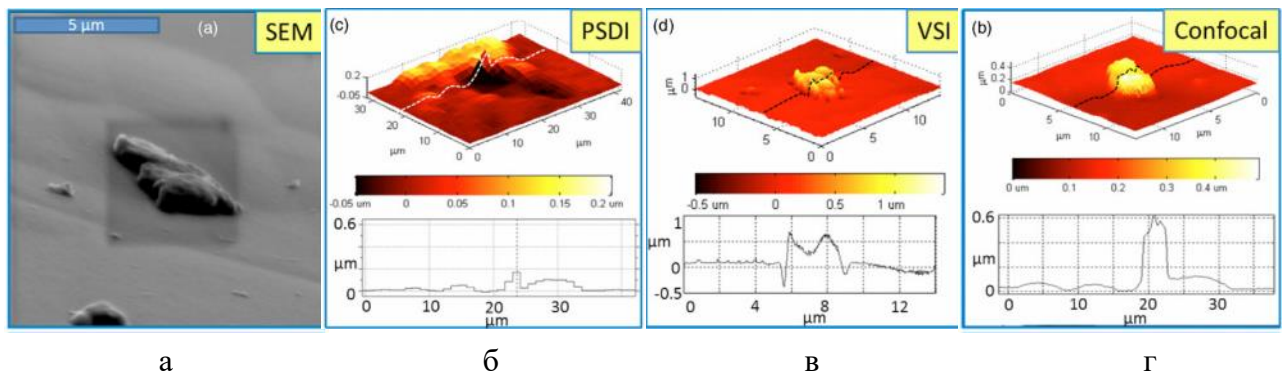


Рисунок 1.5 – Сравнение измерений одного контрольного дефекта различными методами: а) СЭМ (SEM), б) PSDI, в) VSI, г) конфокальная микроскопия [53]

В работе также описана схема проведения измерений с помощью системы позиционирования и конфокального микроскопа. Система позволяет проводить измерения отдельных дефектов объемом $7,5 \text{ мкм}^3$ и более с точностью $\pm 10\%$ и точностью позиционирования лучше $0,25^\circ$ (линейная точность 5 мкм) по всей поверхности капсулы. Это достигается с помощью конфокального микроскопа, девятиосевой высокоточной системы позиционирования, которые изображены на рисунке 1.6, и системы автоматизированного сбора и обработки данных. Сначала капсула с вклеенным в нее капилляром устанавливается на основной вакуумный держатель, строится карта 90% поверхности капсулы с использованием объектива с небольшим увеличением (50X) и апертурой 0,55 при вращении по двум осям. Капилляр при этом находится внутри основного держателя. Схема наложения топографий на сферу показана на рисунке 1.6, б. После сбора и обработки полного набора кадров выполняется сканирование областей, содержащих дефекты с использованием объектива 100X и апертурой 0,9. После того как 90% поверхности капсулы измерены, сборка переносится на второй держатель для того, чтобы 10% поверхности с капилляром, закрытые основным держателем, могли быть просканированы объективом 100X и апертурой 0,75.

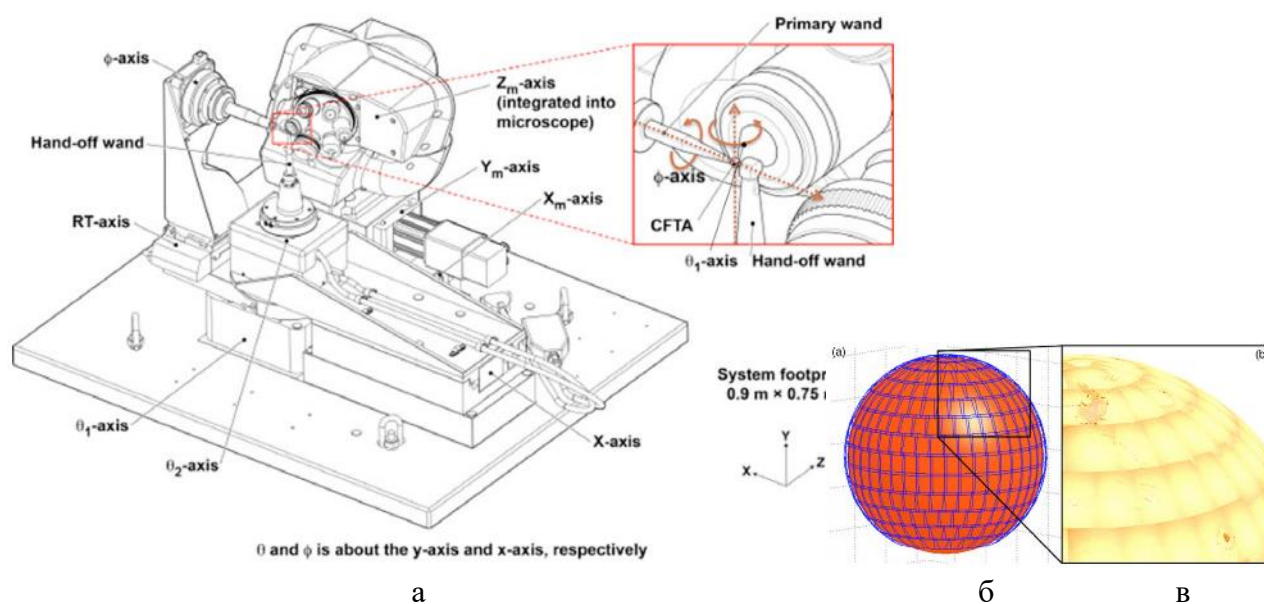


Рисунок 1.6 – Схема сканирования внешней поверхности капсулы: а) система сканирования, б) схема наложения топографий на сферу, в) область реальных данных, полученных при сканировании [53]

В работе [54] описана взаимодополняющая методика измерения параметров капсул на установке NIF из высокоплотного углерода (HDC) с помощью атомно-силового и конфокального микроскопов. Разработаны алгоритмы анализа для измерения параметров дефектов и оценки характеристик капсул. Трассы экваторов капсул сначала сканируются на HD-ACM (high-density ACM) с латеральным разрешением 0,1 мкм. Так определяются основные искажения формы и статистика по дефектам. ACM дает одномерную информацию. Затем конфокальный микроскоп строит 2D-карты поверхности при низком увеличении (20X) для поиска всех дефектов, которые могли быть не учтены HD-ACM. Финальное конфокальное сканирование выполняется при высоком увеличении (150X с латеральным разрешением <0,3 мкм) для точной объемной характеристики всех дефектов. Стратегия измерений определяется балансом между разрешением и временем измерений. Несмотря на то, что с помощью объектива 150X можно построить карту всей поверхности капсулы с разрешением ~0,2-0,3 мкм, это требует сбора и анализа 6000 кадров в течение 50 часов. Кроме этого, кадры недостаточно большие и, как следствие, информация о низких и средних модах теряется. Для разумной скорости измерений, получения формы капсул и параметров отдельных дефектов разработана гибридная стратегия выборочного контроля:

- сканирование 19 HD-ACM трасс для получения статистики дефектов и картины капсулы (формы низких и средних мод), составление карты полной поверхности с помощью объектива 20X для идентификации всех крупных участков с особенностями поверхности (>30 мкм³),

- получение 12 произвольных кадров с помощью объектива 150X участков больших особенностей (или других дефектов), обнаруженных с помощью объектива 20X;
- сканирование одной капсулы из партии для получения 1000 кадров с экваториального пояса, покрывающего 16% поверхности капсулы, с помощью объектива 150X, что дает крупномасштабную карту поверхности для анализа источников роста неустойчивостей и расчета перемешивания масс при сжатии криомишени.

Цифровая голографическая микроскопия (DHM) – эффективная методика для быстрого 3D-сканирования внешней поверхности капсулы, используемая на установке LMJ [55]. Устройство захватывает голограммы и восстанавливает двойное изображение, одно для интенсивности, а другое для фазы. В зависимости от используемой линзы объектива и диаметра капсулы, необходимо сделать от нескольких сотен до нескольких тысяч снимков, чтобы охватить оба полушария (1170 снимков для капсулы диаметром 2200 мкм). Разработана система управления двумя осями вращения для автоматического получения всех трехмерных данных. ПО для восстановления трехмерной поверхности (с использованием сшивки изображений для получения трехмерной поверхности капсулы) и анализа используется для измерения диаметра, высоты и локализации отдельных дефектов, таких как выпуклости или впадины. Проведено исследование метрологических возможностей метода DHM. Измерения, выполненные на ступенчатых эталонах, показывают, что методом DHM можно измерять дефекты высотой 100 нм с точностью менее 3 нм.

1.1.2.2 Интерферометрия

Широкопольные интерферометрические методы включают в себя PSDI [56] и нуль-интерферометрическую микроскопию (NIM) [57, 58]. Топография поверхности восстанавливается косвенно численным вычислением распространения волнового фронта от поверхности детектора до поверхности капсулы, но такой непрямой подход трудоемкий и неточный (в сравнении с методом СЭМ [54]).

В работах [59, 60] описано измерение параметров капсул с помощью метода PSDI: низкие моды поверхности данным методом вычислить нельзя, но данные по дефектам, извлеченные из полученных изображений, могут быть использованы для анализа высоких мод. Проведено сравнение методов PSDI и ACM: даже плотно расположенные друг к другу трассы, полученные на ACM, могут упускать часть дефектов. На рисунке 1.7 представлено сравнение схем сканирования с помощью методов ACM и PSDI.

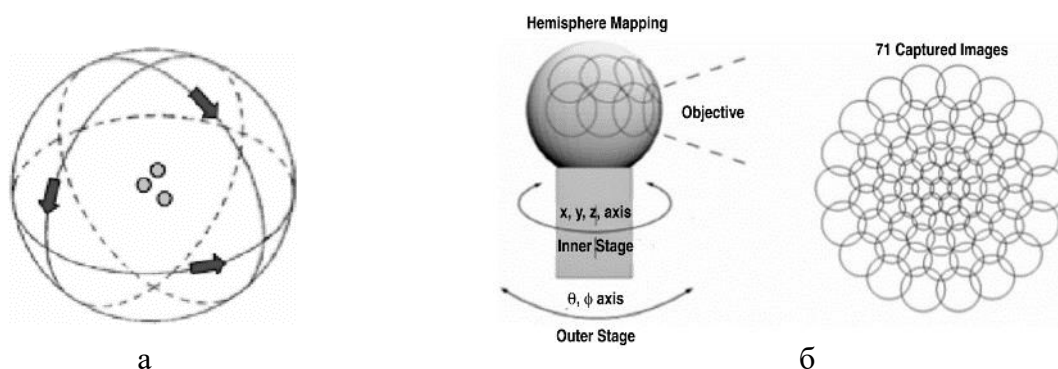


Рисунок 1.7 – Сравнение схем сканирования с помощью методов ACM и PSDI:
 а) Диаграмма трасс с ACM для анализа низких мод, б) схема построения топографии полусферы капсулы на пятиосевом столике с получением 71 изображения методом PSDI [60]

Метод NIM позволяет получить изображение внешней поверхности капсулы на камере и является интерферометрическим методом для прямого и широкопольного определения дефектов поверхности капсулы. Однако, с помощью NIM трудно напрямую определять дефекты внутренней поверхности из-за проблем с точной фокусировкой на ней [61, 62]. Для того чтобы решить эти проблемы, в работе [62] предложен интерферометрический микроскоп с конфокальной фокусировкой (CFIM), обеспечивающий объективный критерий для исходного положения капсулы и камеры, с гарантией, что внутренняя поверхность капсулы идентифицируется точно. Схема системы приведена на рисунке 1.8. Проведено сравнение результатов измерения дефектов внутренней поверхности капсулы методом CFIM с разрушающим методом СЭМ.

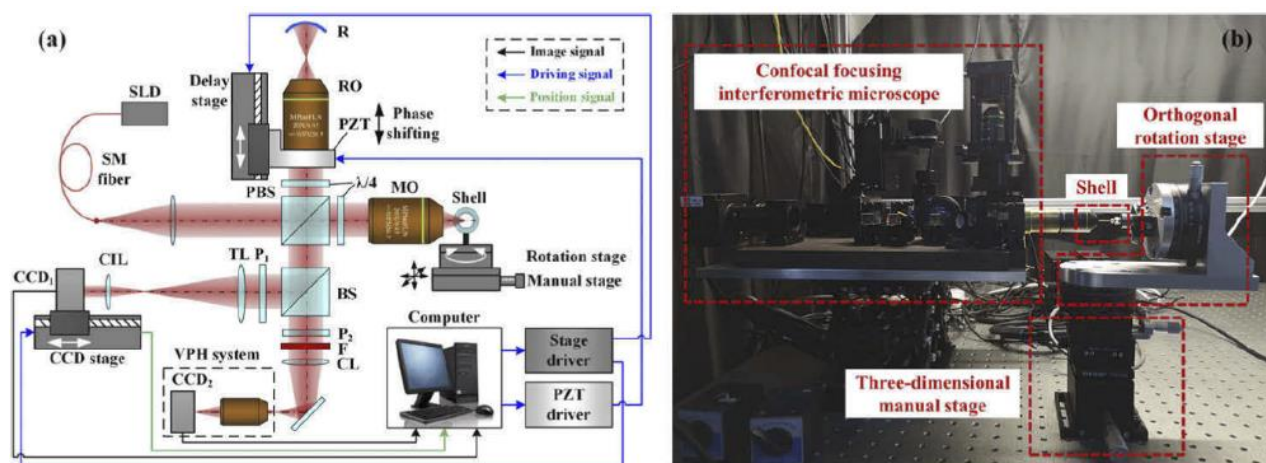


Рисунок 1.8 – Система CFIM: а) спроектированная, б) реализованная [62]

1.2 Элементы криогенной мишени NIF

В работе [63] описана методология измерений элементов и узла криогенной мишени NIF, которая состоит из базы и собственно мишени [64]. База обеспечивает взаимосвязь

мишени с внешними системами: газонапуска, охлаждения и электрической (нагреватели, датчики температур). Мишень состоит из двух отдельных подсистем: термомеханического кожуха (TMP) и «ядерного материала». TMP состоит из кожухов, диагностического кольца, различных окон и охлаждающих плеч, как показано на рисунке 1.9. «Ядерный материал» состоит из хольраума, пленок на отверстиях для ввода излучения (LEH), тенгов (пленок, поддерживающих капсулу) и сборки капсулы с капилляром (CFTA). Элементы мишени спроектированы специально для удобства измерений и диагностики. Измерения должны быть бесконтактными из-за хрупкости мишени. Допуска на сборку обычно лежат в диапазоне от 5 до 20 мкм, при этом система измерений должна обеспечивать точность в 10 раз лучше (1-2 мкм) и высокую повторяемость измерений.

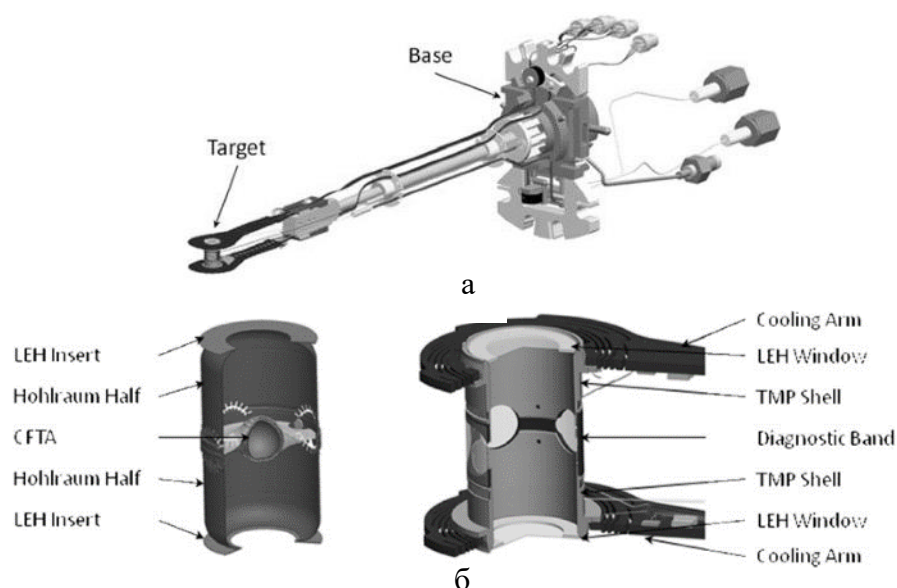


Рисунок 1.9 – Конструкция узла КМ NIF: а) база + мишень, б) элементы мишени [64]

Капсула устанавливается в центре хольраума с точностью ± 10 мкм аксиально и ± 12 мкм радиально. Радиальные измерения выполняются измерением концентричности внешнего диаметра капсулы относительно внутреннего диаметра отверстий ввода ЛИ. Аксиальное положение вычисляется с использованием многочисленных измерений, включая измерения осевой длины мишени, глубины LEH, толщины пленок на LEH, радиуса капсулы, расстояние от вершины капсулы до вершины кожуха TMP.

В работе [65] описано измерение отверстия для капилляра в капсуле рентгеновским методом с фазовым контрастом (сокращенно - методом РФК). Метод имеет три основных источника ошибок: увеличение от точечного источника РИ, искажение от линз, формирующих изображение, сдвиг фазового контраста. Для крупномасштабных измерений, например, диаметра капсулы, в суммарной ошибке преобладают увеличение от точечного источника РИ и искажение от линз. Для мелкомасштабных измерений, таких как измерения параметров отверстий, выполненных лазером, в ошибке измерений преобладает сдвиг фазового контраста.

Авторами был разработан эмпирический метод калибровки измерений с точностью не хуже 0,5 мкм, основанный на измерении набора из 35 отверстий сначала методом радиографии, затем на СЭМ и сфокусированным ионным пучком (FIB). Результаты приведены на рисунке 1.10. Оказалось, что измеренный диаметр отверстий завышается методом РФК примерно на 2 мкм для диаметров от 5 до 10 мкм. Измерения методом FIB наиболее точные и имеют случайную ошибку в среднем менее 0,5 мкм. Также приведен еще один способ проверки измерений методом РФК: капилляр диаметром 1 мкм, заведомо больший чем диаметр отверстия, не может быть введен в отверстие, отсюда вывод, что реальный диаметр отверстия меньше, чем по результатам измерений.

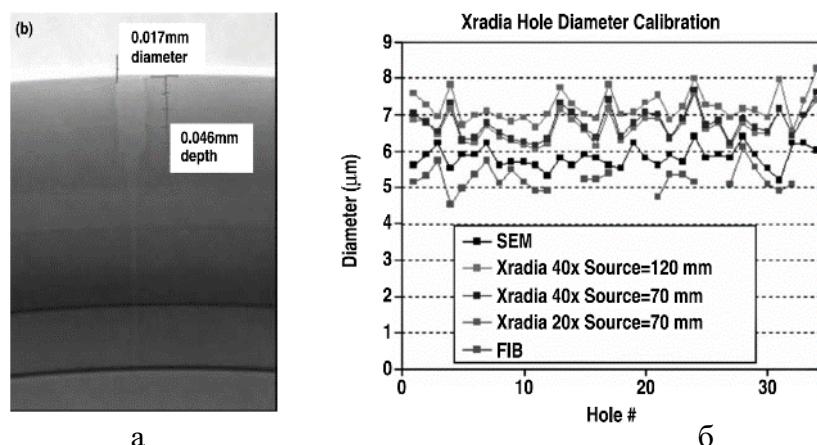


Рисунок 1.10 – Калибровка измерений, выполненных методом РФК с помощью метода FIB: а) измерение параметров отверстия методом РФК, б) сравнение методов: метод РФК, СЭМ и FIB, для метода РФК видны систематические отклонения для различных увеличений и расстояний от источника до объекта при фиксированном расстоянии до детектора [65]

Работы в рамках изготовления и измерения элементов КМ NIF проводятся на исследовательской базе GA и LLNL [30]. В GA измеряются элементы КМ NIF с помощью следующих методов:

1. PSDI. CCD-изображения имеют латеральное разрешение ~1 мкм и точность по высоте ~5 нм. В текущей конструкции интерферометр использует 110 изображений для захвата всех отдельных дефектов и общей кривизны по всей поверхности капсулы, как показано на рисунке 1.11, а.

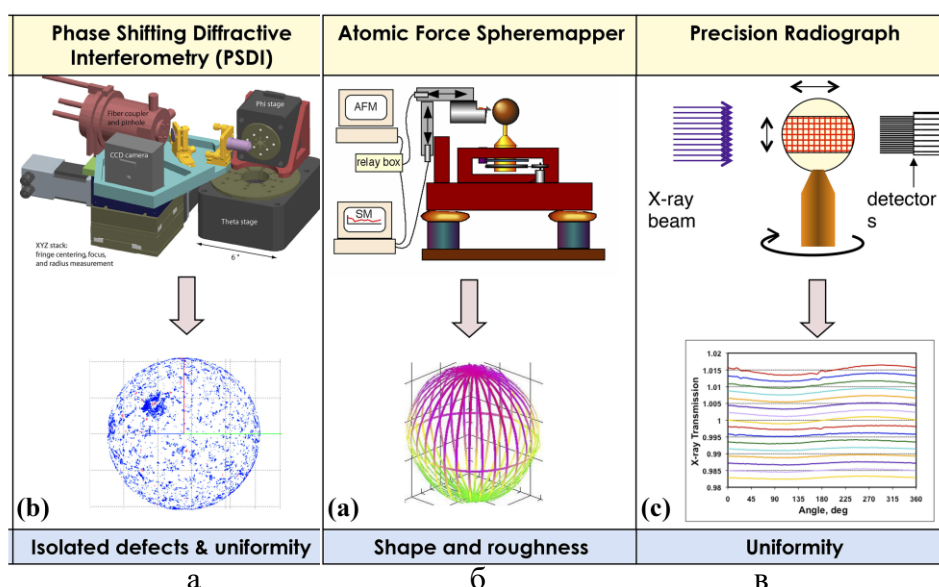


Рисунок 1.11 – Различные методы измерения параметров капсул: а) PSDI для измерения отдельных дефектов и однородности капсулы, б) ACM для определения формы капсулы и шероховатости поверхности, в) прецизионная радиография для подтверждения однородности капсулы [30]

2. ACM: с использованием прибора «Spheremapper» сканируются экваториальные профили при вращении капсулы, измеряется шероховатость поверхности и кривизна капсулы. Прибор обеспечивает полные и точные измерения средних мод по 19 экваториальным профилям, как показано на рисунке 1.11, б.

3. Контактная радиография: для точного (до 0,1 ат. %) профилирования легирующих примесей в капсуле.

4. СЭМ с энергодисперсионной рентгеновской приставкой используется для контроля качества и мониторинга загрязнений (примесей), для определения профилей легирования в капсуле и микроструктуры хольраума, легированного ураном.

5. Рентгеновская микроскопия: рентгеновский микроскоп с точечным источником используется для измерения геометрии отверстия под капилляр, выполненного лазером, с разрешением $\sim 1,5$ мкм.

6. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS): В GA развили основанную на EDS модель, чтобы сделать метод EDS количественным для относительно легких элементов с очень низким Z для проверки капсулы на загрязнения и легирующие примеси.

7. Рентгеновская флуоресценция: стандартная система позволяет определять только концентрацию (ат. %) элементов в плоских образцах. В GA разработали метод для количественного вычисления концентрации легирующего элемента в сферических образцах. Точность метода достигает 10% для элементов с высоким Z.

8. Прецизионная радиография: система, представленная на рисунке 1.11, в, позволяет определять не только возмущения поверхности, но и изменения, вызванные неоднородностями легирующих слоев, при пространственном разрешении 120 мкм.

10. Двойная конфокальная измерительная система: используется для измерений толщины простых непрозрачных образцов как дополнение к рентгеновской краевой спектроскопией поглощения. Может быть получена трехмерная карта пузырьков и ступенек в компонентах мишени с точностью ~ 1 мкм.

В LLNL есть две фабрики производства мишеней. Это станция криогенных испытаний мишеней для зажигания перед их отправкой на NIF и фабрика восстановления загрязненных тритием мишеней на станции тестирования или на NIF. В LLNL используются следующие методы для измерения элементов мишеней:

1. АСМ используется для измерения поверхностей материалов мишеней с нанометровым пространственным и вертикальным разрешением.

2. Система исследования капсулы на базе конфокального микроскопа 4л: идентификация частиц размером в несколько микрон и их положения относительно координат мишенной камеры NIF.

3. СЭМ с FIB: FIB-диагностика позволяет выполнять анализ отдельных капсул с демонстрацией внутренней микроструктуры, дефектов и составных элементов, а также контролировать параметры процесса напыления капсулы и формировать композиционно и микроструктурно однородные капсулы.

5. Трансмиссионная электронная микроскопия с потерей электронной энергии позволяет выполнять атомный анализ на структурном уровне и чрезвычайно высокое разрешение по энергии для анализа материалов капсулы. Латеральное разрешение – до 1 нм.

6. Микрофокусная рентгеновская томография. Разрешение < 1 мкм в поле зрения 1 мм.

7. Двухсторонний интерферометр белого света для непрерывного сканирования обеих сторон образца с целью измерения толщины. Может быть получена трехмерная карта пузырей и ступеней в элементах мишени с точностью до 1 мкм.

1.3 Твердый слой топлива в капсуле

Мишенный узел устанавливается в криостат для формирования твердого слоя топлива (ТСТ) в капсуле. В процессе получения КМ (наполнение капсулы топливом через капилляр до необходимого уровня, замораживание топлива, выравнивание внутренней поверхности твердого слоя топлива) необходимо производить непрерывный контроль параметров слоя топлива, поскольку твердое топливо в капсуле перераспределяется до тех пор, пока его

внутренняя поверхность не выстроится по изотермической поверхности, которая в значительной мере подвержена влиянию множества факторов. Поэтому неотъемлемой частью создания КМ является разработка методов контроля параметров ТСТ. Возможные методы контроля определяются расположением капсулы в боксе-конвертере, который в свою очередь установлен в криостате для достижения температуры формирования твердого слоя топлива, поэтому могут использоваться: оптический теневой (ОТ) метод, оптический интерферометрический (ОИ) метод и РФК метод. Оптические методы применяются для контроля слоя изотопов водорода в оптически прозрачных капсулах (ПС, ПАМС, СН), метод РФК - для контроля слоя изотопов водорода в оптически непрозрачных капсулах (Ве, Ве (Cu_n), НДС).

ОТ метод наблюдения за слоем топлива заключается в следующем. Параллельный пучок видимого излучения падает на капсулу, затем, преломляясь и отражаясь на границах капсулы и топлива, выходит из капсулы. Далее лучи, попадающие в апертуру наблюдения объектива, попадают на камеру, образуя ОТ изображение с характерными светлыми кольцами.

ОИ метод используется для измерения толщины слоя твердого топлива на полярной области капсулы, находящейся на оптической оси. Излучение от источника белого света падает на капсулу с топливом, отражается от поверхностей вакуум – капсула, капсула – топливо, топливо – насыщенный пар. Лучи, отраженные от разных поверхностей, интерферируют между собой и образуют характерные спектры, которые анализируются с помощью спектрографа. Анализ этих спектров дает информацию о толщине стенки капсулы и толщине ТСТ на полярной области капсулы.

РФК метод основан на отклонении рентгеновских лучей на поверхностях КМ. Лучи, падающие на внутренние поверхности капсулы и топлива под скользящим углом, отклоняются от своего первоначального направления, при этом на РФК изображении образуются области отсутствия сигнала – характерные темные кольца.

1.3.1 Оптический теневой метод

В направлении развития оптического теневого метода на NIF достигнуты следующие результаты. Разработан программный код «SHELL3D» для моделирования ОТ изображения [27, 66, 67]. Условия при моделировании: поверхности капсулы и внешняя поверхность ТСТ – концентрические окружности, внутренняя поверхность ТСТ – сумма сферических гармоник, как показано на рисунке 1.12. Требуемое время для моделирования одного изображения по двумерной шероховатости поверхности топлива до моды $l=40$ составляет около 31 дня. Основные выводы по результатам моделирования: источник подсветки должен быть

коллимированный для получения более четкого яркого кольца (ЯК), характеризующего внутреннюю поверхность ТСТ. Кольца меньшей интенсивности более четко характеризуют шероховатость внутренней поверхности ТСТ, но их пути сложные и трудно установить количественное соответствие между кольцами и внутренней поверхностью ТСТ. Центральные области ОТ изображений размываются из-за асимметрии внутренней поверхности твердого слоя топлива, наблюдение этой области может добавить информацию о качестве поверхности, особенно с коллимированным источником, но количественная характеристика – сложная. Разработан программный код «LAYER», который используется для анализа экспериментального ОТ изображения.

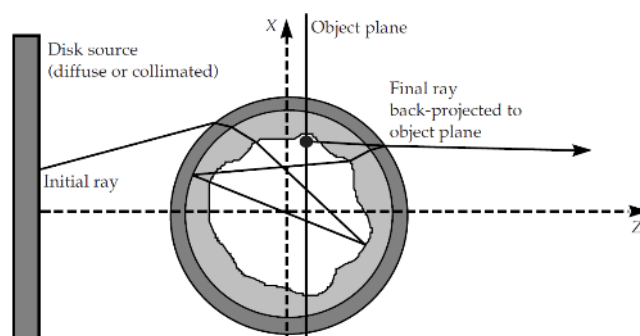


Рисунок 1.12 – Схематическая трассировка лучей в коде «SHELL3D» [27]

На установке OMEGA также развивается ОТ метод диагностики параметров ТСТ: разработана двумерная компьютерная модель «PEGASUS» для трассировки видимого излучения через идеальную мишень [68]. ОТ метод также описан в работе [26]: разработанное ПО «CryoView» обеспечивает наблюдение, сохранение и обработку изображений. ПО «TRIAS» обеспечивает вращение КМ с автоматическим центрированием в плоскости наблюдения. Серии изображений анализируются, выполняется 3D-реконструкция и определение локальных особенностей, вычисляется информация до моды $l=100$. ОТ метод проанализирован с использованием 1D-моделирования и 3D-моделирования методом трассировки лучей. 1D-модель дает информацию о положениях и источниках светлых колец и используется для оценки влияния отклонений внешней поверхности капсулы на видимые отклонения внутренней поверхности ТСТ (т.е. ЯК): небольшие возмущения внешней поверхности капсулы и частицы пыли могут приводить к частичному или полному разрыву ЯК.

Разработана программа «Viewsguo» для анализа отдельных изображений, результатом которой является 3D-реконструкция слоя ТСТ с использованием набора ОТ изображений, полученных при вращении мишени [24, 69]. ЯК обычно измеряется с разрешением 0,12 мкм и напрямую коррелирует с положением внутренней поверхности ТСТ. В качестве подсветки используется светодиод с длиной волны 612 нм. Даже с тремя ортогональными осями

наблюдения вероятность определения значительных дефектов ТСТ относительно мала, поэтому КМ вращается с шагом 15° , обеспечивая наблюдение в 48 плоскостях. В работе [70] приведены дальнейшие исследования. В качестве подсветки уже используется светодиод с длиной волны 627 нм. Разрешение ЯК на ОТ изображениях находится в пределах 0,1 пикселя (0,12 мкм). Тот факт, что положение внутренней поверхности ТСТ коррелирует с положением ЯК, выполняется только для идеальной сферической симметрии. Сдвиг внутренней поверхности ТСТ вдоль оси наблюдения приводит к изменению положения ЯК, т.е. к существенному сдвигу видимой толщины слоя.

Проведено сравнение двух методов: стандартного анализа и трассировки лучей. Метод стандартного анализа основан на использовании зависимости между положением ЯК и внутренней поверхности ТСТ: из множества ОТ изображений определяется положение поверхности и проводится ее 3D-реконструкция. Должны выполняться следующие условия: внешняя поверхность ТСТ гладкая и симметричная, мало влияет на положение и ширину ЯК, искажение оптики минимальное, ЯК гладкое (допускается несколько разрывов). При этом корректны будут только самые низкие моды: $l \leq 6$. Метод трассировки заключается в том, что лучи запускаются от ЯК, проходят через КМ и выходят. Время выполнения расчетов занимает несколько дней, но метод трассировки подходит и при наличии возмущений внутренней поверхности ТСТ в том числе и в высоких модах.

Лучи, распространяющиеся через центр КМ, используются для идентификации дефектов, таких как границы зерен и крупномасштабные смещения, на поверхности ТСТ [68]. Существуют методы для количественного измерения длины и глубины этих дефектов. Лучи, отражающиеся от внутренней поверхности ТСТ и образующие ЯК, используются для измерения шероховатости внутренней поверхности ТСТ на экваторе (средней плоскости) КМ.

В работе [71] описано моделирование прохождения света через КМ методом трассировки лучей (установка LMJ). Исследовано влияние угла расходимости источника: при увеличении угла положение ЯК остается прежним. При увеличении апертуры объектива положение яркого кольца не изменяется, но увеличивается его интенсивность. Исследовано влияние различных мод возмущения внутренней поверхности слоя на корректность ОТ метода. При наличии возмущений в модах от $l=1$ до $l=4$ вдоль оси наблюдения ОТ метод не подходит, особенно для нечетных мод ($l=1, 3$). При наличии возмущений в модах от $l=1$ до $l=4$ в плоскости экватора ОТ метод работает корректно. Также показано, что дефекты поверхности возле плоскости экватора нарушают формирование ЯК, все нечетные моды при этом определяться не будут. Следующим шагом является сравнение ОТ метода с интерферометрическим методом.

В ФИАН построена установка для производства бесподвесных КМ, частью которой является диагностический комплекс для характеристики параметров КМ [41, 72]. Приведены требования к поверхностям КМ: однородность, сферичность, концентричность $<1\%$, шероховатость rms от 0,1 до 1 мкм. Выполнены расчеты по моделированию ОТ изображения по известным параметрам КМ, которые описываются уравнениями эллипсоидов. Представлены графики зависимости толщины ТСТ от положения ЯК для нескольких аспектных отношений капсулы. Выявлено, что смещение вдоль оптической оси центра внутренней поверхности ТСТ приводит к ошибке в несколько микрон при определении толщины ТСТ, смещение по вертикальной оси практически не влияет на оценку. Разработанное ПО «Target Studio» включает в себя три программы: «Shell explorer» и «Bright ring» (подготовка изображения, поиск ЯК и края для каждой проекции, общее число которых составляет 100), «EasyView3D» (визуализация конечного результата). Среднее отклонение реконструированной поверхности от реальной составляет $\pm 1\%$ радиуса мишени. В работе сформулированы технические требования к системе диагностики: несоосность зондирующего излучения и нормали к плоскости фотоприемной матрицы не должна превышать $0,8^\circ$ для обеспечения точности измерения не хуже 1 мкм, коллимированный пучок с пространственной расходимостью не более $1^\circ 36'$. Снижение апертуры наблюдения позволяет с большей точностью определить положение ЯК, а увеличение апертуры позволяет повысить пространственное разрешение ОТ изображения, поэтому желательно учесть возможность изменения апертуры наблюдения. Оптимальная апертура лежит в диапазоне от 15° до 30° и должна выбираться для каждого конкретного объекта (капсулы с ТСТ) отдельно. Размер пикселя ПЗС-матрицы камеры может составлять несколько микрон, при этом точность восстановления может достигать долей микрона.

1.3.2 Рентгеновский фазоконтрастный метод

Перед постановкой КМ в эксперимент по зажиганию на установке NIF выполняется РФК диагностика только по трем взаимно перпендикулярным осям, но даже такая диагностика не дает полную информацию о поверхности DT-слоя [18].

С целью построения модели формирования рентгеновского изображения разработано ПО трассировки лучей «The TracePro» через идеальные сферические поверхности, в котором рассчитывается контраст, их видимое положение, размытие изображения, но не учитывается дифракция (по расчетам расстояние между дифракционными пиками ~ 2 мкм, гауссово размытие 3 мкм достаточно для сглаживания дифракции) [73]. На рисунке 1.13 представлена иллюстрация по распространению пучка рентгеновских лучей через криомишень. Модели

шероховатых поверхностей принято представлять полиномами Лежандра и эти поверхности всегда непрерывны, но реальные поверхности имеют трещины и другие дефекты, их сложно описать полиномами Лежандра, такая поверхность не может быть точно описана простой последовательностью. Поэтому необходимы новые методы реконструкции поверхности, включающие вычисление положения поверхности и контраста на этой поверхности, эта задача еще не решена.

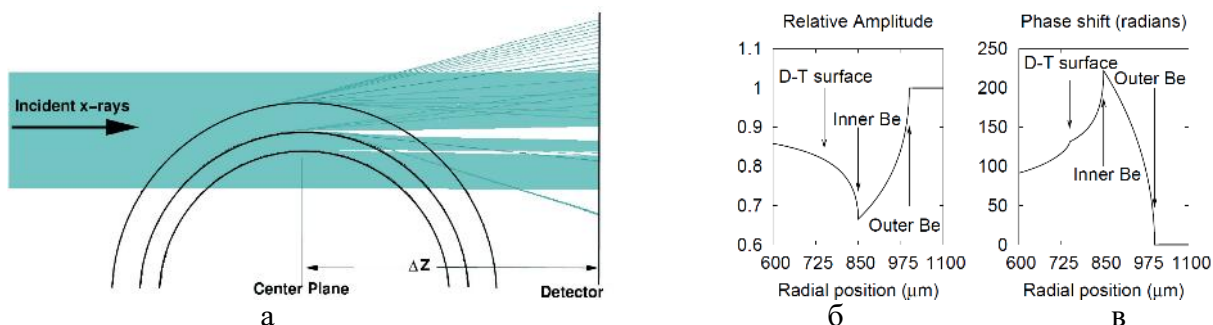


Рисунок 1.13 – Принцип формирования рентгеновского изображения с фазовым контрастом. а) Распространение коллимированного пучка рентгеновских лучей через криомишень. Расчетная амплитуда (б) и фазовый сдвиг (в) от прохождения пучка рентгеновских лучей с энергией кванта 8 кэВ [73]

В работе [74] также приведены причины использования метода РФК. Рентгенография поглощения подходит для объектов с $1 \leq \mu l \leq 3$, где $\mu = 2\pi\beta/\lambda$ – коэффициент ослабления (λ – длина волны излучения, β – мнимая часть показателя преломления), l – длина пути через объект. Для РИ с энергией кванта более 1 кэВ $\mu(\text{Be}(\text{Cu}))$ в несколько тысяч раз больше $\mu(\text{DT})$, поэтому нельзя подобрать энергию кванта РИ, где одновременно $\text{Be}(\text{Cu})$ и DT можно было бы охарактеризовать рентгенографией поглощения. В связи с этим необходимо использовать метод РФК и оптимизировать энергию кванта РИ. Цель: получить $\beta = \max$ для твердого DT и минимальное поглощение РИ в $\text{Be}(\text{Cu})$ (где $n = 1 - \delta + i\beta$ – показатель преломления в РИ, фазовый сдвиг $\sim \delta$, поглощение $\sim \beta$). Для мишеней NIF , где $l_{\max} = 1054$ мкм, вычислена оптимальная энергия кванта РИ из-за ограничений по δ , β и пропускания РИ для разных энергий кванта. При энергии кванта РИ менее 8,9 кэВ пропускание быстро уменьшается с уменьшением энергии: 10% при 5,5 кэВ, 1% при 4,3 кэВ. Пропускание при 18 кэВ выше, чем при 8,9 кэВ, но δ уменьшается в 4 раза при 18 кэВ, чем при 8,9 кэВ. Поэтому энергия кванта РИ ~ 8 кэВ оптимальна для диагностики DT в $\text{Be}(\text{Cu})$, как видно на рисунке 1.13, б, в. Для капсул из CH и пен подходят 10 кэВ и 20 кэВ соответственно.

В работе [74] описано геометрическое моделирование прохождения РИ через КМ тремя методами: трассировка лучей без учета аббераций (резкие скачки и разрывы профиля интенсивности), трассировка лучей с гауссовым размытием (более гладкий профиль интенсивности), распространение волн Френеля с гауссовым размытием (самый гладкий

профиль интенсивности с минимальными перепадами амплитуды на границах). Положение границ для трех методов примерно одинаковое, как видно на рисунке 1.14.

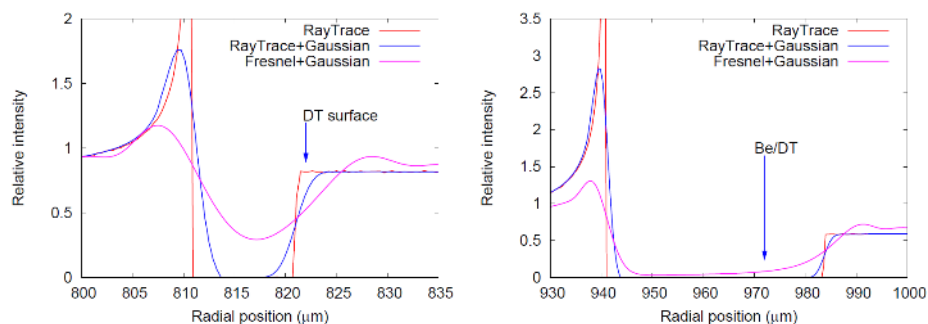


Рисунок 1.14 – Сравнение результатов трех методов моделирования [74]

Разработан алгоритм для моделирования РФК изображений на основе волновой теории формирования изображения [75]. Начальные условия: поверхности капсулы – идеально гладкие концентрические окружности, на внутренней поверхности DT-слоя присутствует отклонение заданного вида. Получены профили интенсивности с более выраженными пиками интенсивности на поверхностях КМ, чем для рентгенографии поглощения. Качество изображений увеличивается подбором подходящих расстояний для максимального контраста.

Протестированы два различных метода моделирования РФК изображений (на основе решения дифракции Френеля с использованием методов Фурье и трассировки по методу Монте-Карло), которые показали хорошее согласие с прописью интенсивности экспериментального изображения [76].

В работе [77] описано влияние трещин в ТСТ на анализ шероховатости его внутренней поверхности: анализ затруднен из-за трещин, т.к. рентгеновские лучи на них могут сильно отклоняться, поэтому метод должен включать в себя измерение контраста для вычисления шероховатости, но в настоящее время отношение сигнал/шум недостаточно для решения этой задачи.

Для формирования четкого характеристического темного кольца (ТК) на РФК изображении должны выполняться два условия: ширина ТК должна быть больше разрешения детектора, угловое отклонение лучей на детекторе должно быть мало для уменьшения размывания ТК [78].

В работе [21] приведены характеристики стенда РФК диагностики: источник работает при ускоряющем напряжении 40 кВ и токе 100 мкА (мощности 4 Вт), размер источника 8 мкм, полный угол расходимости излучения 45° . Свинцовая апертура уменьшает диаметр пучка и обеспечивает узконаправленный пучок. Расстояние от источника до КМ 1 м, камера передвигается для получения различного увеличения. Диагностика проводится следующим образом: снимается ОТ изображение КМ, затем КМ поворачивается на 15° , снимается РФК

изображение в той же самой плоскости, вычисляется профиль внутренней поверхности твердого слоя топлива и ее 2D-шероховатость.

В работе [18] диагностика ТСТ проводится по трем ортогональным плоскостям, каждая рентгеновская ось включает в себя микрофокусный источник РИ, интегрированный в вакуумный бокс и расположенный максимально близко к мишени, как видно на рисунке 1.15 (установка NIF, эксперимент по зажиганию). Все три вакуумных бокса располагаются на одной каретке, которая убирается вверх при необходимости. Три CCD-камеры расположены вне вакуумной камеры, а в стенке камеры установлены бериллиевые окна для прохождения РИ. При использовании РФК метода невозможно напрямую увидеть кристаллизующееся твердое топливо в объеме жидкого топлива, в связи с этим наличие твердого топлива в объеме жидкого предполагается сравнением высоты мениска жидкого топлива с начальной высотой мениска в полностью расплавленном состоянии.

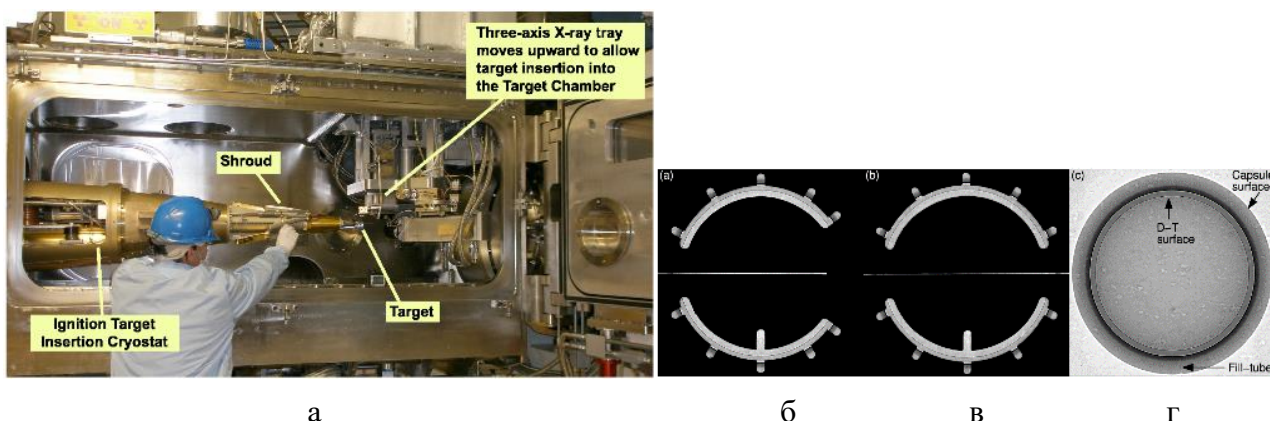


Рисунок 1.15 – РФК система диагностики на NIF: а) три источника РИ, которые поднимаются вверх перед отправкой КМ в камеру взаимодействия; б-г) три доступные рентгеновские проекции для наблюдения за ТСТ: отверстия в боковой стенке бокса-конвертера – прорези (б-г), отверстие в том числе для ввода ЛИ (г) [18]

На установке OMEGA достигнуты следующие результаты в направлении развития РФК метода. Проведено моделирование распространения РИ через КМ с учетом конечного размера фокусного пятна источника РИ, реального энергетического спектра источника РИ, эффективности работы детектора для разных диапазонов энергии кванта РИ, пропускания бериллиевых окон [79]. Разработана программа трассировки лучей «SPARROW», в которой задается толщина ТСТ и проводится моделирование мениска жидкого топлива с учетом угла наклона рентгеновской оси относительно горизонтальной плоскости (особенности размещения над камерой взаимодействия установки OMEGA) [15].

В работе [80] китайских исследователей описан РФК метод. Стенд рентгеновской диагностики включает в себя микрофокусный рентгеновский источник (L9421-02, Hamamatsu Photonics) с размером источника 5 мкм, в дальнейших экспериментах будет использоваться более мощный источник РИ (20 Вт) (L10101, Hamamatsu Photonics). Источник РИ работает при

ускоряющем напряжении 20 кВ и мощности 4 Вт. После прохождения через мишень РИ преобразуется в видимое излучение с длиной волны 550 нм с помощью сцинтиллятора, помещенного в трубку, зафиксированную на объективе. Видимое излучение собирается объективом и промежуточными линзами и попадает на 4-мегапиксельную CCD-камеру с размером матрицы 2048x2048 пикселей и размером пикселя 13,5 мкм², время экспозиции составляет 100 с. Амплитуда вибраций криостата составляет величину менее 200 нм, что приемлемо для получения изображения без размытия во время долгой экспозиции. Экспериментально и теоретически рассчитано пространственное разрешение системы, которое составило от 0,5 до 2 мкм. Разработано ПО для анализа рентгеновского изображения, результатом которого является спектр мощности Фурье для мод от 1 до 100. Сложные алгоритмы обработки изображений совершенствуются для улучшения контраста и отношения сигнал / шум. Для увеличения разрешения вплоть до 100 нм и контраста предложены рентгеновские линзы для сбора РИ в более малое пятно.

1.3.3 Оптический интерферометрический метод

ОИ метод на основе интерферометра фазового сдвига используется для измерения параметров (длины, ширины, глубины и объема) канавок (т.е. «трещин», углублений на поверхности ТСТ, образующихся, например, на границе двух кристаллов при затвердевании топлива, при резком понижении температуры и т.д.). ТСТ, имеющий три канавки, с вероятностью 50% может удовлетворять требованию к площади поперечного сечения канавки (<200 мкм²) [19]. В работе [28] описано применение ОИ метода для измерения параметров внутренней поверхности ТСТ во вращающейся КМ на установке OMEGA, однако, оценка чувствительности и границ применимости метода на данный момент еще не проведена.

В работах [81, 82] китайских исследователей описана компактная высокоточная система тройной длины волны, основанная на итеративном алгоритме, позволяющая проводить непрерывные измерения показателей преломления и толщины стенки как капсулы, так и ТСТ в КМ на трех длинах волн одновременно, схема разработанной системы представлена на рисунке 1.16. В настоящее время с помощью данной системы можно вычислить только средние значения показателя преломления и толщины. Также в работе [81] приведены требования, необходимые для зажигания к КМ: неоднородность, несферичность, неконцентричность поверхностей криомишени должна быть менее 1-2%.

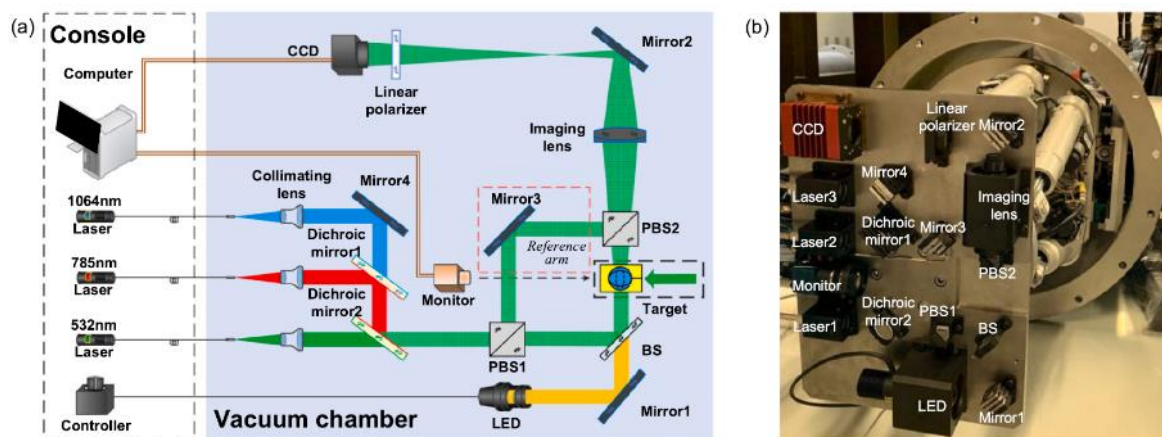


Рисунок 1.16 – Система тройной длины волны: а) схема, б) фото [82]

1.3.4 Сравнение методов

В работе [83] описано моделирование РФК изображений по известному профилю канавок для различных ориентаций канавок и сравнения их с экспериментально полученным изображением. РФК метод дает возможность наблюдать только канавки, которые появляются возле края мишени, и можно количественно характеризовать площадь поперечного сечения канавки, если она пересекает сегмент возле края мишени, но при этом все равно много канавок пропускаются. ОТ метод более чувствителен ко всем канавкам, но он является полуколичественным методом для измерения глубины мелких канавок. Оценка объема канавки, когда глубина и ширина канавки получены из РФК изображения, а длина - из ОТ изображения, является вероятностной. Более низкая энергия кванта РИ увеличивает отклонение лучей и улучшает контраст. Канавки становятся более видимыми, но при этом уменьшается порог видимости и канавки в центральных областях РФК изображения все равно остаются незаметными. Оптические изображения наиболее чувствительны к острым выступам формы, едва заметные изменения формы профиля обеспечивают информацию о глубине и ширине канавок. В этом направлении проводится работа для лучшей характеристики канавок в центральных областях изображений, полученных оптическим методом.

Разработан метод, использующий моделирование и экспериментальные данные для определения фрагментов твердого слоя топлива, которые могут иметь канавки, превышающие требования, но не идентифицирующиеся [19]. Для точной характеристики канавка должна быть определенных размеров и ориентации: общая длина канавки - около 2000 мкм, при этом длина канавки в средней плоскости капсулы - минимум 200 мкм, а ориентация канавки - под углом менее 45° к экватору капсулы (канавки, наблюдающиеся в эксперименте, в основном намного меньшей длины, поэтому точность их характеристики очень низкая). Одной канавки

с площадью поперечного сечения более 200 мкм^2 достаточно, чтобы ТСТ не удовлетворял требованиям, при этом длина и ориентация канавки могут быть такими, что часть ее пропускается даже с тремя взаимно перпендикулярными плоскостями рентгеновского наблюдения, поэтому РФК метод в таком случае неприменим для точной характеристики канавки. РФК метод используется для измерения СПМ возмущений поверхности и более гибок, чем ОТ метод, к нарушениям картины от канавок, но при этом большое количество канавок негативно влияет на измерения.

ОТ диагностика на установке OMEGA используется для измерения микрометрических дефектов, наблюдения зарождения и скорости роста кристалла (быстрый рост приводит к высокой плотности дефектов, например, границам зерен с малым углом разориентации) [84]. КМ вращается вокруг оси капилляра, которая перпендикулярна рентгеновской оси и для характеристики ТСТ с точностью $0,5 \text{ мкм}$ нужно, чтобы КМ была стабильна в пределах 1 мкм . Поэтому КМ, криостат, системы диагностики (оптика и рентген) жестко соединены для минимизации вибраций.

В работе [29] проведено сравнение ОТ метода и РФК метода на установке OMEGA. Для сравнения методов должно быть достаточно равномерное тепловое окружение, чтобы распределение низких мод было осесимметричным вдоль оси капилляра. В системе ОТ диагностики светодиодный источник работает на длине волны 630 нм . При низкой числовой апертуре объектива ($NA=0,2$) на ОТ изображении наблюдаются два кольца: ЯК (В-лучи с ПВО на границе твердое топливо-насыщенный пар со стороны твердого топлива), бледное кольцо (БК, U-лучи с частичным внутренним отражением на границе пар-ТСТ со стороны пара), как показано на рисунке 1.17. При высокой числовой апертуре наблюдается много колец, в результате получают избыточные моды, связанные с шумом. Анализ внутренней поверхности ТСТ выполняется по ЯК (наибольший сигнал) и по БК (меньше влияние капилляра на прохождение U-лучей). Основные выводы по результатам работы следующие. ОТ метод – хороший качественный метод для формирования слоя без дефектов, а также для идентификации возникающих дефектов. Количественная диагностика внутренней поверхности ТСТ при наличии кристаллических дефектов или изменяющейся толщины льда (например, около капилляра) некорректна, поскольку метод очень чувствителен к канавкам и недооценивает возмущения низких мод. Для этих целей лучше подходит РФК метод, т.к. он менее чувствителен к возмущениям внутренней поверхности ТСТ. Низкие моды лучше оценивать РФК методом, а для измерения высоких мод на РФК изображениях больше шума, чем на ОТ изображениях, т.к. меньше разрешение и динамический диапазон камеры. Приведены характеристики рентгеновского стенда: источник работает при ускоряющем

напряжении 60 кВ и токе 100 мкА, размер источника РИ 8 мкм, расстояние от капсулы до камеры 1140 мм, разрешение 1,6 мкм/пиксель.

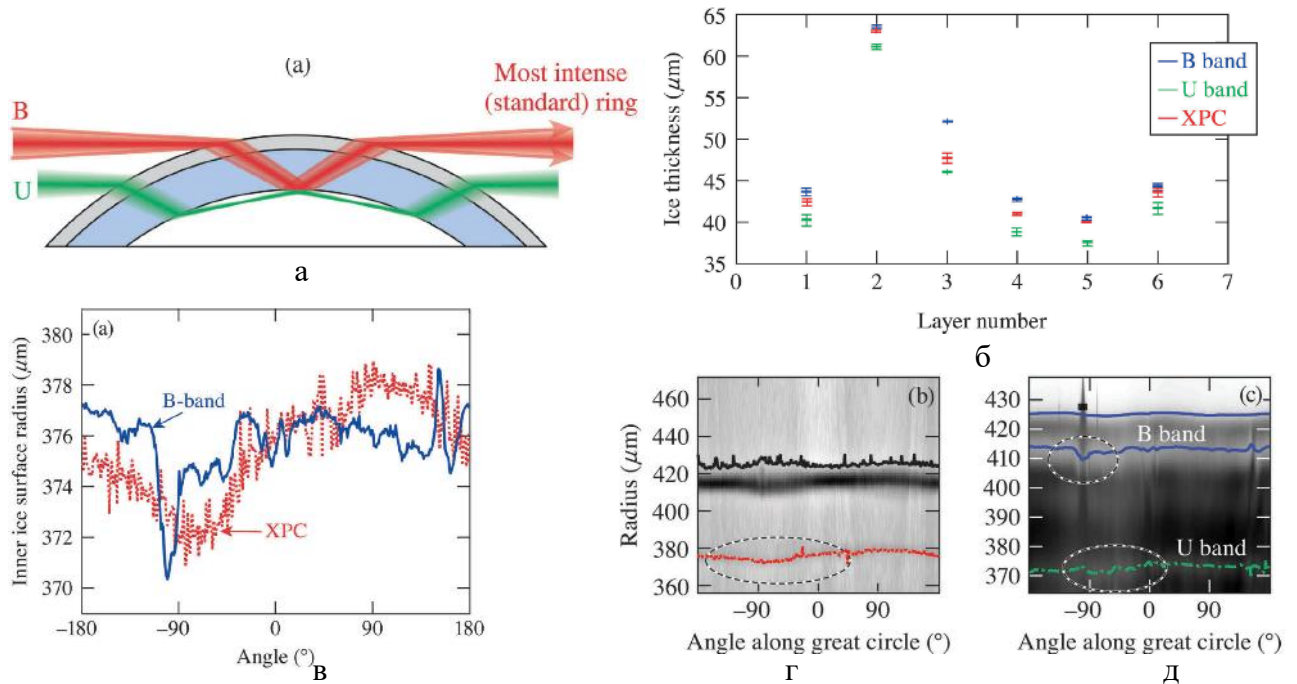


Рисунок 1.17 – Сравнение результатов диагностики с помощью ОТ и РФК методов.
 а) Траектории лучей, образующие кольца на ОТ изображении, б) средняя толщина ТСТ, измеренная тремя методами: по В-лучам и U-лучам (ОТ метод) и ХРС (РФК метод) для шести слоев (возмущения отдельных слоев усреднены). Сравнение результатов ОТ диагностики с РФК диагностикой и влияние капилляра (капилляр на -90°): в) по В-лучам и ХРС, г) РФК изображение, д) ОТ изображение [29]

В работах [85, 86] описаны ОТ и ОИ методы (установка LMJ). Мишень вращается, захватываются 50 изображений при разных положениях КМ. Разработан алгоритм 3D-реконструкции DT-слоя с использованием данных ОТ метода (360 точек из теневого изображения) и ОИ метода (11 точек на каждом из двух полюсов капсулы), как показано на рисунке 1.18. ОИ методом может быть измерена область поверхности ТСТ диаметром около 150 мкм (для капсулы диаметром 2,4 мм) на полюсах капсулы, через которые проходит оптическая ось [87]. Аналогичная схема описана в работе [20], но без вращения КМ.

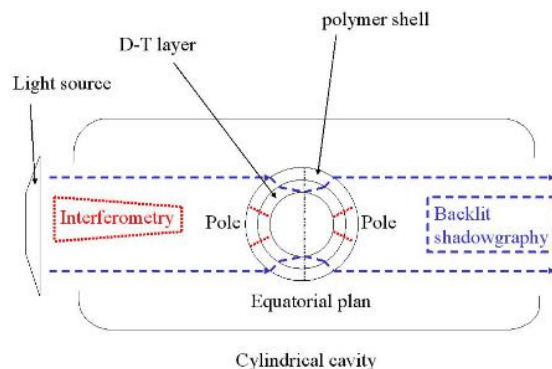


Рисунок 1.18 - Схема диагностики параметров КМ [86]

В работе [88] китайских исследователей описан разработанный итеративный алгоритм, основанный на разности оптических путей и отклонении лучей. Алгоритм позволяет сразу найти две неизвестных величины – показатель преломления (ОИ методом) и толщину (ОТ методом) ТСТ. Схемы измерения показаны на рисунке 1.19.

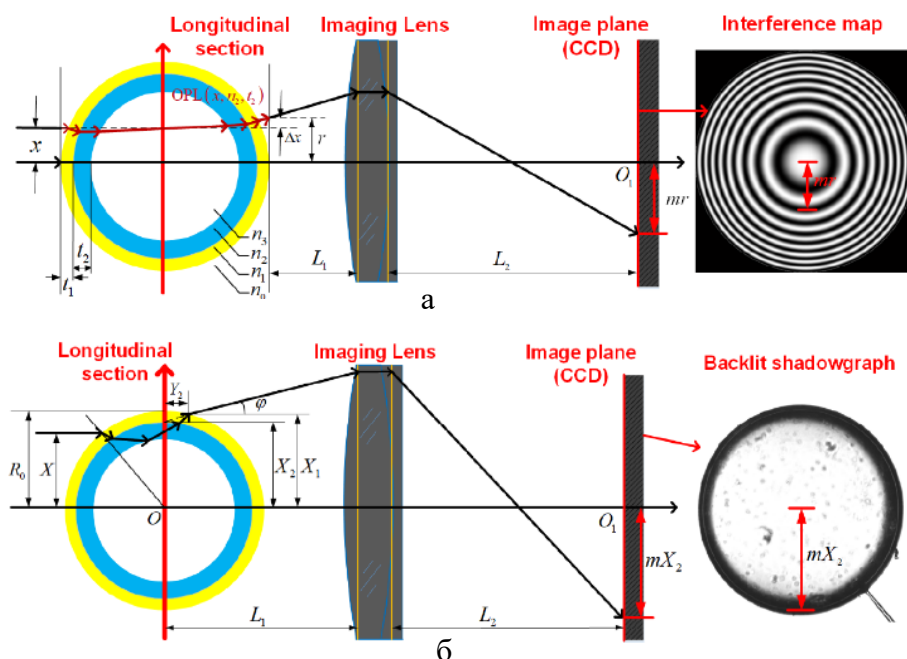


Рисунок 1.19 – Схемы измерения показателя преломления (а) и толщины ТСТ (б) [88]

1.3.5 Показатели преломления материалов криогенной мишени в видимом диапазоне

Проведен анализ научно-технической литературы с целью определения показателей преломления жидких и твердых изотопов водорода и материалов капсулы в видимом диапазоне. На рисунке 1.20, а представлены зависимости показателей преломления n для DT- и D₂-топлива в зависимости от температуры T на длине волны $\lambda=543$ нм [89]. Для твердого DT-топлива показатель преломления изменяется от $n=1,1628$ при $T=17,89$ К до $n=1,16$ при $T=19,40$ К; при температуре около тройной точки DT n резко падает до $n=1,1421$ при $T=19,68$ К и $n=1,1410$ при $T=19,72$ К. Для твердого D₂-топлива n также уменьшается с увеличением T : $n=1,1567$ при $T=16,80$ К (температура криомишени должна быть на 1,5 К ниже температуры тройной точки (18,73 К для D₂) перед ее отправкой в эксперимент по зажиганию для обеспечения нужной плотности насыщенного пара в центральной части КМ), $n=1,1564$ при $T=18,34$ К (температура немного ниже температуры тройной точки D₂), $n=1,1367$ при $T=18,80$ К. В работе [90] определен n для жидкого D₂. В работе [82] определены n на отдельных длинах волн (см. рисунок 1.20, б) и эта зависимость экстраполирована на весь видимый диапазон. На этом графике нанесены значения n при разных температурах на длине волны 543 нм,

упомянутые выше, а также $n=1,1382$ на 440 нм и $n=1,1353$ на 650 нм для твердых изотопов водорода [41]. На рисунке 1.20, в представлены значения n полимера на отдельных длинах волн при комнатной температуре [82], зависимость экстраполирована на видимый диапазон. Также отмечены n полистирола для длин волн 440 нм (1,6245) и 650 нм (1,5823) из работы [41].

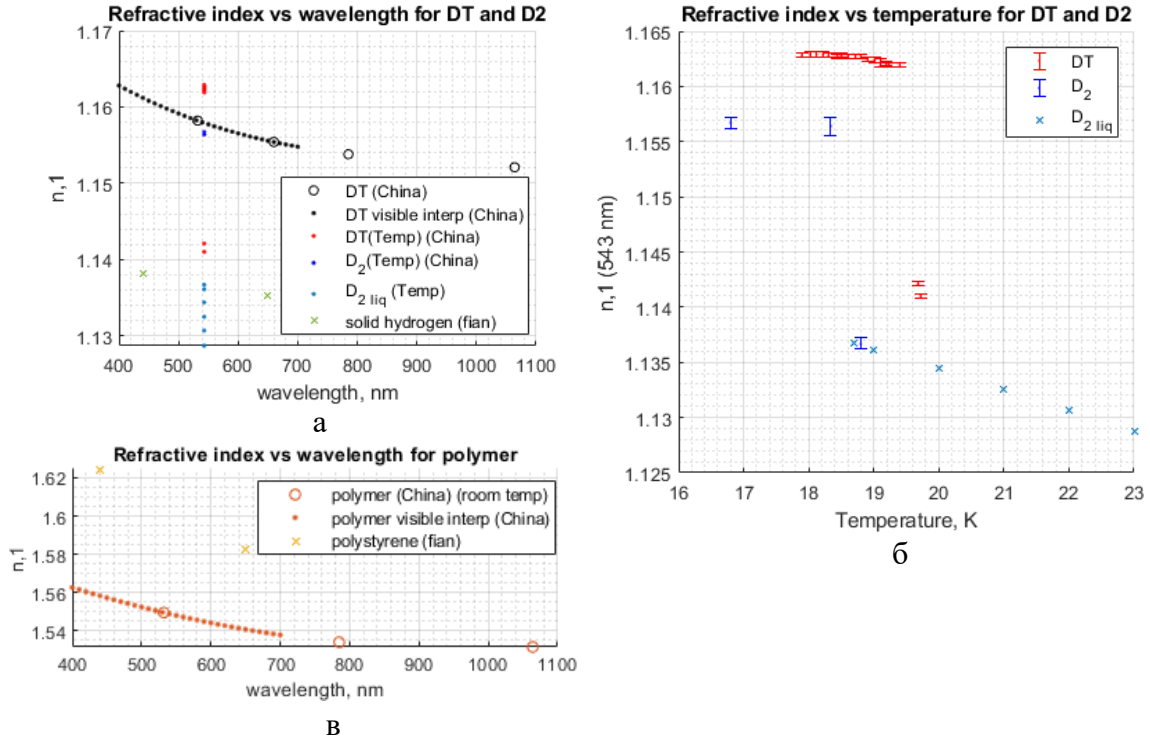


Рисунок 1.20 – Показатели преломления жидкого и твердого DT и D_2 , полистирола и полимера: а) Зависимость $n(T)$: красный цвет – для твердого и жидкого DT на $\lambda=543$ нм, синий цвет – для твердого и жидкого D_2 на $\lambda=543$ нм, голубой цвет – для жидкого D_2 ; б) зависимость $n(\lambda)$: черный цвет – для DT, красный – для DT при разных T , синий и голубой цвет – для D_2 при разных T , зеленый – изотопы водорода; в) зависимость $n(\lambda)$: оранжевый цвет – полимер при комнатной T , желтый цвет – полистирол [41, 82, 89, 90]

Таким образом, при диагностике параметров топлива по оптическому теневому изображению необходимо учитывать зависимость показателя преломления как от длины волны зондирующего излучения (n уменьшается при увеличении λ), так и от температуры изотопов водорода (n уменьшается при увеличении T).

1.4 Заключение по главе

По части измерения параметров капсул можно сделать следующие выводы. Контурный метод АСМ удовлетворяет требованиям к точности измерений, но метод позволяет измерять только внешнюю поверхность капсулы, к тому же время сканирования долгое и для измерения полной поверхности капсулы этот метод не подходит. С помощью остальных существующих методов контурных линий (ОТ, РФК, LDC) можно оценивать низкие моды внутренней поверхности. Однако, общим недостатком всех методов контурных линий является то, что

дефекты, которые находятся между двумя соседними контурными линиями, пропускаются, поэтому методы контурных линий не позволяют полностью характеризовать поверхность капсулы. С помощью широкопольных методов, включающих в себя микроскопию и интерферометрию, получается топография поверхности с определенной шириной поля зрения, поэтому дефекты в поле зрения определяются достаточно точно. Методы микроскопии, включающие в себя цифровую голографическую микроскопию, СЭМ и конфокальную микроскопию, дают хорошие результаты для определения дефектов внешней поверхности, но с помощью этих методов сложно точно определить дефекты внутренней поверхности через сферическую внешнюю поверхность. Методы дифракционной интерферометрии фазового сдвига и вертикальной сканирующей интерферометрии белого света не подходят для измерений шероховатых сферических поверхностей.

Поэтому наиболее оптимальным методом измерения параметров капсул является широкопольный метод конфокальной микроскопии, показывающий хороший результат как для гладких, так и для шероховатых поверхностей капсул. РФК метод является единственным неразрушающим методом измерения толщины стенки оптически непрозрачных капсул. Поэтому в качестве методов для измерения параметров капсул были выбраны данные два метода.

Для измерения элементов мишенного узла криогенной мишени и узла в целом будет использоваться метод оптической профилометрии, который позволит получать трехмерные модели элементов и их взаимное расположение в мишенном узле, в том числе расположение капсулы в боксе-конверторе, что позволит оценивать возможность заведения ЛИ в окна бокса-конвертора без попадания на капсулу, выполнять численное моделирование распространения ЛИ в боксе-конверторе и распространение РИ до поверхности капсулы с использованием реальных экспериментальных данных.

По части диагностики параметров ТСТ можно сказать следующее. Расположение КМ в криостате определяет доступные методы для диагностики параметров ТСТ в капсуле: ОТ, ОИ и РФК метод. ОИ метод позволяет выполнить измерение морфологии поверхностей оптически прозрачной капсулы и ТСТ при фокусировке на их передних (по отношению к интерферометру) поверхностях, но имеет очень малую область измерения - около 100 мкм на оптической оси, проходящей через центр капсулы. ОТ метод позволяет определить положение внутренней поверхности ТСТ вдоль всего экватора оптически прозрачной капсулы при фокусировке объектива на экватор. Также метод позволяет осуществлять непрерывное наблюдение наполнения капсулы жидким топливом, начало и весь процесс кристаллизации топлива (что важно при выращивании монокристаллического слоя топлива для удовлетворения предъявляемым к ТСТ требованиям), формирование ТСТ вплоть до

окончания эксперимента. РФК метод позволяет определить положение внутренней поверхности ТСТ вдоль всего экватора как оптически прозрачной, так и непрозрачной капсулы, наблюдать часть дефектов ТСТ, при этом в центральной части капсулы видимость дефектов очень низкая. При этом захват РФК изображений возможен один раз в несколько минут при выключенном компрессоре криостата для исключения размытия изображения во время длительной экспозиции вследствие вибраций компрессора, передаваемых на криостат.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ в настоящее время отработка технологии получения КМ проводится на двух стендах для исследования мишеней при низких температурах. На одном стенде возможна работа с дейтерием (D_2), что подразумевает собой формирование твердого слоя D_2 в капсуле с помощью воздействия на него ИК-излучения (имитация тепловыделения при бета-распаде в DT-слое). Соответственно, капсула должна быть прозрачна для длины волны применяемого ИК-излучения (3,16 мкм – максимум поглощения D_2), чем и определяется ее материал: ПАМС, ПС или СН. Кроме этого, на данном стенде невозможна РФК диагностика в связи с требованиями к размещению источника РИ в специально предназначенном для этого помещении. Поэтому на данном стенде возможно применять только оптические методы диагностики. Конструкция бокса-конвертера предполагает две взаимно перпендикулярные пары диагностических окон, поэтому криостат также имеет две взаимно перпендикулярные пары окон, позволяющие наблюдать капсулу с топливом в боксе-конвертере. Наблюдение с помощью ОТ метода с использованием двух взаимно ортогональных оптических осей при фокусировке на экваторах капсулы позволит оценить параметры внутренней поверхности твердого топлива в двух взаимно перпендикулярных пересекающихся плоскостях. При этом область измерения ОТ метода будет включать в себя и область измерения ОИ метода, поэтому для наблюдения за топливом в оптически прозрачных капсулах был выбран ОТ метод.

Второй стенд для исследования мишеней при низких температурах находится в перчаточном боксе, предназначенном для работы с тритием. На стенде возможно использование РФК диагностики по одной оси наблюдения. Поскольку имеется один источник РИ, по другой оси возможна только ОТ диагностика. Соответственно, на данном стенде возможна работа с криомишенями с оптически прозрачными капсулами с D_2 или DT топливом, а также работа с непрозрачными капсулами с DT топливом. Поэтому для диагностики параметров топлива в капсуле будут использоваться ОТ и РФК методы с использованием двух ортогональных осей наблюдения, что определяется конструкцией мишенного узла.

Глава 2. Измерение параметров мишенного узла криогенной мишени

2.1 Капсула

2.1.1 Широкопольный метод конфокальной микроскопии

Метод конфокальной микроскопии основан на размещении в плоскости измерения апертуры, дающей возможность получения максимального контраста изображения при нахождении измеряемого участка поверхности в фокусе объектива. При вертикальном сканировании все точки поверхности поочередно проходят через фокус. По последовательности полученных картин определяются изменения интенсивности в каждой точке как функции расстояния. Вычисляется положение максимума интенсивности для каждой точки матрицы камеры и восстанавливается форма поверхности. Метод используется для измерений шероховатости как гладких, так и грубых поверхностей. При этом обеспечивается самое высокое разрешение по плоскости, которое можно достичь при использовании оптического профилометра (всего в используемом для измерения параметров капсул оптическом профилометре №1 три принципа измерения: конфокальная микроскопия, интерферометрия, «focus variation»), а также повторяемость по вертикали в нанометровом диапазоне.

На базе оптического профилометра №1 разработана и реализована конструкция стенда для измерения параметров капсул. Схема стенда представлена на рисунке 2.1. Стенд состоит из основного трехкоординатного манипулятора 1 для сканирования экваториального пояса капсулы 3, вспомогательного шестикоординатного манипулятора 2 для переориентации капсулы, системы управления моторизированными позиционерами, вакуумной системы 4 и оптического профилометра с объективом 5 для конфокального сканирования поверхности капсулы. Оба манипулятора включают в себя вакуумные пинцеты 6 для посадки капсулы, моторизированные вращательные платформы 7, двухосевые ручные позиционеры 8 для юстировки соосности вакуумного пинцета и оси вращения ротатора, заклонные столики 9 для корректировки наклона оси вакуумного пинцета относительно оси вращения ротатора. Моторизованная вращательная платформа на основном трехкоординатном манипуляторе 1 предназначена для вращения капсулы от 0 до 360° с целью сканирования поверхности капсулы вдоль всего экватора. Моторизованная вращательная платформа на вспомогательном шестикоординатном манипуляторе 2 предназначена для переориентации (поворота на угол) капсулы с целью съемки топографий со следующего экватора. Манипулятор 2 снабжен также трехосевой системой моторизированных линейных позиционеров 10 для аккуратного и

точного подведения манипулятора к капсуле, при этом по причине своих массогабаритных параметров он развязан от виброгасящего столика оптического профилометра 11 с помощью столика 12.

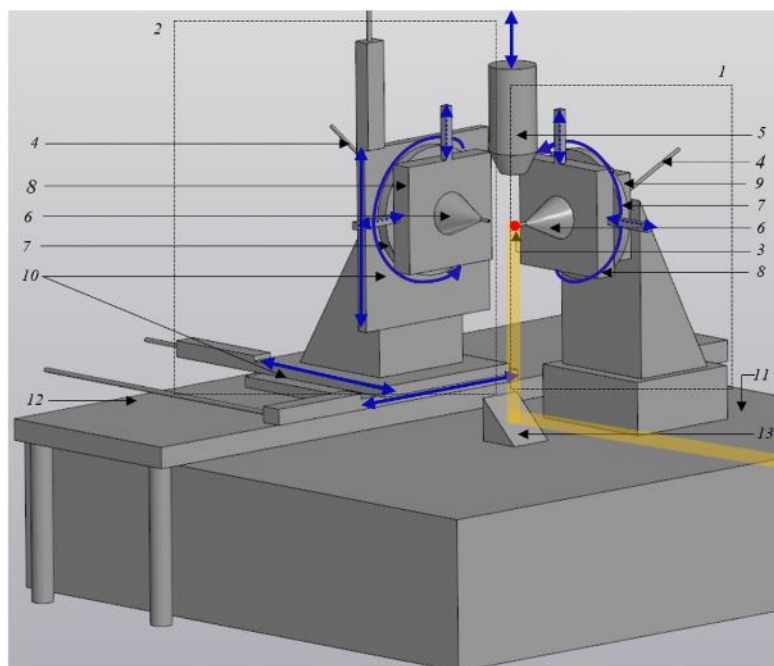


Рисунок 2.1 – Схема экспериментального стенда измерения параметров капсул:
 1 – основной трехкоординатный манипулятор, 2 – вспомогательный шестикоординатный манипулятор, 3 – капсула диаметром ≈ 2 мм, 4 – выход к вакуумной системе, 5 – объектив оптического профилометра, 6 – вакуумные пинцеты, 7 – моторизированные вращательные платформы, 8 – двухосевые ручные позиционеры, 9 – заклонный столик, 10 – трехосевая система моторизированных позиционеров, 11 – виброгасящий стол оптического профилометра, 12 – развязывающий оптический столик, 13 – поворотное зеркало

Для сканирования поверхности используется конфокальный объектив 50X оптического профилометра со следующими характеристиками: апертура $NA=0,8$, рабочее расстояние $WD=1$ мм, разрешение по вертикали 3 нм. Половина дифракционного предела в соответствии с критерием Релея составляет 0,17 мкм на длине волны 460 нм. Размер кадра составляет 338×283 мкм (1224×1024 пикселей), размер пикселя - 0,28 мкм. Максимальный наклон сканируемой гладкой поверхности составляет 42° . Воспроизводимость (среднеквадратическая погрешность) и точность измерения высоты ступеньки составляют 0,1% и 0,5% соответственно.

Вакуумные пинцеты манипуляторов расположены на одном уровне в горизонтальной плоскости, сканируется верхняя часть капсулы размером 338×273 мкм. Результат одного сканирования представлен на рисунке 2.2 и содержит в себе топографию внешней поверхности капсулы, а также топографию внутренней поверхности и карту толщины стенки в случае, если капсула оптически прозрачная (координаты внутренней поверхности и толщина

вычисляются ПО профилометра с учетом известного показателя преломления материала капсулы). Стенка получаемых в настоящее время ПАМС капсул содержит в себе множество пузырьков воздуха, образующихся при изготовлении капсул по технологии микрокапсулирования: в синтезируемом полимере присутствуют неорганические примеси, вокруг которых собирается вода, которая при сушке капсулы удаляется, и на ее месте в стенке остаются пустые области. Поэтому на топографиях их внутренней поверхности присутствуют неизмеренные области (черные области – артефакты на рисунке 2.2).

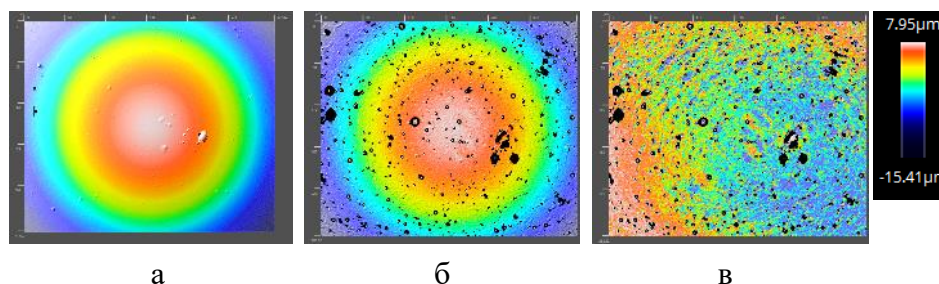


Рисунок 2.2 – Результат одного сканирования области оптически прозрачной ПАМС капсулы №1 (диаметр (2128 ± 1) мкм) размером 338×273 мкм: а) внешняя поверхность, б) внутренняя поверхность, в) толщина стенки

На одном экваторе сканируется набор из 72 топографий с угловым шагом 5° (область перекрытия в этом случае составляет более 70%). Для автоматизации сбора топографий внутри экватора на языке Java был разработан таймер для автоматического поворота капсулы на 5° между двумя последовательными сканированиями, при этом захват топографий внутри экватора выполняется также в автоматическом режиме и синхронизирован с таймером.

После сканирования одного экватора оператором с помощью вспомогательного манипулятора 2 осуществляется переориентация капсулы при меньшем увеличении (10X) и включенной нижней подсветке, направленной от светодиодного источника через капсулу в объектив с помощью поворотного зеркала 13. Всего по поверхности капсулы сканируется 18 экваторов с угловым шагом 10° , что обеспечивает достаточное перекрытие экваторов между собой для последующей сшивки. В итоге набор экспериментальных данных с одной капсулы состоит из 1296 файлов, каждый из которых включает в себя топографии внешней и внутренней поверхностей и толщину стенки. Преобразование такого большого пакета файлов из формата ПО профилометра в текстовый формат, содержащий координаты точек области поверхности в системе координат профилометра, было автоматизировано написанной на языке Java программой, с присвоением каждому файлу имени, содержащим информацию об угле, на котором был снят данный экватор, и об угле, на котором была снята топография внутри экватора.

Для автоматизации сшивки топографий поверхности капсулы, полученных с одного экватора, разработана программа на языке C#. По всем топографиям экватора вычисляются

параметры сферы, на которую потом выполняется раскладка топографий. Координаты каждой топографии из системы координат профилометра преобразуются в систему координат вычисленной сферы, с учетом поворота капсулы на 5° . Раскладка по сфере двух соседних кадров с экватора, снятого в угловом положении 0° , представлена на рисунке 2.3.

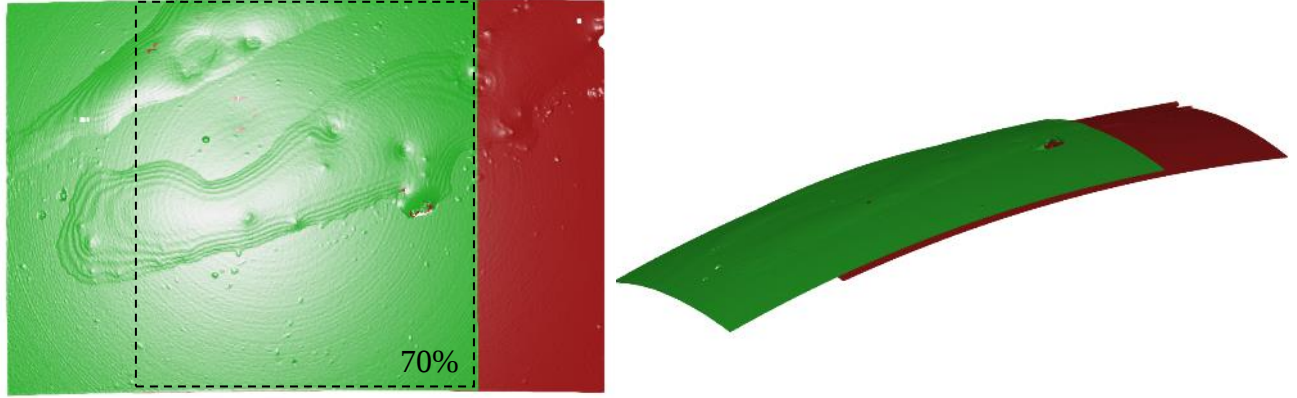


Рисунок 2.3 – Раскладка по сфере двух соседних кадров с экватора с обозначенной областью перекрытия, вид с разных ракурсов

Видно, что между кадрами есть зазор, который вызван несовершенством узла вращения капсулы, поэтому для их сшивки между собой необходимо сдвинуть второй кадр до максимального совпадения кадров в области перекрытия, обозначенной на рисунке 2.3. Для решения данной задачи используется преобразование координат второго кадра $\vec{r}_{2i} = (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ с помощью матрицы переноса и матриц поворотов по часовой стрелке в трехмерной правосторонней декартовой системе координат [91]. Комбинированная матрица преобразований координат будет выглядеть следующим образом (2.1):

$$\begin{pmatrix} \cos(\gamma)\cos(\alpha) & -\cos(\gamma)\sin(\alpha) & \sin(\gamma) & a \\ \sin(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha) + \cos(\beta)\sin(\alpha) & -\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) + \cos(\beta)\cos(\alpha) & -\sin(\beta)\cos(\gamma) & b \\ -\cos(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha) + \sin(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta)\sin(\gamma)\sin(\alpha) + \sin(\beta)\cos(\alpha) & \cos(\beta)\cos(\gamma) & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1),$$

где β – поворот вокруг оси Ox , γ – вокруг оси Oy , α – вокруг оси Oz , a – смещение вдоль оси Ox , b – вдоль оси Oy , c – вдоль оси Oz . При условии малых углов поворота косинус угла принимается равным единице, а синус угла равным самому углу. Тогда преобразование координат точек второго кадра из $\vec{r}_{2i} = (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i})$ в $\vec{r}'_{2i} = (x'_{2i}, y'_{2i}, z'_{2i})$ выглядит как (2.2):

$$\begin{pmatrix} 1 & -\alpha & \gamma & a \\ \beta\gamma + \alpha & -\beta\gamma\alpha + 1 & -\beta & b \\ -\gamma + \beta\alpha & \gamma\alpha + \beta & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{2i} \\ y_{2i} \\ z_{2i} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_{2i} \\ y'_{2i} \\ z'_{2i} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.2).$$

Поскольку величины углов поворота малы, их произведениями в уравнении (2.2) можно пренебречь и новые координаты точек второго кадра описываются уравнениями (2.3):

$$\begin{cases} x'_{2i} = x_{2i} + a - y_{2i}\alpha + z_{2i}\gamma \\ y'_{2i} = y_{2i} + b + x_{2i}\alpha - z_{2i}\beta \\ z'_{2i} = z_{2i} + c - x_{2i}\gamma + y_{2i}\beta \end{cases} \quad (2.3).$$

Для совмещения двух кадров функция среднеквадратичного отклонения между ними равна (2.4) и должна быть минимальна [92]:

$$F = \frac{\sum_{i=0}^N (\overrightarrow{r_{1i}} - \overrightarrow{r'_{2i}})^2}{N} \approx \frac{\sum_{i=0}^N ((\Delta x_i - a + y_i \alpha - z_i \gamma)^2 + (\Delta y_i - b - x_i \alpha + z_i \beta)^2 + (\Delta z_i - c + x_i \gamma - y_i \beta)^2)}{N} \quad (2.4),$$

где $\Delta x_i = x_{1i} - x_{2i}$, $\Delta y_i = y_{1i} - y_{2i}$, $\Delta z_i = z_{1i} - z_{2i}$, N – число точек в области перекрытия кадров. Из условия минимума функции (2.4) находятся частные производные по шести переменным $a, b, c, \beta, \gamma, \alpha$ и приравниваются к нулю. В результате получаются шесть уравнений с шестью неизвестными $a, b, c, \beta, \gamma, \alpha$ (2.5):

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{2i} & -y_{2i} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{2i} & 0 & x_{2i} \\ 0 & 0 & 1 & y_{2i} & -x_{2i} & 0 \\ 0 & -z_{2i} & y_{2i} & y_{2i}^2 + z_{2i}^2 & -x_{2i}y_{2i} & -x_{2i}z_{2i} \\ z_{2i} & 0 & -x_{2i} & -x_{2i}y_{2i} & x_{2i}^2 + z_{2i}^2 & -y_{2i}z_{2i} \\ -y_{2i} & x_{2i} & 0 & -x_{2i}z_{2i} & -y_{2i}z_{2i} & x_{2i}^2 + y_{2i}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ \beta \\ \gamma \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ \Delta z_i y_{2i} - \Delta y_i z_{2i} \\ \Delta y_i x_{2i} - \Delta x_i y_{2i} \\ \Delta x_i z_{2i} - \Delta z_i x_{2i} \end{pmatrix} \quad (2.5).$$

Сшитые в соответствии с данным алгоритмом кадры представлены на рисунке 2.4, а. Полный сшитый экватор, снятый в угловом положении 0° , представлен на рисунке 2.4, б. Далее выполняется анализ поверхности по сшитым экваторам.

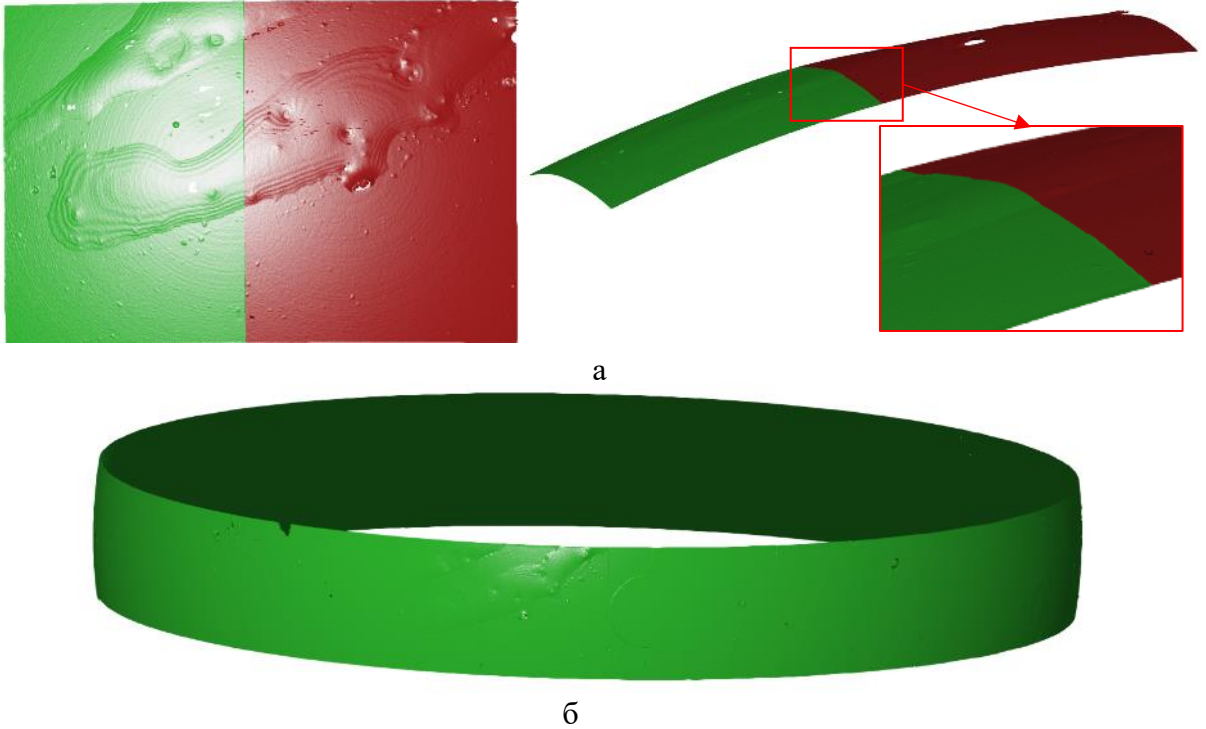


Рисунок 2.4 – а) Два последовательных сшитых кадра, вид с разных ракурсов, б) сшитый экватор, снятый в угловом положении 0°

Требования к поверхностям капсул и твердого слоя топлива криогенной мишени NIF сформулированы в виде одномерного СПМ возмущений поверхности для экваториальных

профилей поверхности (см. рисунок 2 во введении), поэтому далее вычисляется СПМ возмущений поверхности.

В двумерном случае в полярной системе координат радиус возмущенной поверхности r в зависимости от полярного угла φ задается выражением (2.6):

$$r = R + \sum_{n=1}^N (A_n \cos(n\varphi) + B_n \sin(n\varphi)) \quad (2.6),$$

где R – радиус окружности, на которой задаются возмущения, n – номер моды, A_n и B_n – амплитуды n -й моды. На рисунке 2.5 представлены примеры возмущения окружности радиуса $R_0 = 1$ в некоторых модах в плоскости, проходящей через центр сферы (на экваторе).

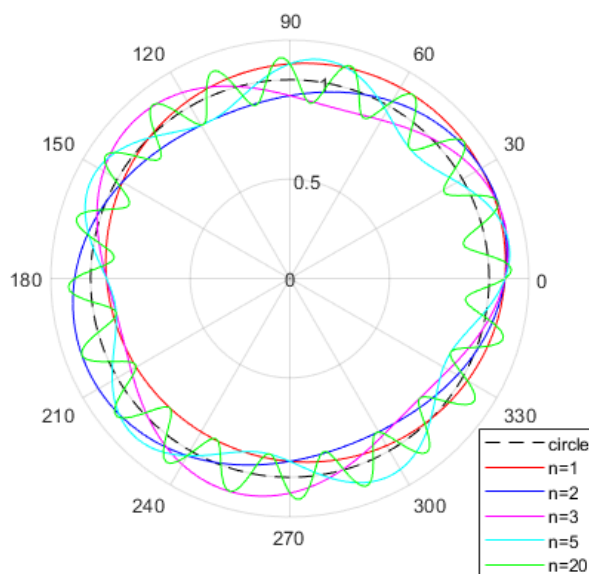


Рисунок 2.5 – Примеры возмущений различных порядков в двумерном случае: чёрная штриховая линия – идеальная окружность радиуса $R_0 = 1$, n – номера мод возмущений окружности, амплитуда возмущений 0,08

В ГОСТ Р 8.7002010 [93] дано определение функции спектральной плотности мощности (спектра пространственных мод возмущений поверхности): «Функция спектральной плотности мощности поверхности твердого тела: Функция, равная квадрату модуля Фурье преобразования функции неровностей поверхности твердого тела. Примечание — Функция спектральной плотности мощности поверхности твердого тела несет в себе полную статистическую информацию о распределении высот неровностей на поверхности по их линейным размерам». Для получения одномерного СПМ поверхности на экваторе вычисляется профиль поверхности $dR = R - R_{mean}$, где R – вектор, содержащий значения распределенных по углу локальных радиусов поверхности, а R_{mean} – его среднее значение. В результате быстрого преобразования Фурье вектора dR получается одномерный спектр СПМ, который представляет собой отношение между модами (частотами флуктуаций поверхности) и их квадратами амплитуд: $P_{1D}(n) = A^2(n)$.

Для сечений отдельных сшитых экваторов, вычисляются одномерные СПМ $P_{1D}(n)$ в модах от $n=2$ до $n=1000$. Мода $n=1$ не определяется, т.к. это неконцентричность и она должна вычисляться относительно внутренней поверхности капсулы, соответственно требованиям NIF. Дефекты, не попавшие на сечения, не отражаются на СПМ. Результат для отдельных экваторов представлен на рисунке 2.6. Видно, что внешняя поверхность данной капсулы не удовлетворяет требованиям NIF. Амплитуды одномерных мод n представлены на рисунке 2.7. Как видно, амплитуда моды $n=2$ (несферичность поверхности) находится в пределах от 240 нм до 2 мкм (при требовании NIF до 200 нм), амплитуды остальных мод низких порядков, от $n=3$ до $n=20$, не превышают 900 нм, амплитуды мод средних порядков от $n=21$ до $n=250$ не превышают 120 нм, амплитуды мод высоких порядков от $n=251$ до $n=1000$ не превышают 10 нм (шероховатость). Моды с амплитудой менее 3 нм не разрешимы, что определяется вертикальным разрешением используемого при сканировании объектива (на СПМ это соответствует 9 нм^2). Несферичность внешней поверхности данной капсулы составляет $\Delta sph = \frac{d_{max}-d_{min}}{d_{mean}} \cdot 100\% = 0,1\%$ [94].

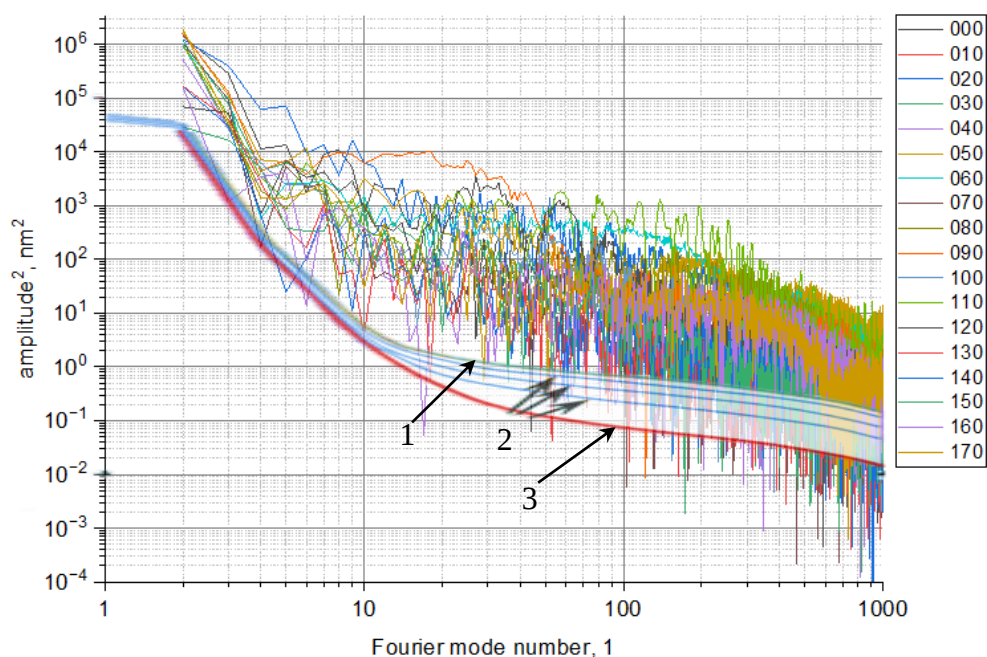


Рисунок 2.6 – $\overline{P_{1D}(n)}$ внешней поверхности капсулы №1, вычисленные по отдельным экваториальным профилям (000, 010, ..., 170 – углы, на которых сканировались экваторы). На графике приведены требования NIF, предъявляемые к поверхностям капсулы: 1 – к внешней, 2 – к 1-й – 3-й внутренним, 3 – к внутренней

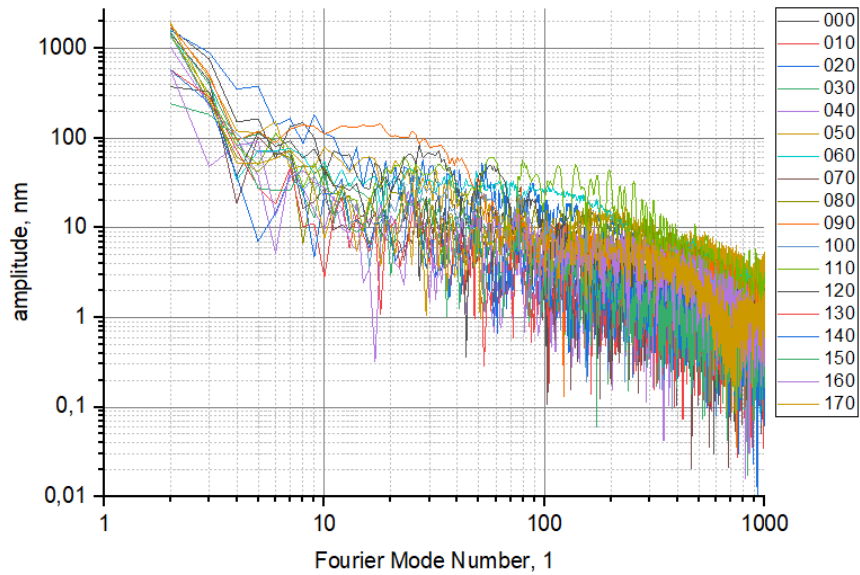


Рисунок 2.7 – Амплитуда одномерных мод n внешней поверхности капсулы №1, вычисленные по отдельным экваторам, полученным методом конфокальной микроскопии

Одномерные СПМ возмущений поверхности $P_{1D}(n)$ для всех экваторов усредняются в двумерный спектр по всей поверхности [47, 95]. Двумерный спектр более информативен для характеристики полной поверхности капсулы, количественно отражает информацию о частотном распределении возмущений по всей поверхности и используется для численного моделирования роста неустойчивостей: низкие моды возмущений приводят к снижению степени сжатия, а высокие моды - вызывают развитие турбулентного перемешивания на поверхностях раздела сред при сжатии. Двумерный спектр (2.7) характеризует вклад каждой моды l в общую дисперсию [95]:

$$P_{2D}(l) = \frac{2l+1}{4\pi} |R_{l,m}|^2 \quad (2.7),$$

где $R_{l,m}$ – коэффициенты сферических гармоник. Возмущения принято считать изотропно распределенными по поверхности.

Двумерный спектр $P_{2D}(l)$ может быть вычислен из одномерных спектров $P_{1D}(n)$, полученных для k плоскостей на экваторах поверхности, равномерно распределенных в пространстве, с помощью уравнения (2.8) [95]:

$$P_{2D}(l) = (l + \frac{1}{2}) \sum_{n=l, l+2, l+4, \dots}^{\infty} [\overline{P_{1D}(n)} - \overline{P_{1D}(n+2)}] \frac{(n+l)!!(n-l-1)!!}{(n+l+1)!!(n-l)!!} \quad (2.8),$$

где $\overline{P_{1D}(n)}$ – усредненный по k анализируемым экваторам одномерный спектр, полученный усреднением значения квадрата амплитуды для каждой одномерной моды n для k разных экваторов (формула (2.9)):

$$\overline{P_{1D}(n)} = \frac{\sum_{i=1}^k P_{1D,i}(n)}{k} \quad (2.9).$$

Амплитуда двумерной моды l определяется как $A_{2D}(l) = \sqrt{P_{2D}(l)}$. Двумерный СПМ $P_{2D}(l)$ внешней поверхности капсулы №1 представлен на рисунке 2.8.

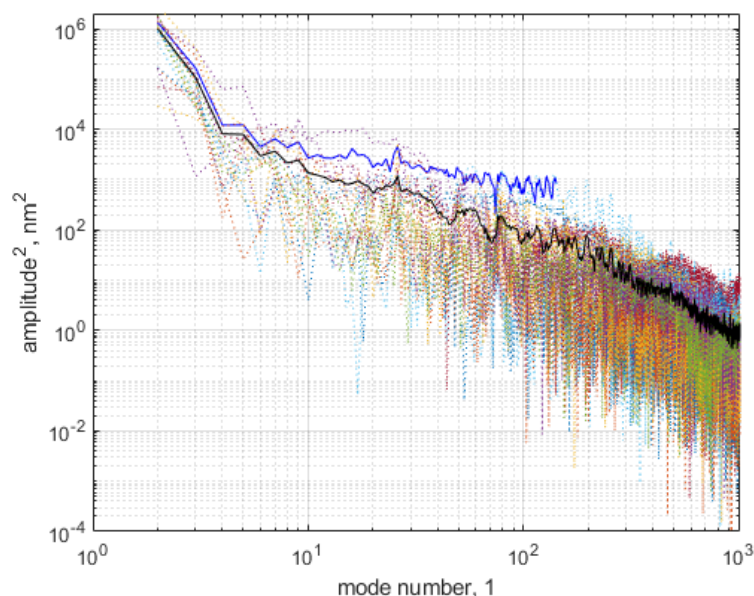
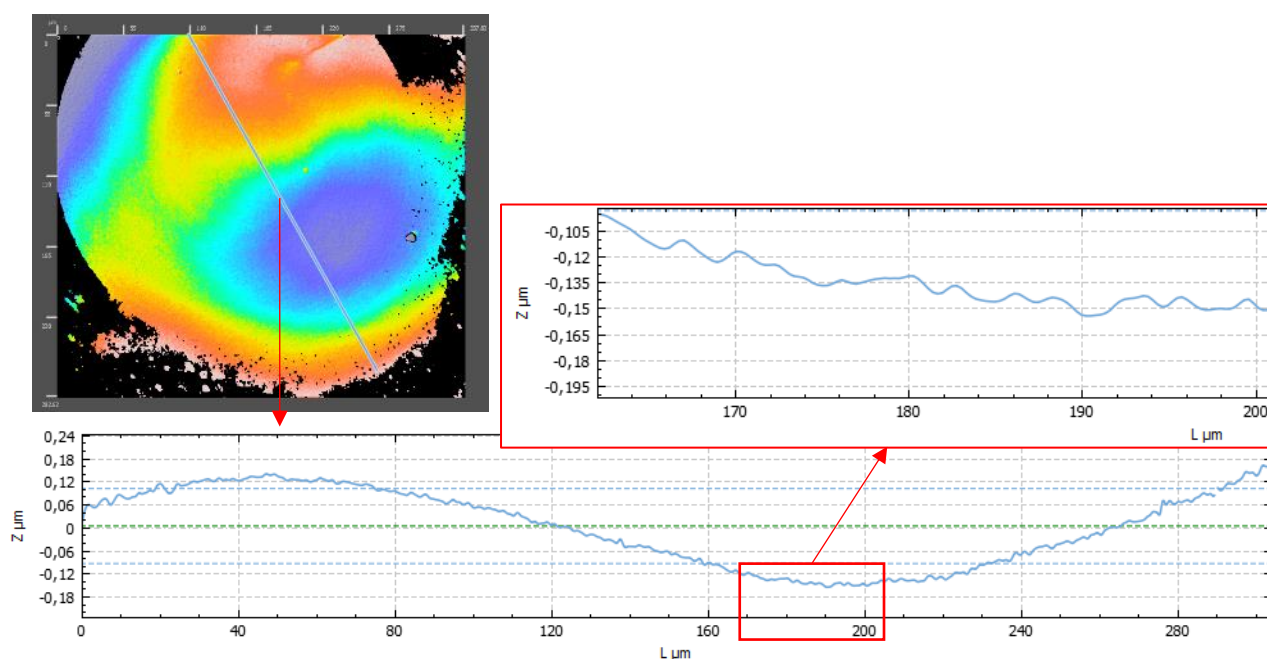


Рисунок 2.8 – $P_{2D}(l)$ капсулы №1. Синий цвет - $P_{2D}(l)$, черный цвет - усредненный по k анализируемым экваторам $\overline{P_{1D}(n)}$, точечные линии - $P_{1D}(n)$ для экваториальных профилей

Для аналогичной оценки качества внутренней поверхности капсулы ее внешняя поверхность должна быть лучше и стенка капсулы не должна содержать в себе пузырьков, которые приводят к большому количеству артефактов и неизмеренных областей при сканировании внутренней поверхности через внешнюю, как видно на рисунке 2.2, б. Типичная внутренняя поверхность ПАМС капсул с вычтенной сферической составляющей (т.е. отображено отклонение от идеальной аппроксимирующей сферы) приведена на рисунке 2.9. Топография получена после раскалывания капсулы №2 (разрушающий метод). Отклонения от сферической формы находятся в пределах 140 нм, присутствуют возмущения амплитудой в несколько нм и пространственным размером несколько мкм (для точного определения порядка возмущений в терминах мод необходим анализ целого экватора, что невозможно сделать по сегменту капсулы).



б

Рисунок 2.9 – Типичная внутренняя поверхность ПАМС капсулы: а) топография части внутренней поверхности ПАМС капсулы №2 с вычтенной сферической составляющей, полученная разрушающим методом, б) профиль – отклонение поверхности от идеальной сферы

В случае, если капсула изготавливается на сферической матрице-подложке (например, осаждение Ве слоя на подложку методом напыления, получение НДС слоя на подложке в виде кремниевого шарика методом плазмохимического осаждения, где подложка затем вытравливается), предварительно может быть измерена внешняя поверхность подложки, при этом внутренняя поверхность сформированной капсулы, как правило, будет повторять внешнюю поверхность подложки [12].

Для сравнения на рисунке 2.10, а представлено изображение внутренней поверхности СН капсулы №3, снятое через внешнюю поверхность: стенка капсулы вследствие другой технологии изготовления (СН слой получается методом плазмохимического осаждения) не содержит в себе пузырьков, и внутренняя поверхность наблюдается намного лучше. Однако, в таких капсулах пока присутствуют дефекты в виде выпуклостей на внешней поверхности («апельсиновой корки»), которые также приводят к артефактам на просканированной внутренней поверхности. Модовый анализ внутренней поверхности таких капсул, а также эксперименты по формированию в них слоя топлива планируются после улучшения качества внешней поверхности и наращивания толщины их стенки (интерес представляет формирование слоя топлива в капсулах с толщиной стенки более 100 мкм). ОТ изображение этой капсулы с фокусом на экватор и с фокусом на внешнюю поверхность представлено на рисунке 2.10, б, в.

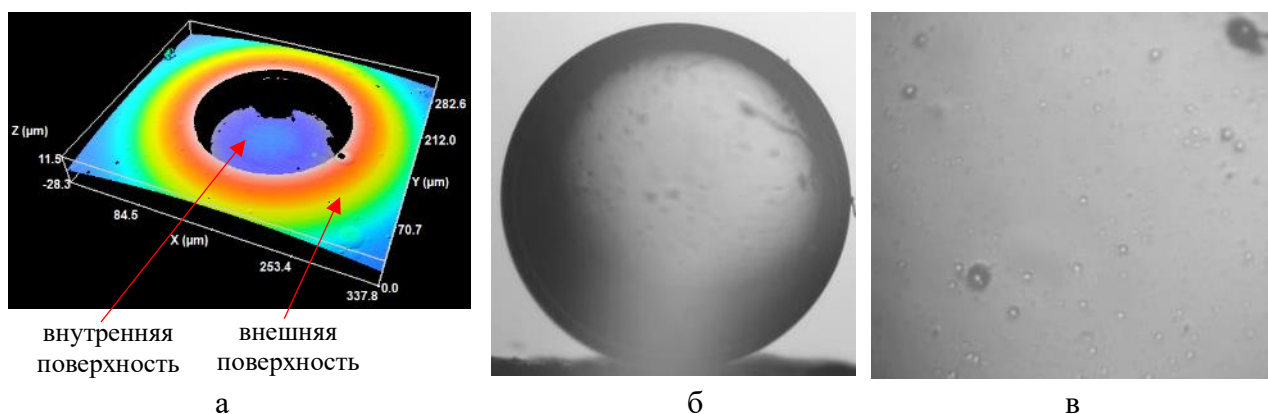


Рисунок 2.10 – Капсула №3 (СН), стенка которой не содержит пузырьков (толщина стенки ≈ 61 мкм). а) Наблюдение внутренней поверхности через внешнюю поверхность. ОТ изображения: б) с фокусом на экватор, в) увеличенная область с фокусом на внешнюю поверхность

Сшитые по наборам конфокальных топографий экваторы собираются между собой в трехмерную карту поверхности капсулы, по которой можно оценивать пространственное положение дефектов и их геометрические параметры, как показано на рисунке 2.11. Эта визуализация полезна при проведении эксперимента по формированию твердого слоя топлива (ТСТ) в капсуле: дефекты ТСТ могут быть вызваны дефектами поверхностей капсулы. Кроме того, дефекты капсулы в основном являются центрами кристаллизации в жидком топливе при выращивании монокристаллического ТСТ. Также при диагностике параметров ТСТ в капсуле дефект, идентифицируемый по характеристическим особенностям на ОТ изображении капсулы с топливом, может напрямую коррелировать с дефектом капсулы, даже если ТСТ в данной области не имеет дефекта. Положение и размеры локальных дефектов, как на поверхности, так и в объеме капсулы также используются для объяснения результатов экспериментов по сжатию КМ (развитие неустойчивостей на дефектах, появление нелинейных струй и т.д.) [96, 97].

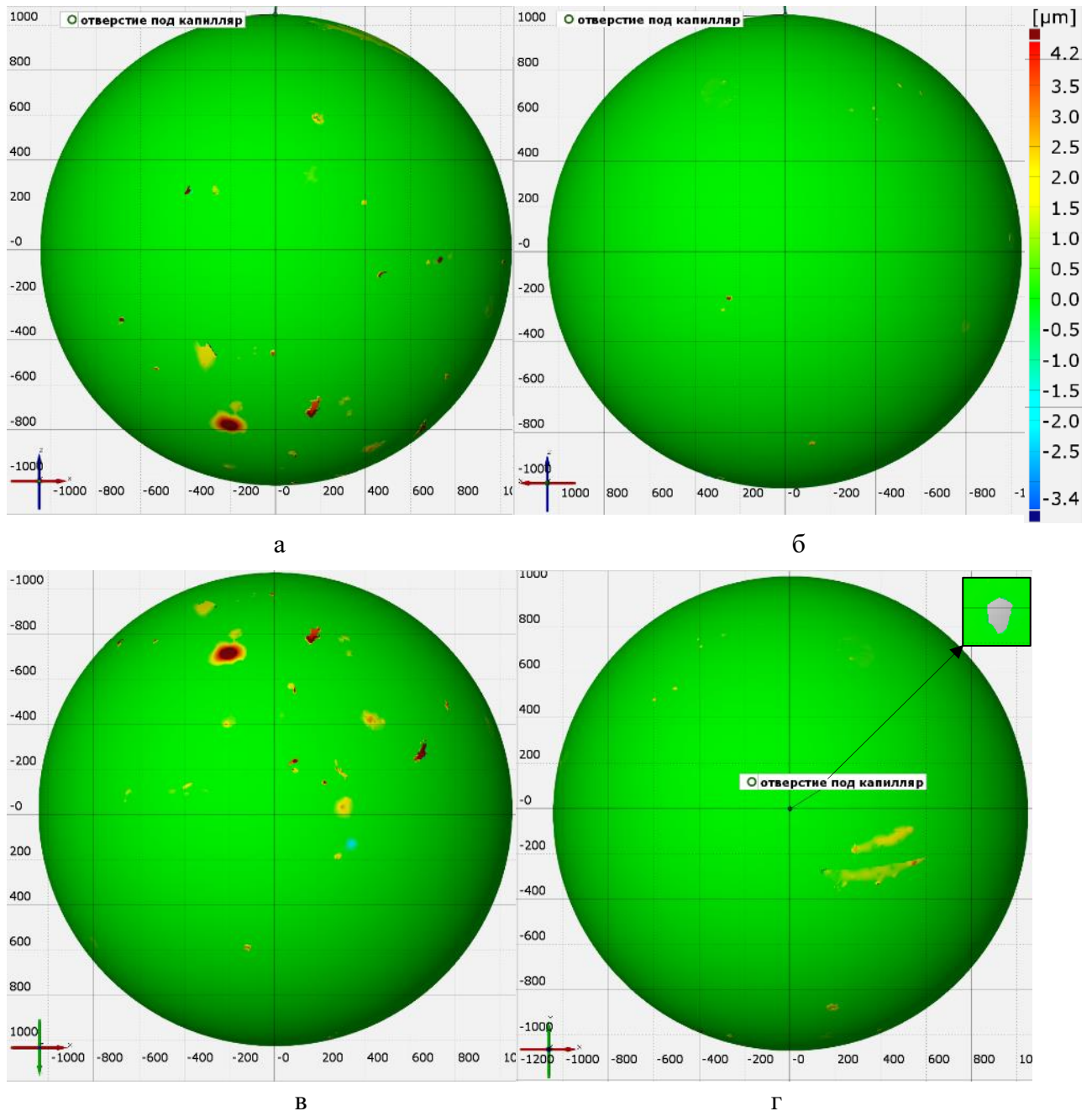


Рисунок 2.11 – Карта дефектов внешней поверхности капсулы №1: а) и б) вид с двух противоположных сторон, в) вид снизу, г) вид сверху, по нормали к отверстию под капилляр. На карте видны дефекты размером более 1 мкм, цветом обозначена высота дефектов

На рисунке 2.12 представлено отверстие, выполненное лазером в капсуле №1 для вклейки капилляра с целью наполнения ее изотопами водорода в эксперименте по формированию твердого слоя топлива в капсуле. Максимальный линейный размер поврежденной при сверлении лазером области на внешней поверхности ≈ 54 мкм. Оптический профилометр имеет ограничения на сканирование наклонных поверхностей, поскольку отраженное от поверхности с большим наклоном излучение не будет попадать в объектив профилометра, что, соответственно, накладывает ограничения при сканировании

конусообразных отверстий, поэтому относительно проходного (для капилляра) сечения отверстия можно лишь утверждать, что оно не превышает ≈ 22 мкм. Поэтому проходное сечение отверстия определяется на микроскопе, составляет в данном случае (14 ± 1) мкм и определяет диаметр подбираемого капилляра с целью минимизации количества клея при сборке (клей оказывает влияние на распределение температур в капсуле и, соответственно, на положение стабильной внутренней поверхности ТСТ, определяющуюся изотермой).

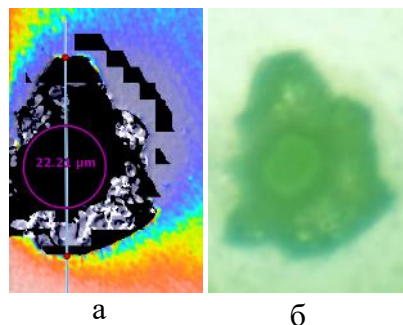


Рисунок 2.12 – Отверстие под капилляр капсулы №1: а) вид на одной из топографий, полученных при сканировании полной поверхности капсулы на оптическом профилометре, б) вид на фотографии с микроскопа (объектив 10X, 0,2 мкм/пиксель), диаметр проходного сечения (14 ± 1) мкм

По этому же набору данных для оптически прозрачных капсул можно получить график экваториальных толщин стенки капсул. Из каждого файла карты толщины стенки берется значение толщины стенки в центральной точке кадра, а ее фактическое угловое положение вычисляется с использованием рассчитанных сдвигов каждого кадра относительно его идеального положения из-за несовершенства оси вращения. График экваториальных толщин стенки капсулы №1 представлен на рисунке 2.13. Видно, что толщина стенки капсулы находится в пределах от $(41,9 \pm 0,2)$ мкм до $(50,9 \pm 0,2)$ мкм, разнотолщинность по всем экваторам (формула (2.10)) составляет 19% при средней толщине 46,6 мкм.

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{mean}} \cdot 100\% \quad (2.10),$$

где τ_{max} , τ_{min} и τ_{mean} – максимальная, минимальная и средняя толщины соответственно. На рисунке 2.13 также показаны некоторые дефекты внешней поверхности, видимые на графике толщин. Поскольку капсула является почти невесомой, при ее переключении между основным и дополнительным вакуумными пинцетами (для сканирования следующего экватора), она может прокрутиться в потоках воздуха, направленных внутрь пинцетов, что видно на рисунке 2.13, а: после сканирования экватора в положении 150° капсула слегка прокрутилась и экваториальные толщины в положениях 160° и 170° не проходят в областях пересечения остальных экваторов, которые показаны на рисунке 2.13, б.

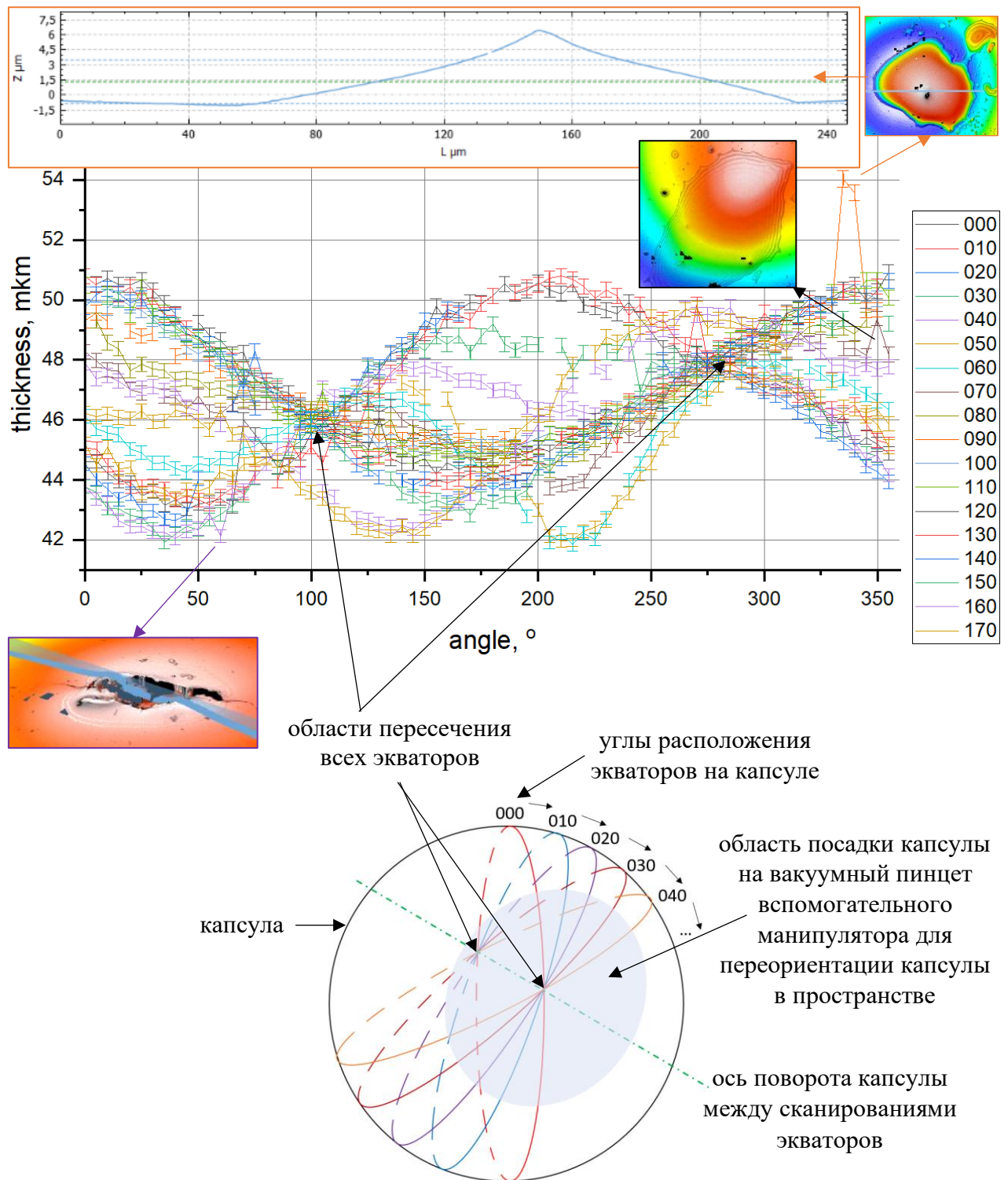


Рисунок 2.13 –Толщина стенки капсулы №1: а) экваториальные толщины стенки (показаны некоторые дефекты внешней поверхности, видимые на графике толщин), б) схема расположения сканируемых экваторов на поверхности капсулы

2.1.2 Рентгеновский фазоконтрастный метод

Для измерения толщины стенки оптически непрозрачной капсулы может использоваться рентгеновский метод. Формирование контраста изображения в традиционной

рентгенографии поглощения основано на ослаблении РИ в результате поглощения. Линейный коэффициент ослабления излучения μ в веществе прямо пропорционален атомному номеру Z составляющего его элемента. В случае элементов с малым Z , какими являются материалы капсулы (ПАМС, СН, Ве) и топлива (D_2 , DT), сложно определить границу раздела таких веществ из-за близких значений линейного коэффициента ослабления излучения.

В таком случае может быть получено РФК изображение, где контраст увеличивается за счет преломления РИ на границах раздела объекта исследования. Поскольку показатель преломления исследуемых материалов близок к единице, рентгеновские лучи почти не изменяют своего направления, и чтобы отклонение лучей от своего первоначального направления (за счет преломления) стало заметным на детекторе, детектор РИ должен быть расположен на большом расстоянии от объекта.

На этом принципе разработана и реализована оригинальная конструкция стенда рентгеновских измерений, позволяющая получать РФК изображение с большим увеличением для радиоактивных и нерадиоактивных лазерных мишеней, в том числе криогенных (с топливом), находящихся внутри перчаточного бокса, а также нерадиоактивных лазерных мишеней вне перчаточного бокса, с использованием одного источника РИ. На стенд зарегистрировано ноу-хау (секрет производства) «Стенд рентгеновских измерений параметров лазерных мишеней».

На расстояние от источника до объекта накладывают ограничения размеры криостата и перчаточного бокса, в котором располагается криостат: минимальное расстояние составляет 10 см и может варьироваться в большую сторону. При этом расходящийся пучок РИ обрезается апертурой окна бокса-конвертера, в результате чего на капсулу падает квазиколлимированный пучок, как показано на рисунке 2.14.

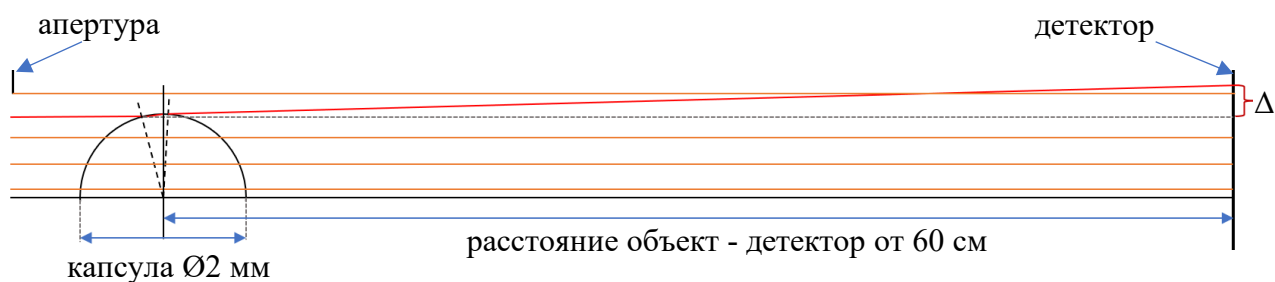


Рисунок 2.14 – Схема преломления рентгеновских лучей с углом падения на сферическую поверхность объекта, близким к 90° , и его отклонение от первоначального направления распространения (Δ) на детекторе за счет большого расстояния объект-детектор

В качестве источника РИ используется микрофокусная рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом. Рабочее напряжение составляет от 10 до 150 кВ, рабочий ток - до 1 мА в зависимости от напряжения, давление в трубке до 10^{-6} мбар обеспечивается форвакуумным и турбомолекулярным насосами. В качестве детектора РИ используется камера с

рентгеновской матрицей. Размер матрицы составляет 1024×1024 пикселей, глубина пикселя в режиме высокой скорости - 12 бит, в режиме высокой точности - 16 бит, размер ячейки – $13,5 \times 13,5$ мкм. Объем рабочего сенсора, а также весь тракт РИ от источника до детектора откачивается форвакуумным и турбомолекулярным насосами до давления $\approx 10^{-5}$ мбар, охлаждение сенсора производится с помощью двойной ячейки Пельтье. Расстояние от объекта исследования до детектора составляет 60 см.

На рисунке 2.15 представлен типичный пример РФК изображения полый ПАМС капсулы, получаемого на данном стенде. На изображении визуализируются темные и светлые кольца и для того, чтобы определить, как они образуются и как их использовать для определения границ капсулы, было проведено численное моделирование. В среднем все изображения получаются при 60 кВ и 400 мкА на источнике РИ, время регистрации кадра ≈ 15 с, результат – усреднение по 100 кадрам. Энергия кванта РИ составляет ≈ 8 -10 кэВ.

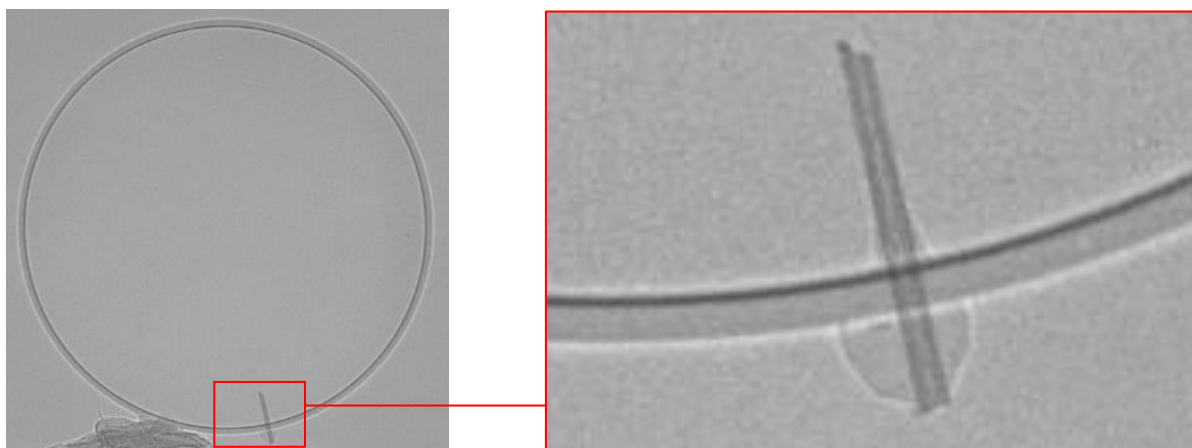


Рисунок 2.15 – Типичный пример экспериментального фазоконтрастного рентгеновского изображения полый ПАМС капсулы с частью вклеенного капилляра

2.1.2.1 Двумерное численное моделирование распространения рентгеновского излучения через полую капсулу

С целью определения механизма образования светлых и темных колец на РФК изображении проведено двумерное моделирование прохождения параллельного пучка РИ через центрально-симметричную полую капсулу. Коэффициент преломления n РИ определяется выражениями (2.11) - (2.13):

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (2.11),$$

$$\delta \approx \rho \lambda^2 \quad (2.12),$$

$$\beta = \mu \frac{\lambda}{4\pi} \quad (2.13),$$

где δ – декремент показателя преломления, ρ – плотность вещества, λ – длина волны излучения, β – член, определяющийся поглощением вещества μ для определенной длины волны λ , μ – коэффициент поглощения слоя.

Для РИ с энергией кванта 8 кэВ значение δ для СН составляет $2,2 \times 10^{-6}$, для Be(Cu) – $5,6 \times 10^{-6}$ [73]. Значение β для СН составляет $1,6 \times 10^{-9}$, для Be(Cu) составляет $1,05 \times 10^{-8}$. Поэтому величина слагаемого $i\beta$ является пренебрежимо малой и уравнение (2.11) примет вид $n = 1 - \delta$. Показатель преломления $n < 1$, при проникновении в более оптически плотную среду луч отклоняется от нормали, в отличие от видимого излучения. Поскольку δ очень мало, то n очень близок к единице и луч отклоняется на весьма малый угол. Поэтому, для того чтобы на детекторе отклонение было заметным, детектор должен быть установлен на большом расстоянии от исследуемого объекта.

Необходимо рассмотреть два отдельных случая преломления РИ на границах капсулы, представленные на рисунке 2.16. Первый случай – преломление из более оптически плотной среды с большим показателем преломления в менее оптически плотную среду с меньшим показателем преломления – это граница раздела вакуум/воздух–капсула ($n_1 < n_0$). Второй случай – наоборот – преломление из менее оптически плотной среды с меньшим показателем преломления в более оптически плотную среду с большим показателем преломления – это граница раздела капсула–вакуум/воздух ($n_0 > n_1$). Лучи можно разделить на три группы, которые отличаются между собой путями прохождения, как видно на рисунке 2.16: нулевая группа проходит мимо капсулы с топливом и падает на детектор; первая группа проходит только через капсулу и затем падает на детектор, вторая группа – через капсулу, вакуум/воздух, капсулу, выходит из капсулы и падает на детектор.

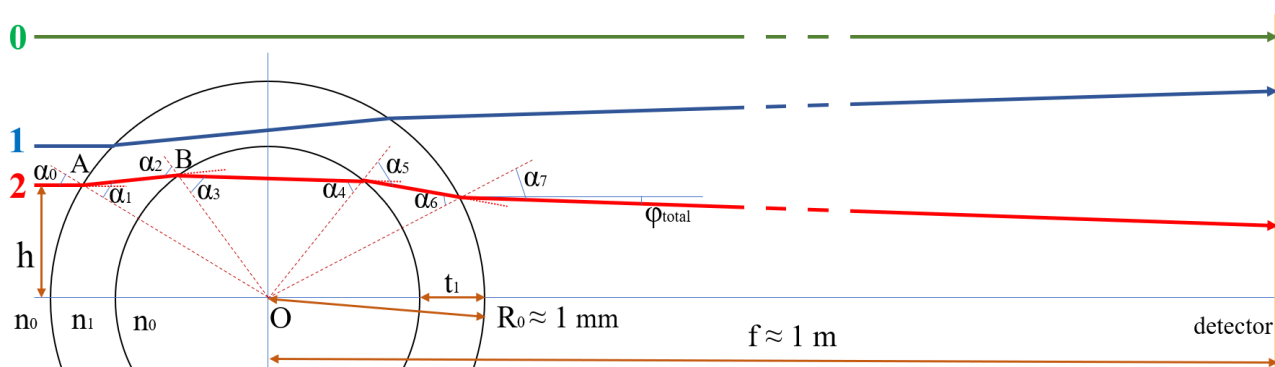


Рисунок 2.16 – Группы лучей с разными путями прохождения: 0 – не проходящая через капсулу, 1 – проходящая через капсулу, 2 – проходящая через капсулу+ вакуум/воздух + капсулу. Подробно на примере второй группы: n_0, n_1 – показатели преломления окружающей среды и капсулу. $R_0 = 1$ – внешний радиус капсулы с центром O, t_1 – толщина стенки капсулы, h – высота падающего луча. $\alpha_0, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$ – углы падения на границы раздела; $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7$ – углы преломления. ϕ_{total} – угол отклонения выходящего из капсулы луча (от первоначального направления), под которым луч распространяется к детектору

В расчетах все линейные величины нормированы на внешний радиус капсулы R_0 : радиусы поверхностей составляют: $1, (1-t_1)$, где t_1 – толщина капсулы. Расстояние от источника РИ до капсулы равно s , расстояние от капсулы до детектора $f > s, f > R_0$. Экспериментально расстояние s ограничено конструкцией стенда рентгеновских измерений, составляет как минимум 10 см и может варьироваться в большую сторону; расстояние f также переменное.

Подробно ход лучей можно рассмотреть на примере второй группы лучей, которая представлена на рисунке 2.16. Далее все линейные величины нормированы на внешний радиус капсулы R_0 , соответственно, радиус капсулы равен 1. Из прямоугольного треугольника находится угол α_0 между падающим на внешнюю поверхность капсулы лучом и нормалью к границе раздела радиусом 1 (2.14):

$$\alpha_0 = \arctg\left(\frac{h}{\sqrt{1-h^2}}\right) \quad (2.14).$$

Из закона преломления Снеллиуса вычисляется угол преломления α_1 (2.15) на границе:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} \sin(\alpha_0)\right) \quad (2.15).$$

Угол отклонения луча φ_i на границе определяется как разность угла падения и преломления на i -й границе по формуле (2.16), в общем случае:

$$\varphi_i = |\alpha_{incident_i} - \alpha_{refraction_i}| \quad (2.16),$$

для данной границы это $\varphi_1 = |\alpha_0 - \alpha_1|$. Порядок величин углов φ_i находится в пределах от 10^{-12} до 10^{-4} рад, поэтому величина отклонения луча вдоль оси Оу пренебрежимо мала и координату по у для луча внутри капсулы можно принять равной h . По теореме синусов для треугольника ABO (формула (2.17)) вычисляется угол падения α_2 на следующую границу раздела радиусом $(1-t_1)$:

$$\alpha_2 = \left| \arcsin\left(\frac{1}{1-t_1} \sin(\alpha_1)\right) \right| \quad (2.17).$$

Далее аналогичные расчеты выполняются для каждой i -й границы, где $i=1, 2, \dots, n$. Угол отклонения луча вычисляется суммированием φ_i на каждой границе на пути луча по формуле (2.18):

$$\varphi_{total} = \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (2.18),$$

при этом знак φ_i выбирается в зависимости от направления отклонения луча. Порядок величин углов φ_{total} , под которыми лучи выходят из капсулы и распространяются к детектору, находится также в пределах от 10^{-12} до 10^{-4} рад. Положение лучей на детекторе y_{det} будет определяться как (2.19):

$$y_{det} = h + f \cdot tg(\varphi_{total}) \quad (2.19).$$

Как видно из формулы (2.16), отклонение луча φ_i является функцией угла падения на границу $\alpha_{refraction_i}$: чем больше угол падения, определяющийся падающим лучом и

нормалью к границе, тем больше угол отклонения луча. Поэтому максимальные углы отклонения φ_i будут в областях, где луч падает практически по касательной к сферической поверхности ($\alpha_{incident_i}$ стремится к 90° , h стремится к радиусу поверхности) и минимальны в остальных областях. Это видно на рисунке 2.17, где представлена зависимость положения лучей на детекторе y_{det} в зависимости от их положения в падающем пучке h . Число лучей 10^6 . Параметры капсулы: материал СН, диаметр 2150 мкм, толщина стенки 50 мкм, энергия РИ 10 кэВ.

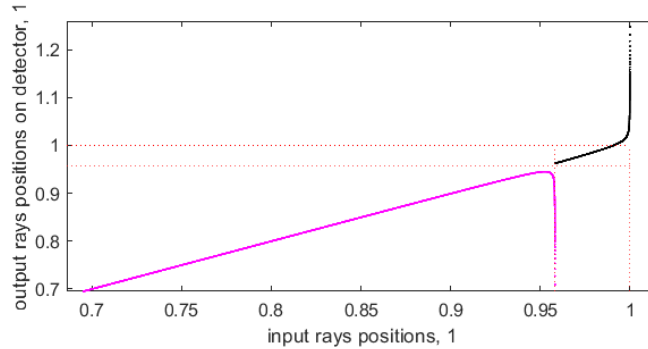


Рисунок 2.17 – Зависимость положения лучей на детекторе y_{det} в зависимости от их положения в падающем пучке h (черный цвет – первая группа лучей, розовый – вторая; красный цвет – положения границ капсулы)

При углах скольжения рентгеновских лучей на объект меньше критического θ_c (2.20) возникает полное внешнее отражение [98]. Поскольку порядок величин углов θ_c для материалов капсулы составляет 10^{-3} рад, полным внешним отражением в расчетах можно пренебречь.

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (2.20).$$

Влиянием дифракции также можно пренебречь, поскольку размер первой дифракционной зоны Френеля равен $h = \sqrt{s\lambda}$, составляет 3 мкм при расстоянии от источника РИ до объекта $s=10$ см, что значительно меньше ширины характеристической темной зоны на РФК изображении при условии, что расстояние от капсулы до детектора $f > s$.

Интенсивность лучей, ослабленных в слое, вычисляется по закону Бугера-Ламберта-Бэра (2.21):

$$Int_{fin} = Int_{start} \cdot \exp(-\mu l) \quad (2.21),$$

где $l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \approx (x_2 - x_1)$ – путь, который луч прошел в слое (отклонением по ординате можно пренебречь, поскольку $y_2 \approx y_1 \approx h$), μ – коэффициент поглощения слоя, определяющийся поглощающим свойством материала β и длиной волны РИ λ (2.22):

$$\mu = \beta \frac{4\pi}{\lambda} \quad (2.22),$$

и равен $\beta \cdot 4,049 \cdot 10^{10} [\text{м}^{-1}]$ для РИ с энергией кванта 10 кэВ (энергия определяется тем, что она максимально подходит для диагностики слоя ДТ в бериллиевой капсуле, см. пункт 1.3.2).

На основе данного моделирования разработана программа, в которой по заданным параметрам (диаметр и толщина стенки капсулы, расстояние от капсулы до детектора, материал капсулы) моделируется РФК изображение методом трассировки лучей. На рисунке 2.18 представлен вклад всех групп лучей в профиль интенсивности, финальный профиль интенсивности и РФК изображение. На профиле интенсивности видно, что темные области – это зоны отсутствия сигнала, а всплески интенсивности образуются в результате изменения направления хода лучей, которые прошли почти по касательной к сферической поверхности, и их попадания на уже освещенную зону.

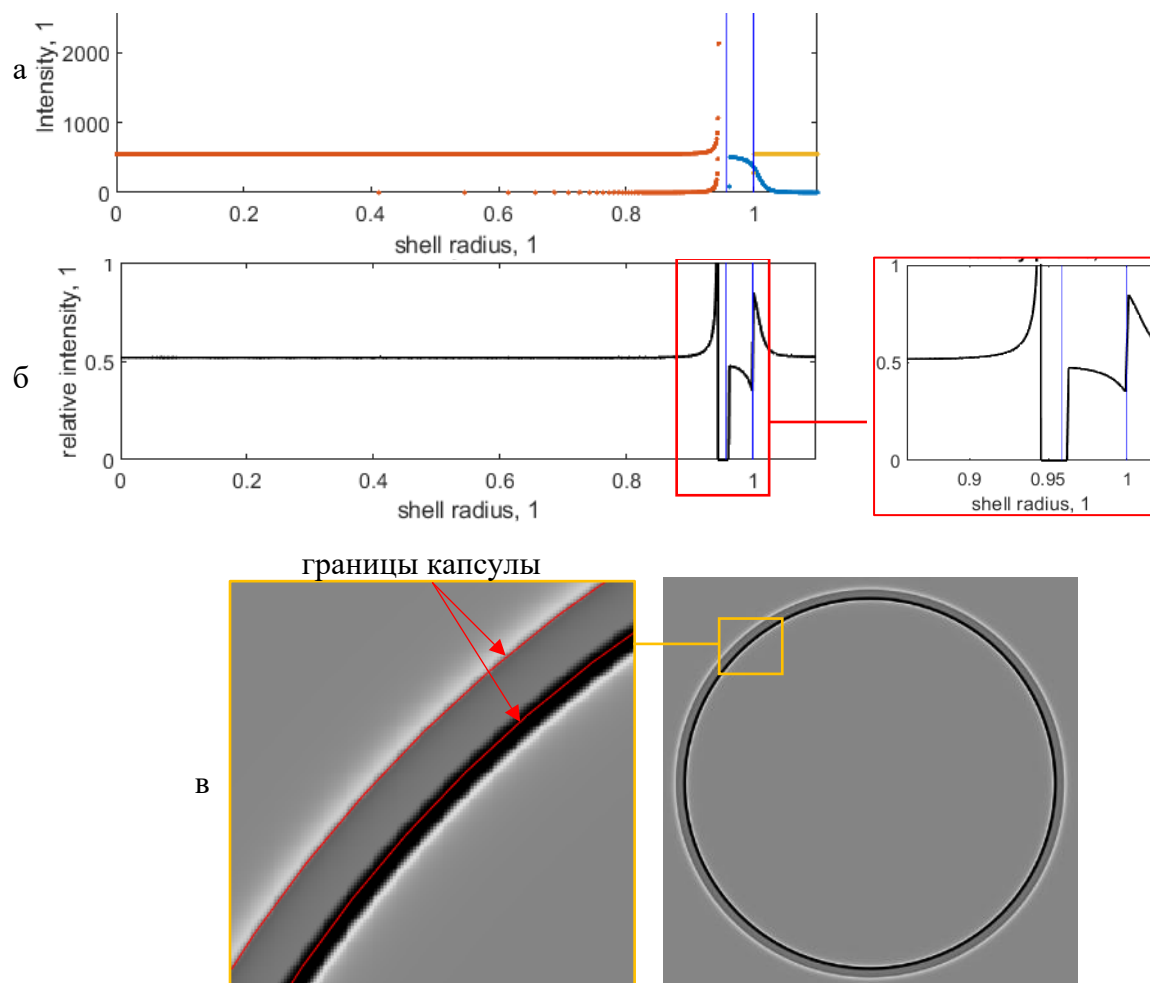


Рисунок 2.18 – Пример моделирования: а) вклад различных групп лучей в профиль интенсивности (желтый цвет – нулевая группа лучей, голубой – первая, оранжевый – вторая; синий цвет – положения границ капсулы), б) финальный профиль интенсивности, в) РФК изображение

2.1.2.2 Решение обратной задачи

По рисункам 2.17 и 2.18 видно, что темное кольцо (ТК) на изображении образуется в результате сильного преломления лучей второй группы, падающих почти по касательной к поверхности капсула-вакуум/воздух и лучей первой группы, проходящих вблизи этой

поверхности. Эти лучи второй группы отклоняются в сторону вакуума/воздуха внутри капсулы, образуя светлое кольцо внутри темного. А лучи первой группы, проходящие почти по касательной к поверхности вакуум/воздух-капсула, образуют пик интенсивности сразу за внешней границей капсулы.

Поэтому выполнено решение обратной задачи отслеживания рентгеновских лучей от изображения до их преломления на внутренней поверхности капсулы. Получена зависимость (2.23) толщины стенки капсулы τ_{sh} от положения внешнего края ТК $R_{outer-dr-out}$ в неявном виде:

$$R_{dr out} - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh}\right) \times \sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh}\right)^2} - 2 \times \delta_{sh} \times f \times \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh}\right) = 0 \quad (2.23),$$

где τ_{sh} – толщина стенки капсулы, d_{sh} – внешний диаметр капсулы, $R_{dr out}$ – радиус внешнего края ТК, δ_{sh} – фазовый сдвиг в показателе преломления капсулы, f – расстояние от капсулы до детектора. Пояснение к формуле представлено на рисунке 2.19.

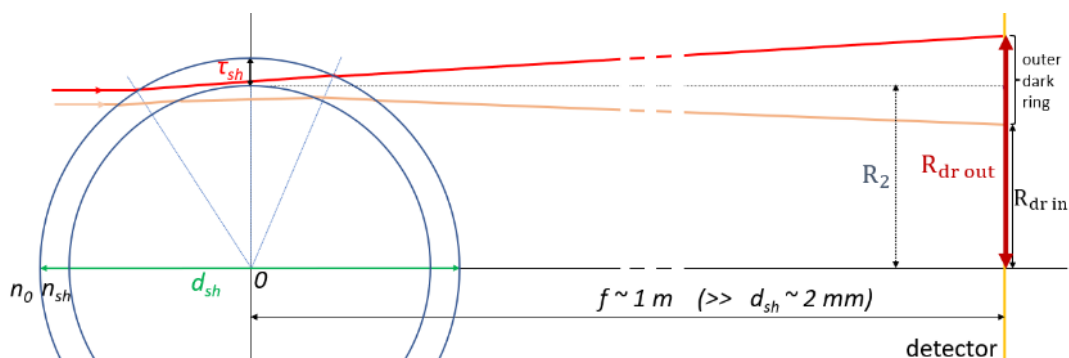


Рисунок 2.19 – Схематичное прохождение групп лучей через капсулу, характеризующих толщину стенки капсулы

На рисунке 2.20 представлена графическая иллюстрация к формуле (2.23): поправка, показывающая сдвиг видимого положения границы относительно реального: например, для бериллиевой капсулы диаметром 2 мм и толщиной стенки 150 мкм при расстоянии до детектора 90 см сдвиг видимого положения внутренней поверхности капсулы составит около 7 мкм. Материал капсулы не сильно влияет на данную зависимость, поскольку фазовый сдвиг δ_{sh} материала капсулы, входящий в зависимость (2.23), имеет порядок 10^{-6} и не сильно отличается для СН ($2,2 \times 10^{-6}$) и Ве ($5,6 \times 10^{-6}$). Как видно по графику, данный сдвиг значительно зависит и от толщины стенки капсулы, и от расстояния до детектора.

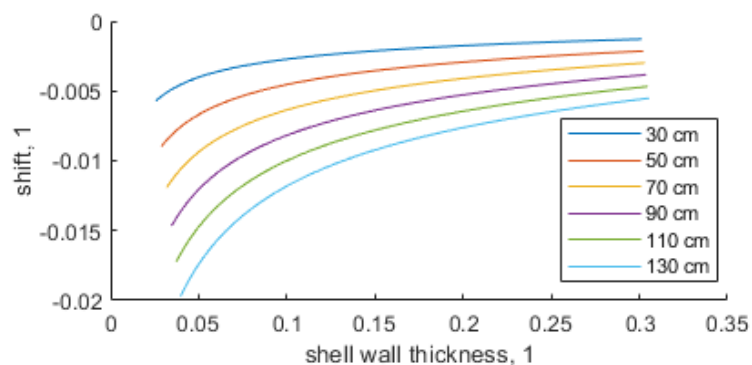


Рисунок 2.20 – Сдвиг видимой на РФК изображении толщины стенки капсулы относительно реальной в плоскости экватора для разных расстояний капсула - детектор

2.1.2.3 Обработка экспериментальных рентгеновских фазоконтрастных изображений

Для автоматического вычисления толщины стенки капсулы по РФК изображению разработана программа, в которой входными данными являются диаметр и материал капсулы. На рисунке 2.21, а представлено изображение ПАМС капсулы №1, на примере которой был описан метод конфокальной микроскопии в пункте 2.1.1. После преобразования изображения в полутоновое применяется метод Канни обнаружения границ на изображении по экспериментально подобранному порогу интенсивности для корректного определения внешней границы капсулы (0,4 в данном случае). В результате получается бинарное изображение, на котором идентифицируются пиксели со значением «1», принадлежащие внешней границе капсулы, находится уравнение границы в виде эллипса (общий случай, если капсула не является идеально сферической) и, соответственно, центр капсулы O .

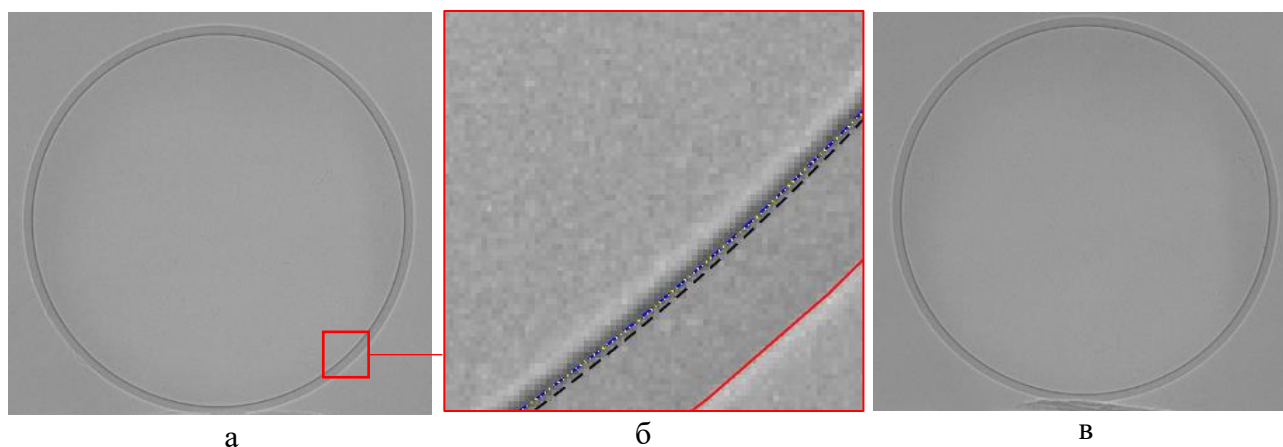


Рисунок 2.21 – РФК изображения полой капсулы №1 (ПАМС) диаметром (2128 ± 1) мкм: а) изображение №1; б) результаты анализа изображения №1: красный цвет - выделенная внешняя граница капсулы, черный цвет – внешний край характеристического ТК, синий – положение внутренней поверхности капсулы в плоскости экватора, желтый – аппроксимация внутренней поверхности эллипсом для оценки направлений смещения центра внутренней поверхности относительно внешней; в) изображение №2. Угол между двумя проекциями (изображения №1 и №2) $\approx 90^\circ$

Далее изображение разворачивается в полярные координаты через центр O на равномерную сетку. Размер полярного изображения по горизонтали определяется заданным шагом по углу $d\varphi$, поэтому угловой шаг при развертке изображения составляет $d\varphi=0,1^\circ$, φ изменяется от 0 до 360° , и ширина развернутого изображения составляет 3600 пикселей для обеспечения достаточного количества точек и разрешения максимальной моды возмущения поверхности $n=1000$ в плоскости экватора. После этого выполняется поиск внешней границы капсулы и внешнего края ТК на развернутом изображении. Положение внешнего края ТК $R_{DR}(\varphi)$ используется для вычисления толщины стенки $t_{sh}(\varphi)$ и внутреннего радиуса $\rho_{sh}(\varphi)$ капсулы с использованием зависимости (2.23), полученной при решении обратной задачи. $R_{DR}(\varphi)$ и $\rho_{cr}(\varphi)$ преобразуются в декартову систему координат $((x_{DR}, y_{DR})$ и (x_{sh}, y_{sh}) соответственно) и наносятся на исходное изображение, как показано на рисунке 2.21, б для оценки корректности всех выполненных действий. По (x_{sh}, y_{sh}) вычисляется уравнение внутренней поверхности капсулы в плоскости экватора в виде эллипса, показанное желтой пунктирной кривой на рисунке 2.21, б.

На рисунке 2.22 представлены результаты анализа двух изображений капсулы №1 (две проекции). Средняя толщина стенки в проекции 1 составляет $\bar{\tau}_1=45,2$ мкм, в проекции 2 - $\bar{\tau}_2=43,8$ мкм. Толщина стенки в обеих проекциях вдоль всего экватора находится в пределах от $(40,7\pm 2,3)$ мкм до $(48,2\pm 2,3)$ мкм, общая разнотолщинность стенки составляет $\Delta\tau=17\%$ при средней толщине $\bar{\tau}=44,5$ мкм, что в пределах погрешностей хорошо согласуется с толщиной стенки, полученной методом конфокальной микроскопии (толщина стенки - в пределах от $(41,9\pm 0,2)$ мкм до $(50,9\pm 0,2)$ мкм, разнотолщинность $\Delta\tau=19\%$ при средней толщине $\bar{\tau}=46,6$ мкм). Амплитуды выделенных мод Фурье для внешней и внутренней поверхностей капсулы меньше размера пикселя для обоих изображений (2,3 мкм), поэтому они неразрешимы и одномерные и двумерные СПМ поверхностей построить нельзя.

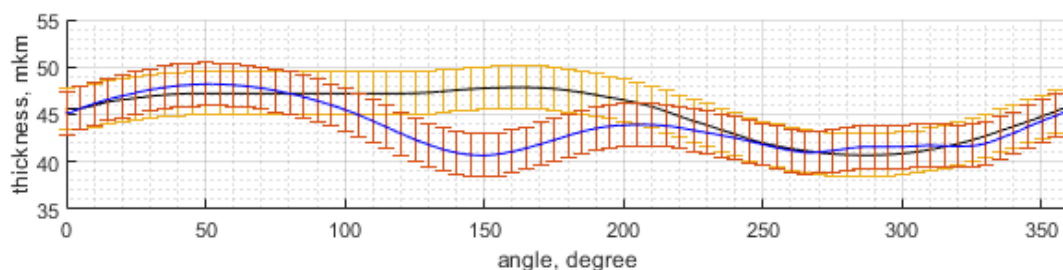


Рисунок 2.22 – Толщина стенки капсулы №1, определенная по двум РФК изображениям в разных проекциях: черный цвет – по изображению №1, синий цвет – по изображению №2

2.1.2.4 Видимость дефектов на рентгеновских фазоконтрастных изображениях

Видимость дефектов на РФК изображениях проанализирована с использованием ряда экспериментальных изображений различных ПАМС, СН и Ве капсул путем сопоставления разных наблюдаемых дефектов (пузырьки в стенке ПАМС капсул, трещины на Ве капсуле, крупные дефекты на поверхностях капсул) с данными, полученными методом конфокальной микроскопии.

На рисунке 2.23 представлено сопоставление РФК изображений ПАМС-капсулы №1 ее трехмерной карте дефектов, полученной методом конфокальной микроскопии: на РФК изображениях просматривается отверстие под капилляр, расположенное близи двух крупных дефектов с линейными размерами ≈ 300 и ≈ 500 мкм и высотой в среднем до 2 мкм, на обоих изображениях отверстие расположено не в плоскости экватора капсулы, поэтому отображается не в области стенки капсулы. По данным РФК изображениям можно увидеть наличие некоторых дефектов, но определить их геометрию и размеры не представляется возможным, если они не расположены на внешней границе капсулы на изображении (т.е. не вблизи плоскости экватора).

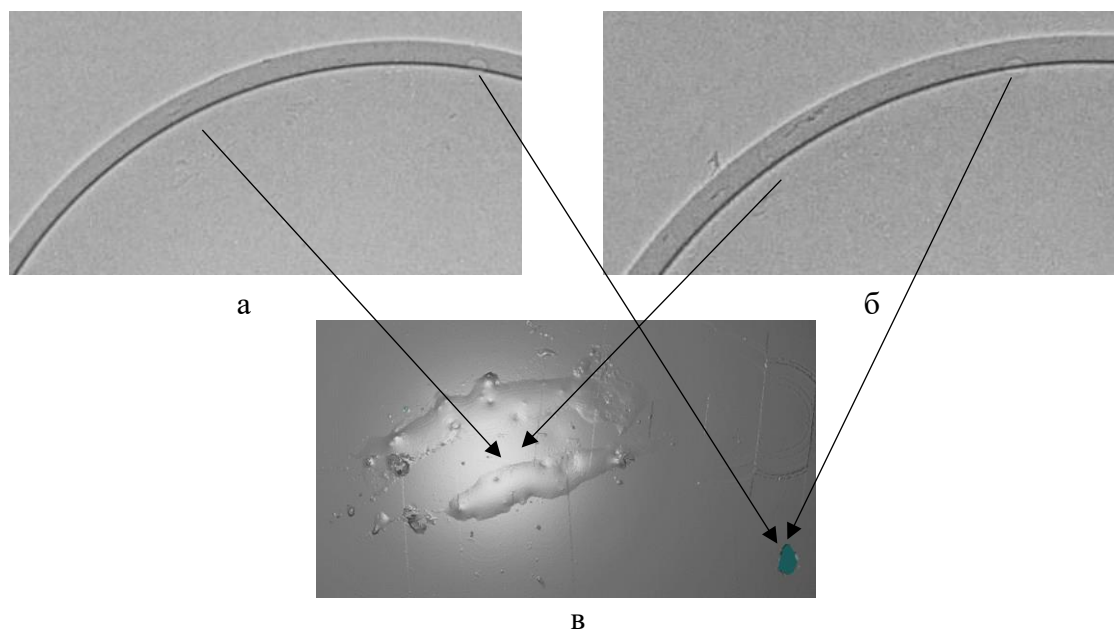


Рисунок 2.23 – Сопоставление РФК изображений №1 (а), №2 (б) трехмерной карте дефектов капсулы №1 (в). Контраст изображений увеличен для более четкого отображения дефектов

Тем не менее, как видно на рисунке 2.24, на изображении хорошо видны пузырьки воздуха в стенке капсулы диаметром от ≈ 9 мкм и выше. Поскольку они имеют квазисферическую форму, то механизм прохождения РИ через поверхность пузырька схож с механизмом прохождения РИ через поверхность капсулы в целом и крупные пузырьки визуализируются на изображении с темным краем. За счет того, что длина пути прохождения

РИ через материал капсулы меньше, когда в стенке на пути есть полые области, поглощение в стенке меньше и области с пузырьками светлее.

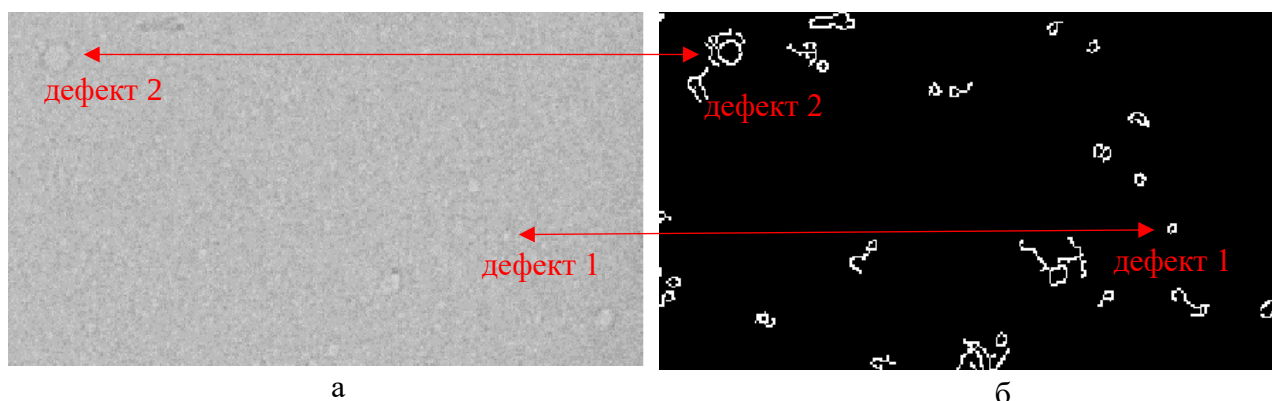


Рисунок 2.24 – Видимость пузырьков воздуха в стенке капсулы №1 на РФК изображении №1: а) увеличенная область изображения (контраст увеличен для более четкого отображения пузырьков), б) бинарное изображение по порогу интенсивности 0.12 для отображения пузырьков воздуха в стенке капсулы.

Видны пузырьки от ≈ 9 мкм (4 пикселя) (дефект 1) до ≈ 25 мкм (11 пикселей) (дефект 2)

Анализ ряда РФК изображений ПАМС капсул показал, что пузырьки диаметром менее 4 пикселей не видны на изображениях. В среднем, с учетом повторяемости размеров исследуемых капсул, разрешение фазоконтрастных рентгеновских изображений составляет от 2,2 до 2,5 мкм/пиксель, и 9 мкм будет средним минимальным размером визуализируемого на изображении дефекта сферической формы для реализованной конфигурации рентгеновской системы наблюдения.

Видимость дефектов заметно падает от внешней границы к центру капсулы, что видно также на рисунке 2.25 на примере РФК изображения капсулы №4 (Be), внешняя поверхность которой покрыта дефектами, образующимися при напылении Be на подложку (ПАМС оболочку), и трещинами в результате старения Be капсулы. В центральной области изображения трещины также присутствуют, но едва различимы. На краях хорошо видны трещины шириной от ≈ 7 мкм и выше. Для данной капсулы также видна кривизна внешней и внутренней поверхности в плоскости экватора. Для сравнения на рисунке 2.25, г приведен анализ результатов сканирования части внешней поверхности этой же капсулы №4 методом конфокальной микроскопии. Вся поверхность капсулы покрыта дефектами максимальным диаметром $\approx 4,4$ мкм и высотой ≈ 1 мкм, но на РФК изображении эти дефекты не отображаются, а также видно, что на поверхности присутствует множество трещин шириной от 1 мкм и выше.

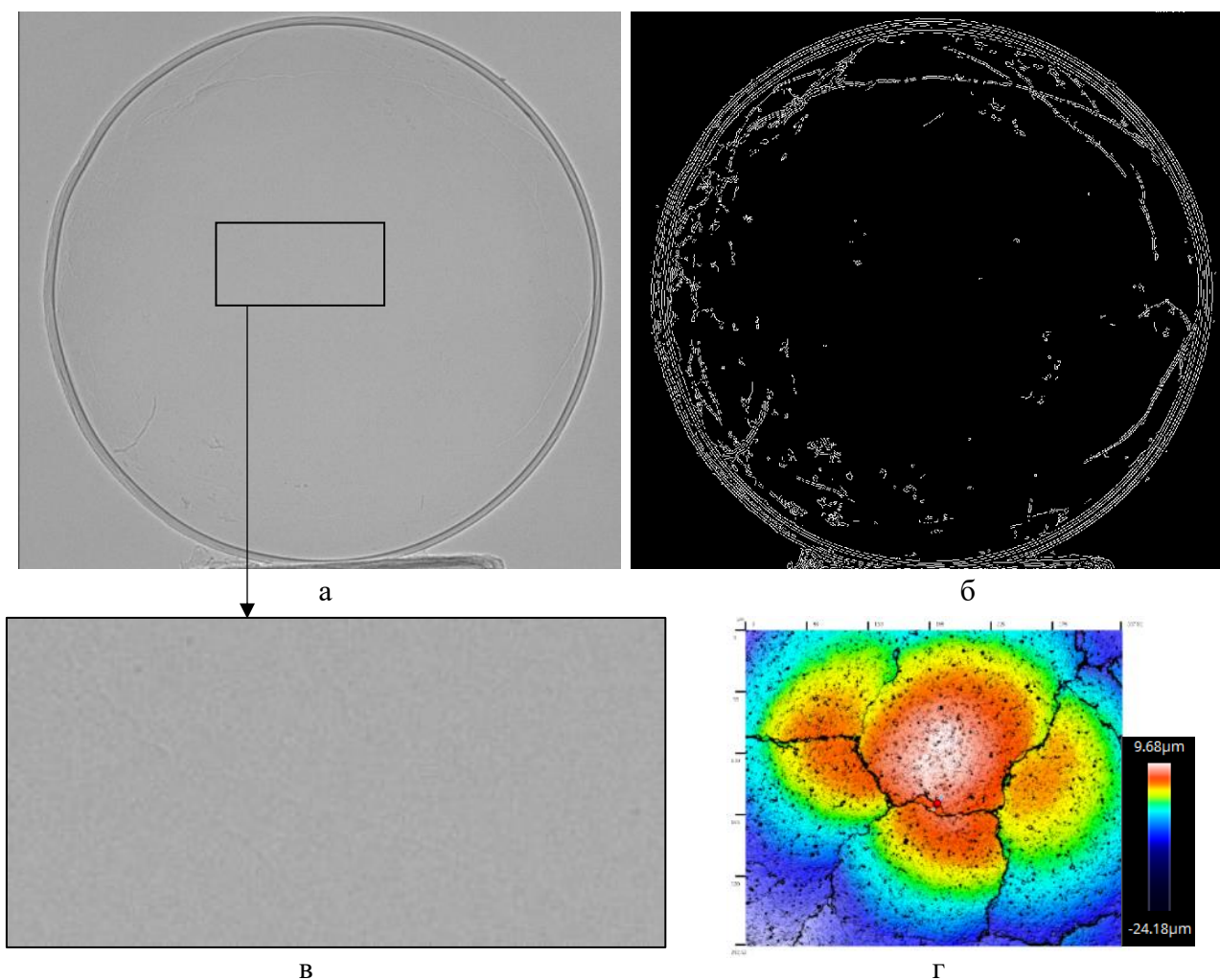


Рисунок 2.25 – Видимость трещин на внешней поверхности капсулы №4 (Ве) диаметром (2021 ± 1) мкм: а) РФК изображение капсулы, б) бинарное изображение для более четкой видимости трещин, в) видимость трещин в центральной области капсулы, г) пример топографии размером 338×273 мкм, полученной при сканировании одного экватора внешней поверхности капсулы №4 методом конфокальной микроскопии

Таким образом, для реализованной конфигурации рентгеновской системы диагностики (расстояния источник РИ - объект, объект - детектор РИ, размер источника РИ и размер матрицы детектора) разрешение РФК изображений составляет в среднем $\approx 2,5$ мкм/пиксель. Дефекты типа «пузырьки воздуха в стенке капсулы» видны на фазоконтрастных рентгеновских изображениях при диаметре от ≈ 9 мкм. Дефекты типа «трещины на поверхности» видны при ширине от ≈ 7 мкм, при этом видимость трещин от внешней границы капсулы к центру заметно падает. Произвольные дефекты внешней поверхности могут отображаться частично, и определить их наличие, форму и размеры достаточно сложно, если они не попали в плоскость экватора и не отобразились на внешней границе капсулы.

2.2 Элементы мишенного узла

Измеренная капсула собирается с измеренным капилляром, предназначенном для напуска в нее топлива при проведении экспериментов по формированию твердого слоя топлива (ТСТ) в капсуле, устанавливается в бокс-конвертер, состоящий из двух предварительно измеренных полусфер. Собранный бокс-конвертер с капсулой внутри устанавливается с помощью манжетного фланца на держатель бокса-конвертера. Вся конструкция в сборе является мишенным узлом, который также подлежит измерению и представлен на рисунке 2.26. Держатель бокса-конвертера имеет 8 отверстий диаметром 2 мм, распределенных по диаметру, выполненных под углом 30° к вертикальной оси держателя и предназначенных для заведения ЛИ в верхнее окно бокса-конвертера, как видно на рисунке 2.26.

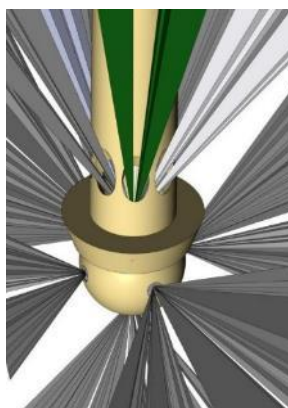


Рисунок 2.26 – Заведение ЛИ в мишенный узел КМ непрямого сжатия РФЯЦ-ВНИИЭФ

2.2.1 Капилляр для наполнения капсулы топливом

Диаметр капилляра и, соответственно, количество клея в месте вклейки капилляра в капсулу должны быть минимальными для исключения их влияния на распределение температур в капсуле в эксперименте по формированию твердого слоя топлива (ТСТ), поскольку стабильное положение внутренней поверхности ТСТ определяется фактической изотермой в капсуле.

Капилляр для наполнения капсулы топливом состоит из трех частей, как видно на рисунке 2.27, а:

- стальной капилляр диаметром ≈ 600 мкм и длиной ≈ 50 мм, в месте крепления капилляра к стенке бокса-конвертера;
- промежуточный стеклянный капилляр диаметром ≈ 240 мкм и длиной ≈ 10 мм, для выдерживания соосности капилляров;

– капилляр из боросиликатного стекла с золотым напылением диаметром от 10 до 20 мкм и длиной 3 мм, подбирается индивидуально в соответствии с диаметром отверстия под капилляр в капсуле.

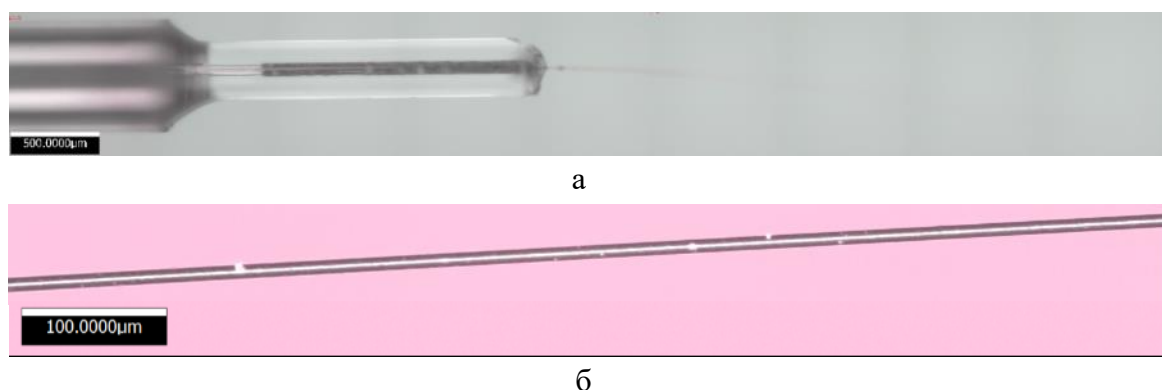


Рисунок 2.27 – Составной капилляр: а) общий вид, б) часть из боросиликатного стекла с золотым напылением

Диаметр капилляра, представленного на рисунке 2.27, б, составляет $(9,5 \pm 0,3)$ мкм и соответствует диаметру проходного отверстия в капсуле №1 (14 ± 1) мкм.

2.2.2 Бокс-конвертер

Бокс-конвертер собирается из двух медных полусфер: полусфера №1 с внешней частью замка и ответная полусфера №2 с внутренней частью замка. Для проведения эксперимента по зажиганию КМ на внутреннюю поверхность полусфер напыляется слой золота. В эксперименте по зажиганию КМ в шесть окон бокса-конвертера заводится ЛИ, которое проходит мимо капсулы с топливом, как было показано на рисунке 3, падает на золотую внутреннюю поверхность бокса-конвертера, на которой в свою очередь происходит конверсия ЛИ в РИ. Это определяет требования к боксу-конвертеру. Требования к полусферам бокса-конвертера приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Требования к полусферам бокса-конвертера

Параметр	Требования
Радиус внешней поверхности	4,8 мм с допуском -10 мкм
Радиус внутренней поверхности	4,5 мм с допуском +10 мкм
Диаметры окон для ввода ЛИ (по три на полусферу)	2,0 мм с допуском +10 мкм
Угол между окнами	120°
Угол центра окна относительно центра сферы	35°, нормали окон должны быть направлены в центр сферы
Высота замка	(500 ± 10) мкм
Диаметр замка	9,3 мм - с допуском для полусферы №1 с внешней частью замка от +5 мкм до +10 мкм,

	- с допуском для полусферы №2 с внутренней частью замка от -5 мкм до -10 мкм (для плотного замыкания полусфер)
Расстояние от плоскости торца до центра сферы	(250±10) мкм
Неточность формы внутренней/ внешней поверхности	10 мкм
Шероховатость внутренней поверхности	1 мкм

Измерения параметров полусфер бокса-конвертера выполнялись отдельно как для заготовок полусфер, так и для готовых обработанных на ультрапрецизионном станке полусфер. Также выполнялись поэтапные измерения при отработке режимов обработки полусфер на станке для удовлетворения предъявляемым требованиям.

Сканирование поверхности полусфер выполняется на бесконтактном оптическом профилометре №2, работающем на принципе «focus variation», который заключается в том, что область поверхности объекта сканируется с заданным вертикальным разрешением, при этом в каждой вертикальной позиции захватывается последовательность двумерных изображений, по которой рассчитывается значение фокуса (контраста) каждого пикселя относительно соседних пикселей на каждом двумерном изображении. Вертикальное положение точки объекта определяется как высота, на которой значение фокуса пикселя максимально.

Сканирование области поверхности выполняется с использованием объектива 10X с вертикальным разрешением 0,09 мкм, латеральным разрешением 1,98 мкм, что определяется оптимальным временем сканирования и оптимальным объемом полученного облака точек (≈ 100 млн точек для каждой топографии). Фокусное расстояние объектива 17,5 мм, поле зрения 1,62×1,62 мм, минимальная повторяемость в вертикальном направлении 30 нм. ПО прибора сшивает несколько полей обзора в топографию области поверхности. Поскольку поверхность отражающая и сферическая, используются встроенные поляризационный фильтр и кольцевая подсветка. Время экспозиции и контраст составляют 1,69 мс и 0,39 соответственно и определяются тем, чтобы на сканируемой поверхности отсутствовали чрезмерно и недостаточно освещенные области. Внешняя и внутренняя поверхности полусферы сканируются с шести разных ракурсов каждая, с трех ракурсов сканируется торец полусферы с захватом внешней поверхности, в результате чего получается набор топографий, пример которых представлен на рисунке 2.28, а. Это обеспечивает достаточное перекрытие топографий между собой для их дальнейшей сшивки оператором в трехмерную модель полусферы, которая представлена на рисунке 2.28, б. Среднеквадратическое отклонение

между двумя сшиваемыми топографиями составляет не более 1 мкм, что определяет погрешность измерений по трехмерной модели.

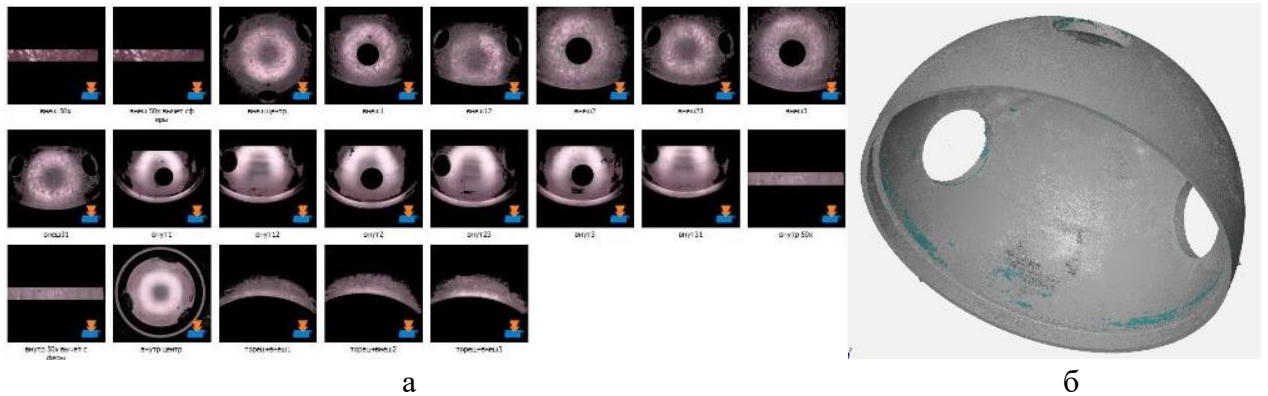


Рисунок 2.28 – Результаты сканирования полной поверхности полусферы №1:
а) полученные топографии, б) сшитая трехмерная модель

Ниже приведены результаты измерений параметров готовой полусферы №1 с внешней частью замка бокса-конвертера. Внешняя и внутренняя поверхность полусферы для измерения радиуса аппроксимируются сферами. Результат аппроксимации представлен на рисунке 2.29. Радиус внутренней поверхности составляет $(4,503 \pm 0,001)$ мм, внешней $(4,800 \pm 0,001)$ мм, неконцентричность внешней и внутренней поверхностей (0 ± 2) мкм. Аппроксимация элементов поверхностей геометрическими формами (сферой, цилиндром, плоскостью) выполняется методом гауссовского наилучшего соответствия с исключением при аппроксимации выпадающих точек.

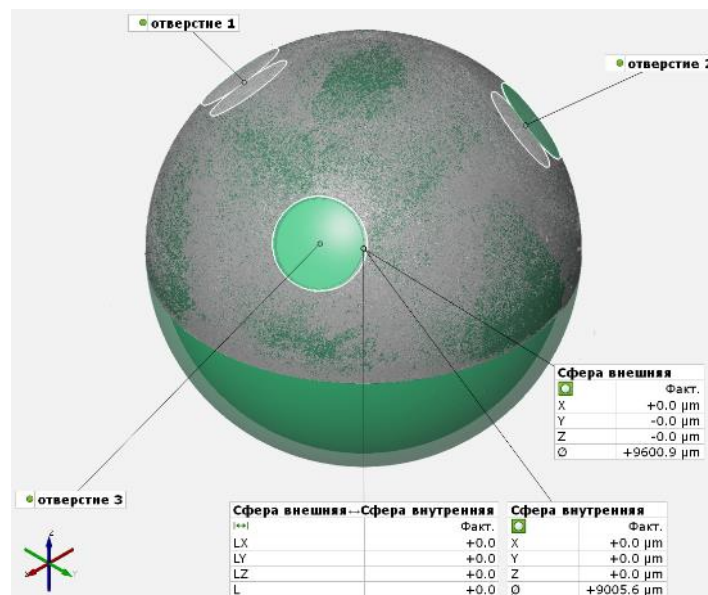


Рисунок 2.29 – Аппроксимация внешней и внутренней поверхностей полусферы №1 для определения радиусов

Неточность изготовления формы внутренней и внешней поверхностей не превышает 4 мкм, как представлено на рисунке 2.30, а, б. Толщина стенки полусферы №1 составляет (298 ± 4) мкм, толщина стенки в области замка (140 ± 8) мкм, как видно на рисунке 2.30, в.

Диаметр замка определяется аппроксимацией цилиндром и составляет $(9,315 \pm 0,001)$ мм. Высота замка, определенная как расстояние между плоскостью торца и плоскостью замка, составляет (510 ± 2) мкм. Расстояние от плоскости торца до центра внутренней сферы (252 ± 2) мкм.

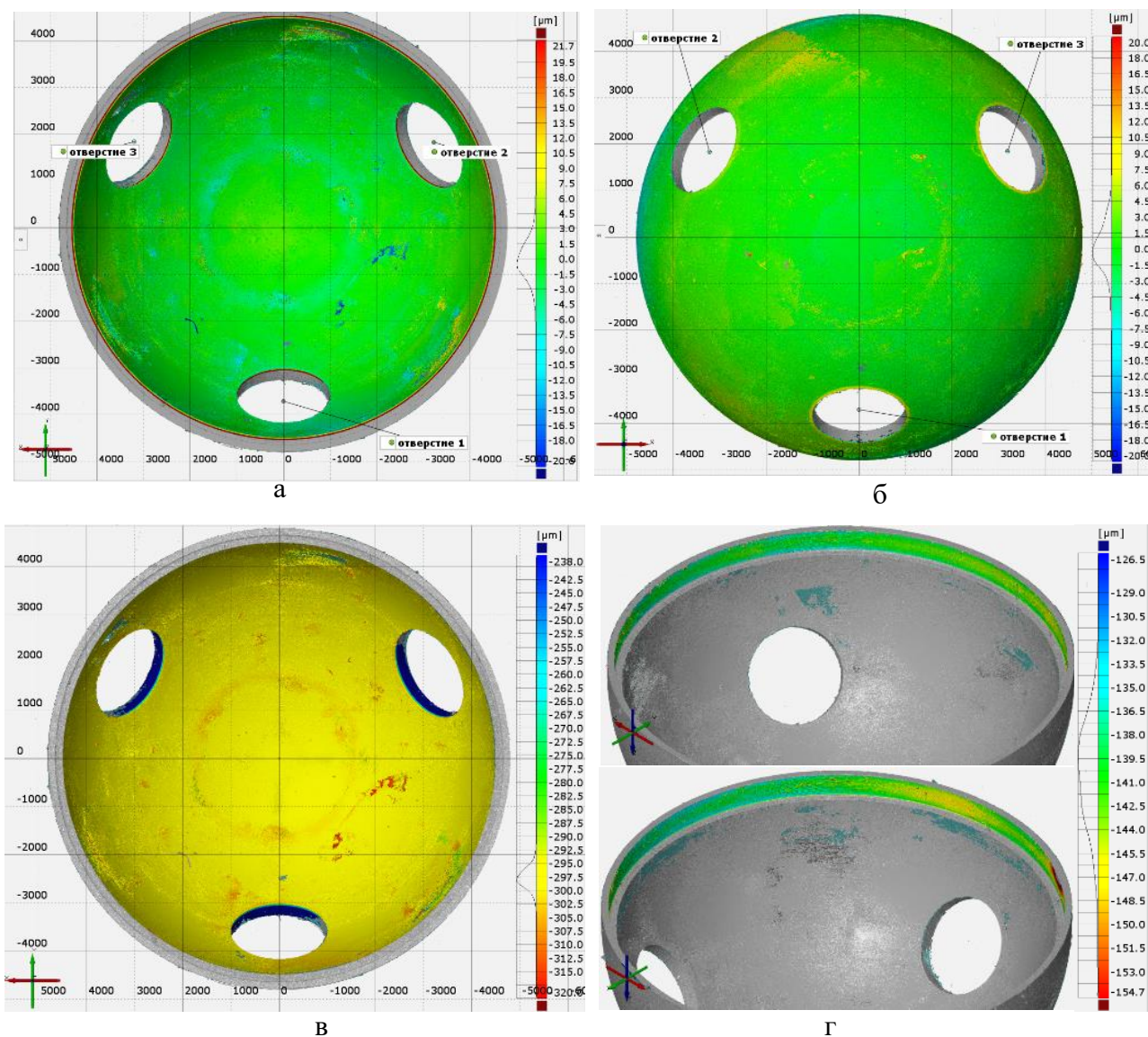


Рисунок 2.30 – Результаты анализа поверхностей полусферы №1: а) карта отклонения внутренней поверхности от аппроксимирующей сферы радиусом 4,503 мм; б) карта отклонения внешней поверхности от аппроксимирующей сферы радиусом 4,800 мм; в) карта толщины стенки; г) карта толщины стенки в области замка

Шероховатость внешней и внутренней поверхности полусфер измеряется по области поверхности, полученной при сканировании с использованием объектива 50X с вертикальным разрешением 0,02 мкм, латеральным разрешением 1,00 мкм. Фокусное расстояние объектива 11 мм, поле зрения $0,32 \times 0,32$ мм, минимальная повторяемость в вертикальном направлении 3 нм. Время экспозиции и контраст составляют 15,29 мс и 0,79, используется поляризационный фильтр и коаксиальная подсветка. Шероховатость Ra и волнистость Wa поверхности усредняются по 5 профилям на просканированной с использованием объектива 50X области,

один из которых представлен на рисунке 2.31, а (сферическая составляющая из топографии предварительно удаляется для корректного разделения профилей шероховатости и волнистости).

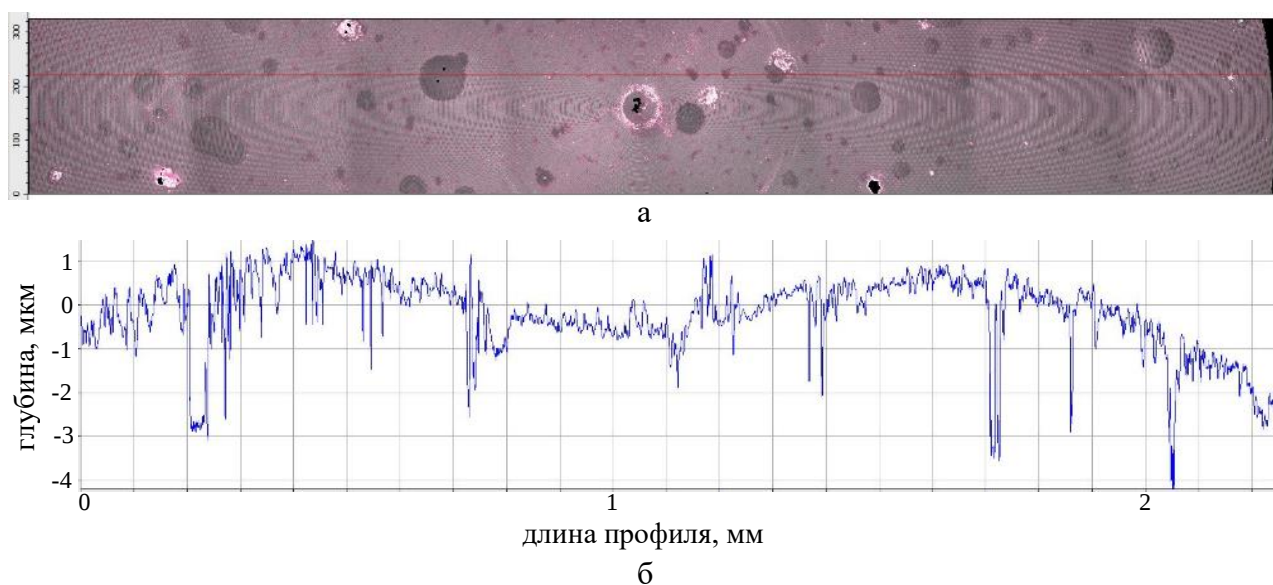


Рисунок 2.31 - Измерение параметров шероховатости внутренней поверхности полусферы №1: а) топография области с вычтенной сферической составляющей, б) первичный профиль

Все результаты измерений полусферы №1 сведены в таблицы 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты измерений параметров полусфер бокса-конвертера

	Требования	Полусфера №1 с внешней частью замка		Полусфера №2 с внутренней частью замка	
Поверхность		внешняя	внутренняя	внешняя	внутренняя
Радиус поверхности, мм	Внешняя: 4,8 мм, допуск -10 мкм Внутренняя: 4,5 мм, допуск +10 мкм	4,800±0,001	4,503±0,001	4,797±0,001	4,503±0,001
Неточность изготовления формы поверхностей, мкм	10 мкм	≈4	≈4	≈4	≈4
Средняя шероховатость внутренней поверхности Ra , мкм (по 5 профилям с длиной отсечки 250 мкм)	1 мкм	0,2	0,4	0,1	0,3
Средняя волнистость	-	0,2	0,4	0,1	0,1

поверхности W_a , мкм					
Неконцентричность поверхностей, мкм	-	0 ± 2		3 ± 2	
Толщина стенки, мкм (средняя толщина $\pm$ отклонение от средней)	-	298 ± 4		293 ± 7	
Толщина стенки в области замка, мкм (средняя толщина $\pm$ отклонение от средней)	-	140 ± 8		137 ± 7	
Диаметр замка, мм	Полусфера №1: 9,3 мм, допуск от +5 мкм до +10 мкм Полусфера №2: 9,3 мм, допуск от -5 мкм до -10 мкм	$9,315 \pm 0,001$		$9,276 \pm 0,001$	
Высота замка, мкм	500 ± 10	510 ± 2		491 ± 2	
Расстояние от плоскости торца до центра внутренней сферы, мкм	250 ± 10	252 ± 2		248 ± 2	

Таблица 2.3 - Результаты измерений расположения окон полусфер бокса-конвертера

	Требования	Полусфера №1 с внешней частью замка			Полусфера №2 с внутренней частью замка		
Окно		№1	№2	№3	№1	№2	№3
Диаметр окна, мм	2,0 мм, допуск +10 мкм	$2,027 \pm 0,002$	$2,035 \pm 0,002$	$2,025 \pm 0,002$	$1,998 \pm 0,002$	$1,984 \pm 0,002$	$2,001 \pm 0,002$
Угол расположения окна относительно центра сферы	35°	$35^\circ 8' \pm 1'$	$35^\circ 19' \pm 1'$	$35^\circ 22' \pm 1'$	$35^\circ 34' \pm 1'$	$35^\circ 41' \pm 1'$	$35^\circ 26' \pm 1'$
Угол между окнами	120°	№1 и №2: $119^\circ 39' \pm 1'$	№2 и №3: $120^\circ 22' \pm 1'$	№3 и №1: $119^\circ 59' \pm 1'$	№1 и №2: $119^\circ 59' \pm 1'$	№2 и №3: $119^\circ 49' \pm 1'$	№3 и №1: $120^\circ 12' \pm 1'$

Результаты анализа поверхностей ответной полусферы №2 представлены на рисунке 2.32, в таблицах 2.2 и 2.3.

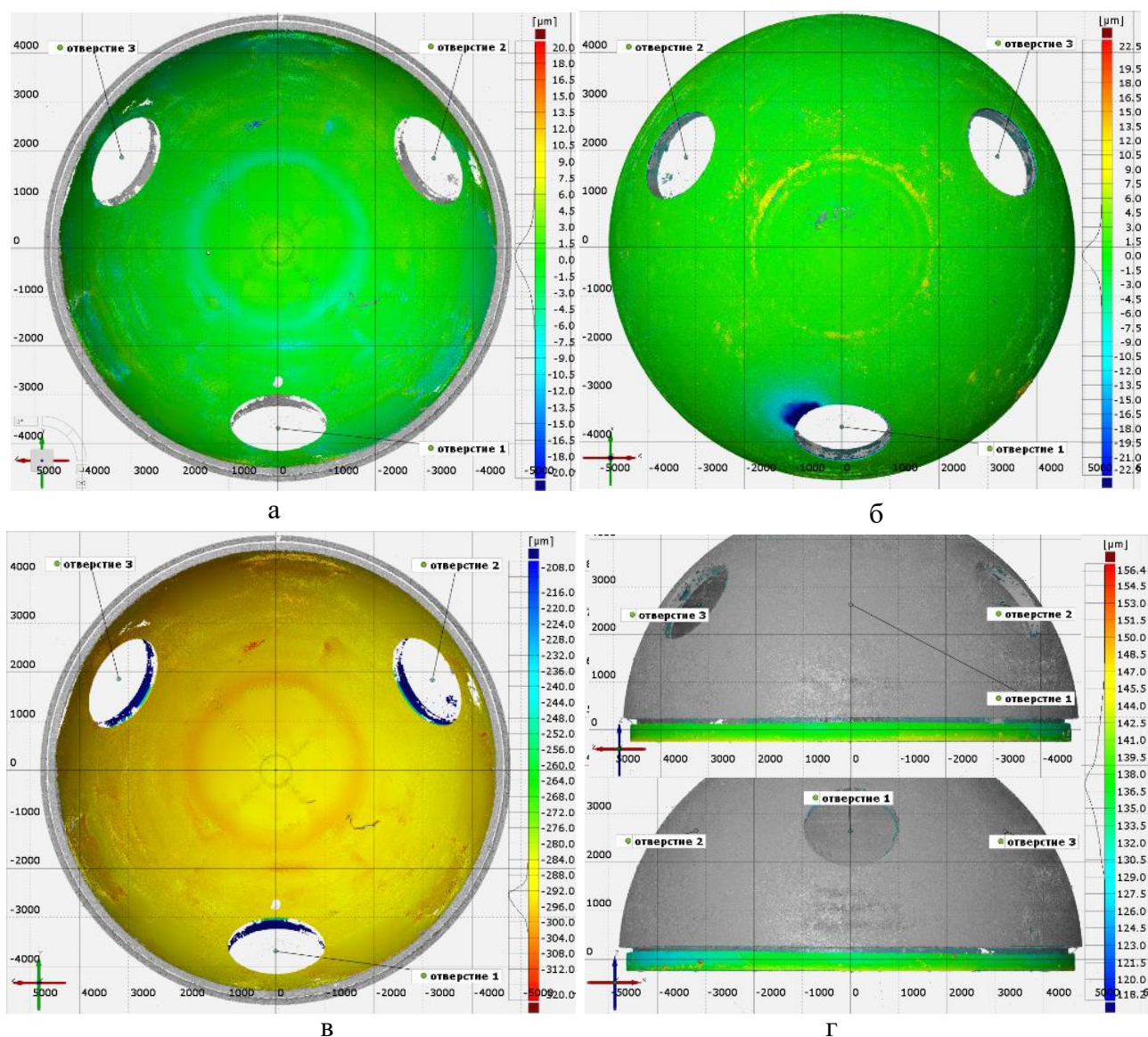


Рисунок 2.32 – Результаты анализа поверхностей ответной полусферы №2: а) карта отклонения внутренней поверхности от аппроксимирующей сферы радиусом 4,503 мм; б) карта отклонения внешней поверхности от аппроксимирующей сферы радиусом 4,797 мм; в) карта толщины стенки; г) карта толщины стенки в области замка, вид с разных сторон

2.3 Мишенный узел в сборе

К криогенному мишенному узлу (КМУ) предъявляются следующие требования:

- неточность расположения центра капсулы относительно центра бокса-конвертера: ± 30 мкм,
- неточность совмещения оси держателя относительно центра окон в полюсах бокса-конвертера: ± 3 мкм,
- неточность совмещения оси держателя относительно оси бокса-конвертера (оси через центр бокса-конвертера и центры окон в полюсах бокса-конвертера): $\pm 2'$.

Требования к точности размещения капсулы относительно окон бокса-конвертера, а также точности установки бокса-конвертера на держатель бокса обусловлены тем, что ЛИ в эксперименте по зажиганию должно попасть через окна бокса-конвертера на его внутреннюю поверхность, не задев при этом саму капсулу. Кроме этого, точность размещения капсулы относительно внутренней поверхности бокса-конвертера оказывает влияние на изотерму в капсуле при формировании ТСТ, которая в свою очередь определяет стабильное положение внутренней поверхности ТСТ.

Режим сканирования КМУ такой же, как и для полусфер бокса-конвертера. Установленная на ось вращения конструкция сканируется с 8 ракурсов с угловым шагом 45° и с одного ракурса со стороны окна бокса-конвертера в южном полюсе КМУ. Прозрачная капсула внутри бокса-конвертера при таком режиме не видна, поэтому дополнительно сканируется положение капсулы относительно окон в следующем режиме: время экспозиции 5 мс, контраст 0,99, осевая подсветка. Полученные топографии сшиваются в трехмерную модель КМУ. Поскольку уже имеются трёхмерные модели полусфер бокса-конвертера и капсулы, они по своим внешним поверхностям пришиваются к трехмерной модели КМУ, благодаря чему получается полная трехмерная модель КМУ. Это позволяет выполнять численное моделирование распространения ЛИ в боксе-конвертере и распространение РИ до поверхности капсулы с использованием реальных экспериментальных данных.

На рисунке 2.33, а представлена трехмерная модель КМУ, собранная из полусфер №1 и №2, результаты измерений для которых приведены в пункте 2.3.2, и ПАМС капсулы №1, на примере которой в пункте 2.1 были описаны метод конфокальной микроскопии и РФК метод измерения параметров капсул. Система координат (СК) выбрана так, что центр капсулы располагается в центре СК, ось держателя бокса-конвертера направлена вдоль оси ОУ, а центры окон 1 и 3, располагающихся в горизонтальной плоскости бокса-конвертера, и центра окна на южном полюсе, расположены в плоскости $X=0$. Полусфера №2 с внутренней частью замка располагается ближе к держателю (верхняя), полусфера №1 с внешней частью замка, - дальше от держателя (нижняя), что показано на рисунке 2.34.

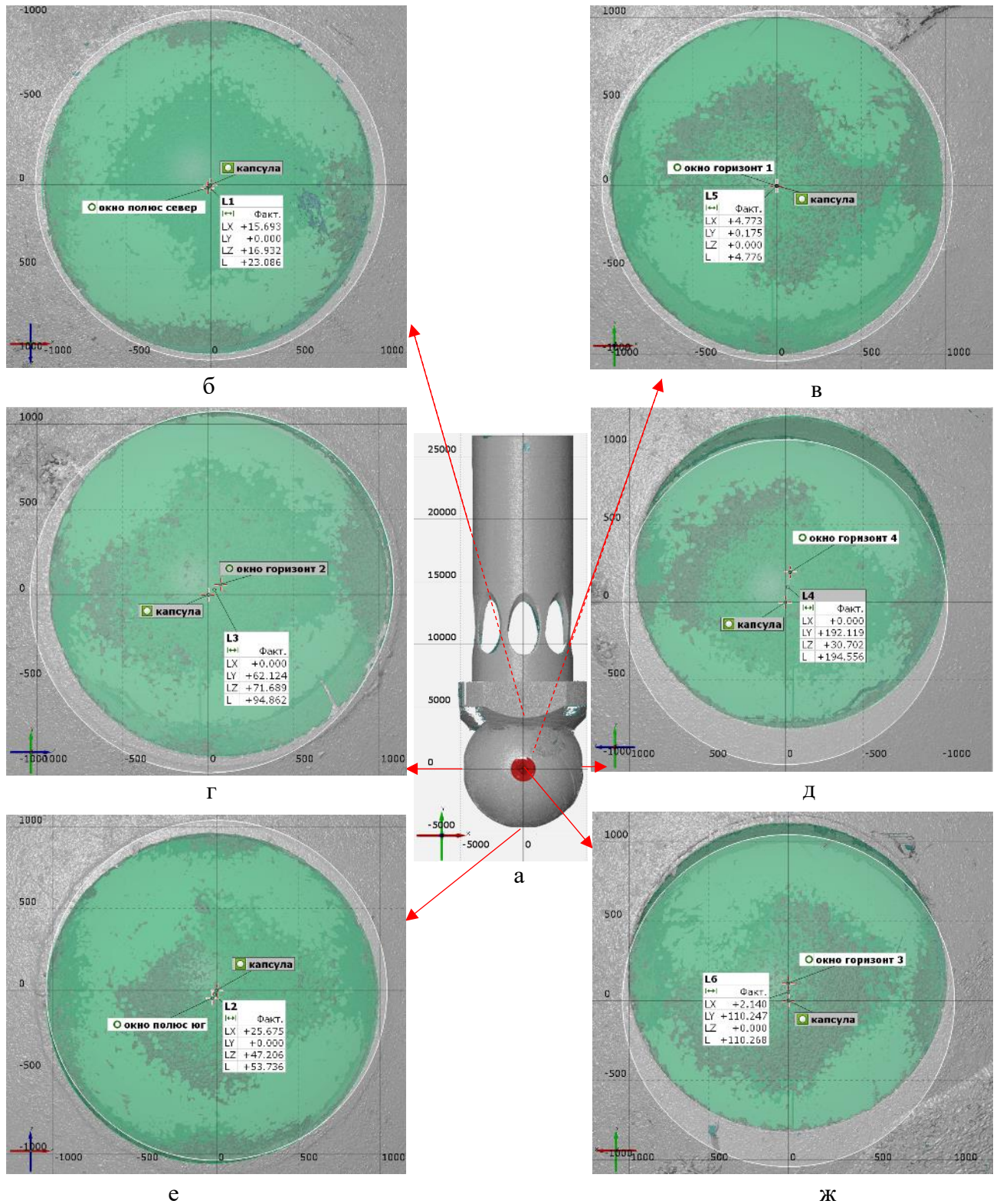


Рисунок 2.33 – Трехмерная модель КМУ. а) общий вид (красный цвет – капсула). б)-ж) – вид на капсулу со стороны шести окон бокса-конвертера: б) окно на северном полюсе, е) окно на южном полюсе; в), г), д), ж) – окна в горизонтальной плоскости бокса-конвертера. L_i ($i=1, 2, \dots, 6$) – расстояние между центром капсулы (0,0,0) и проекцией центра окна на соответствующую плоскость наблюдения. Белый контур – положение капсулы

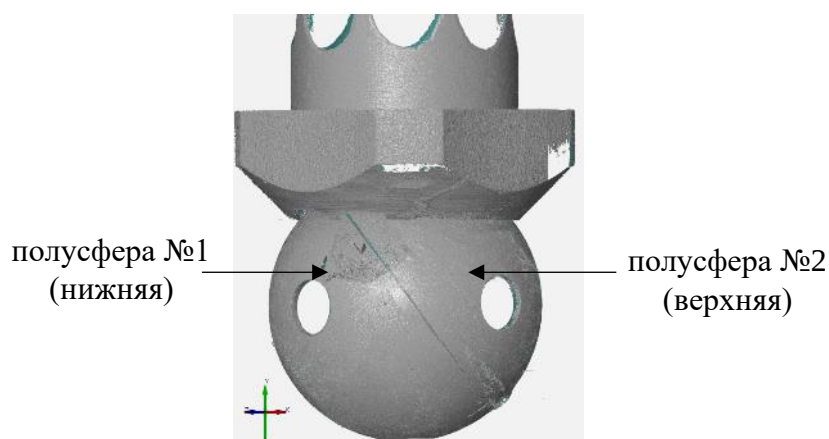


Рисунок 2.34 – Положение полусферы №1 с внешней частью замка и полусферы №2 с внутренней частью замка в КМУ

В идеальном случае полусферы бокса-конвертера с капсулой в центре должны собраться так, чтобы центры полусфер бокса-конвертера и центр капсулы находились в одной точке. В данном случае при замыкании полусфер с одной стороны возник зазор шириной до 51 мкм, который показан на рисунке 2.35, а, что привело к тому, что полусферы встали под углом друг к другу и их центры находятся на расстоянии (68 ± 2) мкм друг от друга, и не совпадают с центром капсулы, как видно на рисунке 2.35, б. Поэтому точность расположения центра капсулы относительно центра бокса-конвертера определена как расстояние между центром капсулы и точкой, располагающейся в середине отрезка, соединяющего центры полусфер, и составляет (93 ± 2) мкм. Угол между осями, построенными по центрам окон в горизонтальной плоскости бокса-конвертера, составляет $90^\circ 40' \pm 1'$, точка пересечения осей отстоит от центра капсулы на (93 ± 2) мкм и показана на рисунке 2.35, в. Эти характеристики показывают точность сборки капсулы и полусфер бокса-конвертера. Точность установки бокса-конвертера на держатель (через промежуточный элемент – манжетный фланец) характеризует угол между осью держателя и осью, проходящей через центры окон в полюсах бокса-конвертера, который составляет $23' \pm 1'$ и показан на рисунке 2.35, г. Результаты измерений сведены в таблицу 2.4.

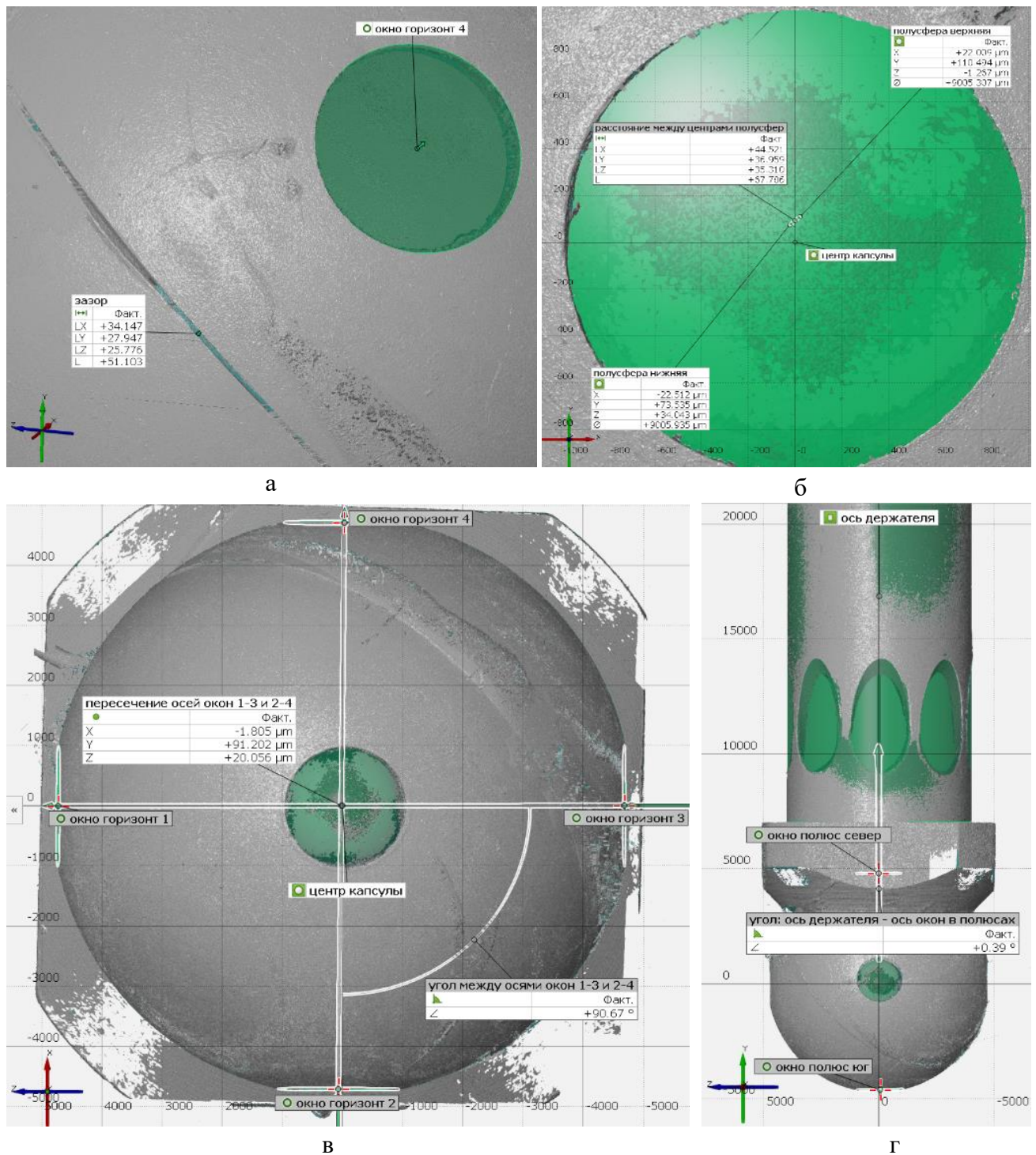


Рисунок 2.35 – Точность сборки полусфер бокса-конвертера и КМУ. а) зазор между полусферами до 51 мкм, б) положение центров полусфер относительно центра капсулы, в) угол между осями, проходящими через центры противоположных окон (1 и 3, 2 и 4) в горизонтальной плоскости бокса-конвертера, г) угол между осью держателя и осью, проходящей через центры окон в полюсах бокса-конвертера ($23' \pm 1'$)

Таблица 2.4 – Результаты измерений точности сборки КМУ

Параметр	Требования	Результаты измерений
Точность замыкания полусфер бокса-конвертера (расстояние между центрами сфер, аппроксимирующих внутренние поверхности полусфер)	-	(68 ± 2) мкм
Угол между осями, построенными по центрам окон в горизонтальной плоскости бокса-конвертера	-	$90^\circ 40' \pm 1'$
Неточность расположения центра капсулы относительно центра бокса-конвертера (расстояние между центром капсулы и точкой, располагающейся в середине отрезка, соединяющего центры полусфер)	± 30 мкм	(93 ± 2) мкм
Неточность совмещения оси держателя относительно центра окон в полюсах бокса-конвертера	± 3 мкм	Относительно центра окна в северном полюсе: (39 ± 2) мкм, центра окна в южном полюсе: (48 ± 2) мкм
Неточность совмещения оси держателя относительно оси бокса-конвертера (оси через центры окон в полюсах бокса-конвертера)	$\pm 2'$	$23' \pm 1'$

На рисунке 2.36 представлено расстояние от внешней поверхности капсулы до внутренней поверхности бокса-конвертера (до соответствующих полусфер, в которых расположена капсула), которое находится в пределах от 3,34 мм до 3,55 мм. Поскольку полусферы бокса-конвертера замкнулись под углом друг к другу и центр капсулы не совпадает с центрами полусфер, на карте расстояния отчетливо видно место стыка полусфер.

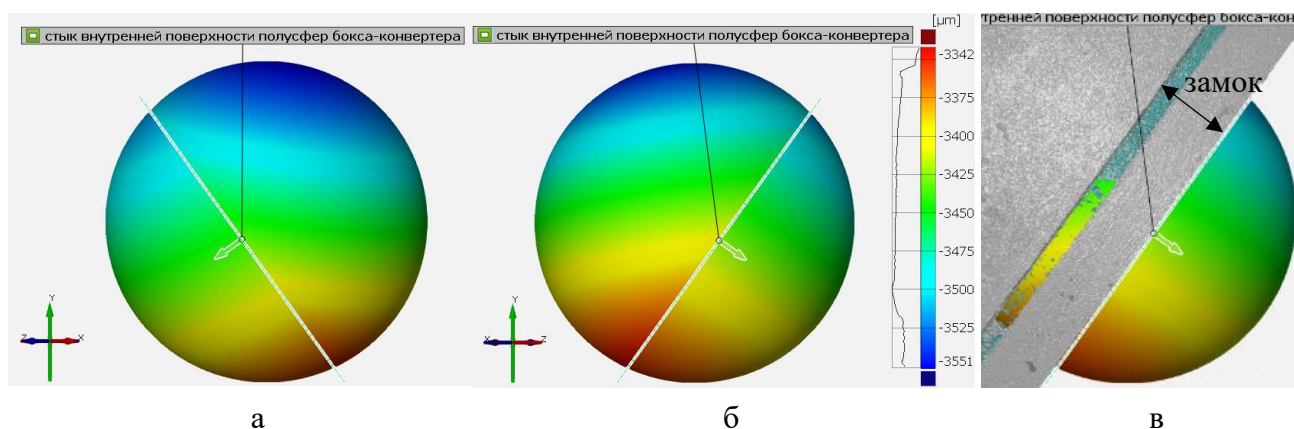


Рисунок 2.36 – Расстояние от внешней поверхности капсулы до соответствующих полусфер внутренней поверхности бокса-конвертера: а) и б) вид с двух противоположных сторон, в) вид (б) с отображением полусферы с внутренней частью замка. Плоскость отображает стык полусфер на внутренней поверхности бокса-конвертера

На рисунке 2.37 представлено расположение отверстий на держателе бокса для заведения ЛИ в окно в северном полюсе бокса-конвертера. Положения пересечений осей цилиндров, аппроксимирующих отверстия, с окном в северном полюсе бокса-конвертера отстоят от центра окна в пределах 230 мкм. Диаметры и положения центров всех окон бокса-

конвертера и центров отверстий на держателе бокса-конвертера сведены в таблицу 2.5. Эта информация позволит выполнить заведение 192 пучков ЛИ в камере взаимодействия в шесть окон бокса-конвертера по известным координатам окон после преобразования системы координат КМУ в систему координат камеры взаимодействия лазерной установки (фокус лазерных пучков находится в центре окон, как было показано на рисунке 2.26).

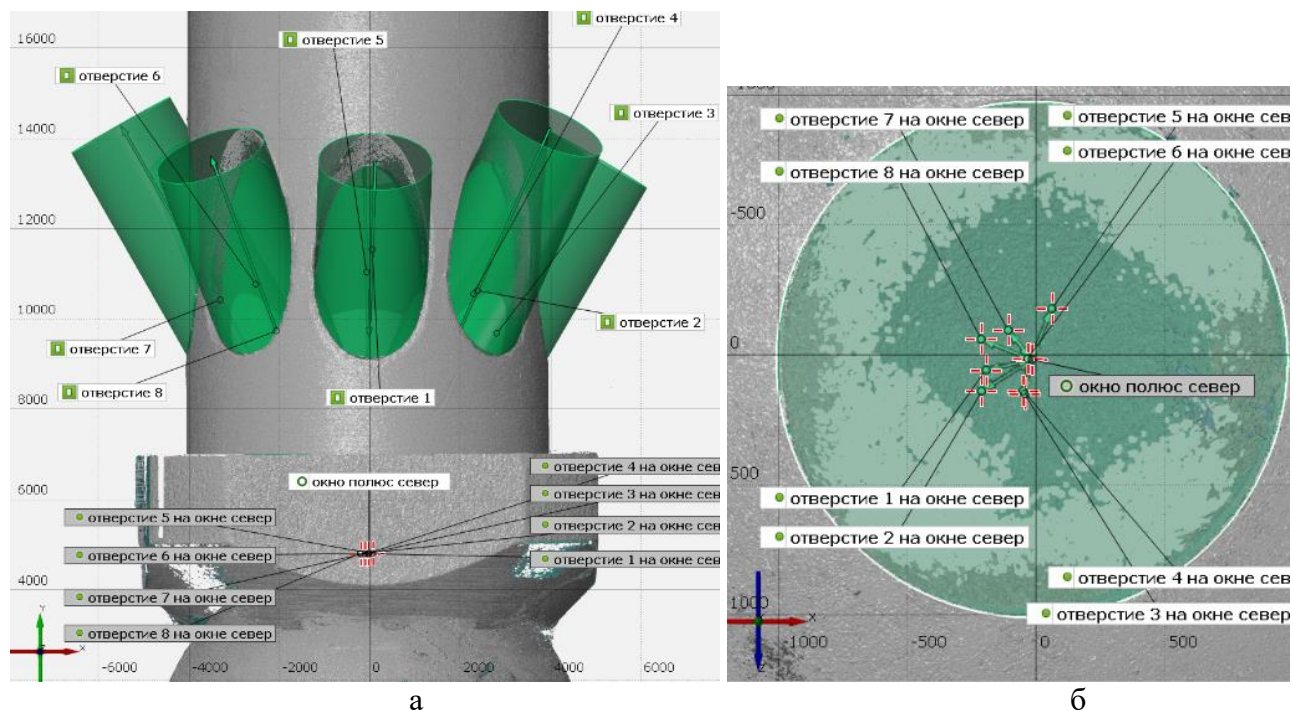


Рисунок 2.37 – Расположение отверстий на держателе бокса для заведения ЛИ в окно в северном полюсе бокса-конвертера. Красными крестами отмечены положения пересечений осей цилиндров, аппроксимирующих отверстия, с окном в северном полюсе бокса-конвертера. а) вид сбоку, б) вид сверху

Таблица 2.5 – Диаметры и расположения центров окон бокса-конвертера и отверстий держателя

Окно бокса-конвертера/ отверстие держателя	Принадлежность окна к полусфере	Диаметр, мкм	Координаты положения центра, мкм		
			x	y	z
Окно в южном полюсе	№1 (нижняя)	2025±2	0	-4624	-47
Окно 1 в горизонтальной плоскости	№1 (нижняя)	2035±2	0	0	4729
Окно 2 в горизонтальной плоскости	№1 (нижняя)	2027±2	-4719	62	72
Окно 3 в горизонтальной плоскости	№2 (верхняя)	2001±2	0	110	-4682
Окно 4 в горизонтальной плоскости	№2 (верхняя)	1998±2	4706	192	-31
Окно в северном полюсе	№2 (верхняя)	1984±2	-16	4803	17
Отверстие 1		2515±2	35	11622	3988
Отверстие 2		2513±2	2840	11678	2762
Отверстие 3		2502±2	3941	11646	-83

Отверстие 4		2539±2	2750	11670	-2850
Отверстие 5		2460±2	-70	11599	-4025
Отверстие 6		2511±2	-2914	11720	-2786
Отверстие 7		2508±2	-4043	11721	89
Отверстие 8		2501±2	-2800	11717	2895

После установки КМУ в транспортный криостат, располагающийся над камерой взаимодействия лазерной установки мегаджоульного уровня энергии, формирования и диагностики параметров твердого слоя топлива в капсуле (что будет описано в главе 3), криостат опускается в камеру взаимодействия, так чтобы капсула находилась в центре камеры, и после открытия нижней части криостата, в которой располагается КМУ, выполняется наведение 192 пучков ЛИ на окна бокса-конвертера и осуществляется лазерный выстрел, как показано на рисунке 2.38 [99].

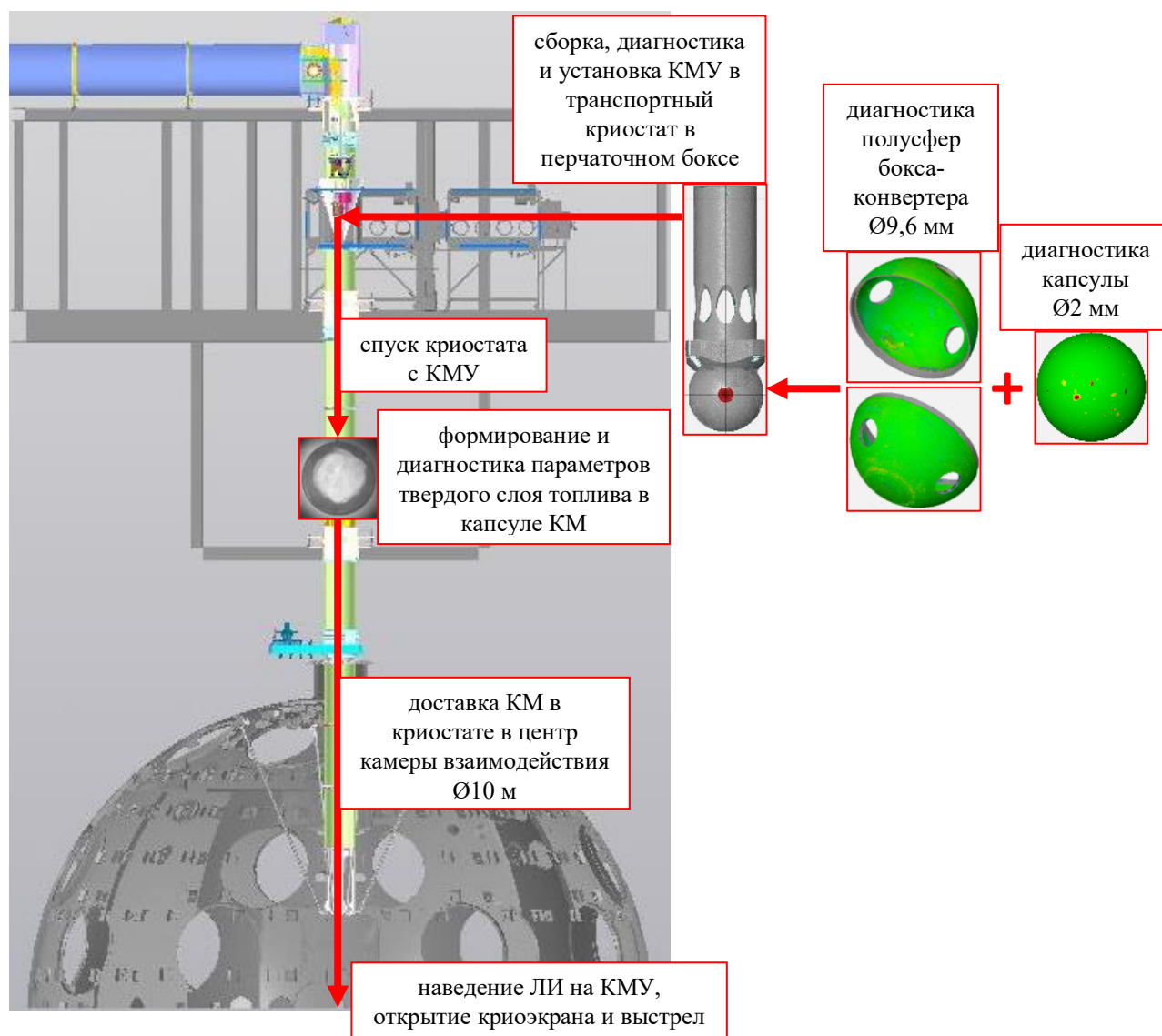


Рисунок 2.38 – Схема доставки КМ в центр камеры взаимодействия лазерной установки для эксперимента по зажиганию [100]

2.4 Заключение по главе

1. Разработана и реализована конструкция стенда измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии, автоматизированы работа стенда и обработка получаемых экспериментальных данных.

2. Показано, что широкопольный метод конфокальной микроскопии можно применять для:

- вычисления $P_{1D}(n)$ для экваториальных профилей внешней поверхности капсул, необходимых для оценки качества поверхности и выявления соответствия поверхности капсулы предъявляемым требованиям;

- вычисления $P_{2D}(l)$ полной поверхности капсулы, необходимого для численного моделирования роста неустойчивостей при сжатии КМ в эксперименте по зажиганию;

- получения трехмерной карты дефектов поверхности капсулы, необходимой при анализе процесса и результатов формирования твердого слоя топлива в капсуле, а также для исследования влияния развития неустойчивостей на локальных дефектах капсулы при сжатии криогенной мишени;

- для оптически прозрачных капсул – также для неразрушающего контроля экваториальных толщин стенки капсулы с точностью 0,5%, оценки качества внутренней поверхности капсулы при отсутствии дефектов на внешней поверхности и в объеме капсулы.

3. Разработана и реализована конструкция стенда рентгеновских измерений, позволяющая получать РФК изображение для оптически прозрачных/непрозрачных полых капсул и капсул со слоем топлива.

4. Разрешение РФК изображений составляет до 2,5 мкм/пиксель. Проанализирована видимость дефектов на РФК изображениях различных капсул. Дефекты типа «пузырьки воздуха в стенке капсулы» видны на РФК изображениях при диаметре от ≈ 9 мкм. Дефекты типа «трещины на поверхности» видны при ширине от ≈ 7 мкм, при этом визуализация трещин от внешней границы капсулы к центру заметно падает. Произвольные дефекты внешней поверхности могут отображаться частично, и определить их наличие, форму и размеры достаточно сложно, если они не попали в плоскость экватора.

5. С помощью численного моделирования показано, что по характеристическому ТК на РФК изображении полых капсулы можно вычислять толщину ее стенки с использованием полученной при решении обратной задачи взаимосвязи положения ТК и толщины стенки капсулы.

6. Показано, что РФК метод можно применять для:

- вычисления $P_{1D}(n)$ для экваториальных профилей внутренней поверхности капсулы и $P_{2D}(l)$ полной поверхности - для мод, амплитуды которых превышают размер пикселя экспериментального изображения;

- для неразрушающего контроля экваториальных толщин стенки капсул с разрешением до 2,5 мкм для реализованной конфигурации РФК системы диагностики (точность может быть повышена использованием рентгеновской камеры с большим размером матрицы).

7. Показано, что результаты измерений толщины стенки оптически прозрачных капсул методом конфокальной микроскопии и РФК методом согласуются между собой в пределах погрешностей.

8. Показано, что способ измерений параметров отдельных элементов КМУ и КМУ в целом (капсула, установленная в боксе-конвертере на держателе бокса-конвертера), основанная на оптической профилометрии «focus variation», позволяет получать полную трехмерную модель КМУ и обеспечивает измерение его параметров с точностью не хуже 10 мкм, что в свою очередь позволит завести 192 пучка ЛИ в шесть окон бокса-конвертера по известным координатам окон, не задев при этом капсулу, а также позволит выполнять численное моделирование распространения ЛИ в боксе-конвертере и распространение РИ до поверхности капсулы.

Результаты исследований, представленных в данной главе, опубликованы в [A2, A6].

Глава 3. Диагностика параметров топлива в капсуле

3.1 Экспериментальные стенды

Отработка технологии получения ТСТ в капсуле КМ проводится на двух стендах для исследования мишеней при низких температурах, представленных на рисунке 3.1 [99, 100]. Стенды состоят из исследовательского криостата со сменяемым мишенным узлом, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, системы визуального контроля, системы контроля температуры и ИК-лазера.

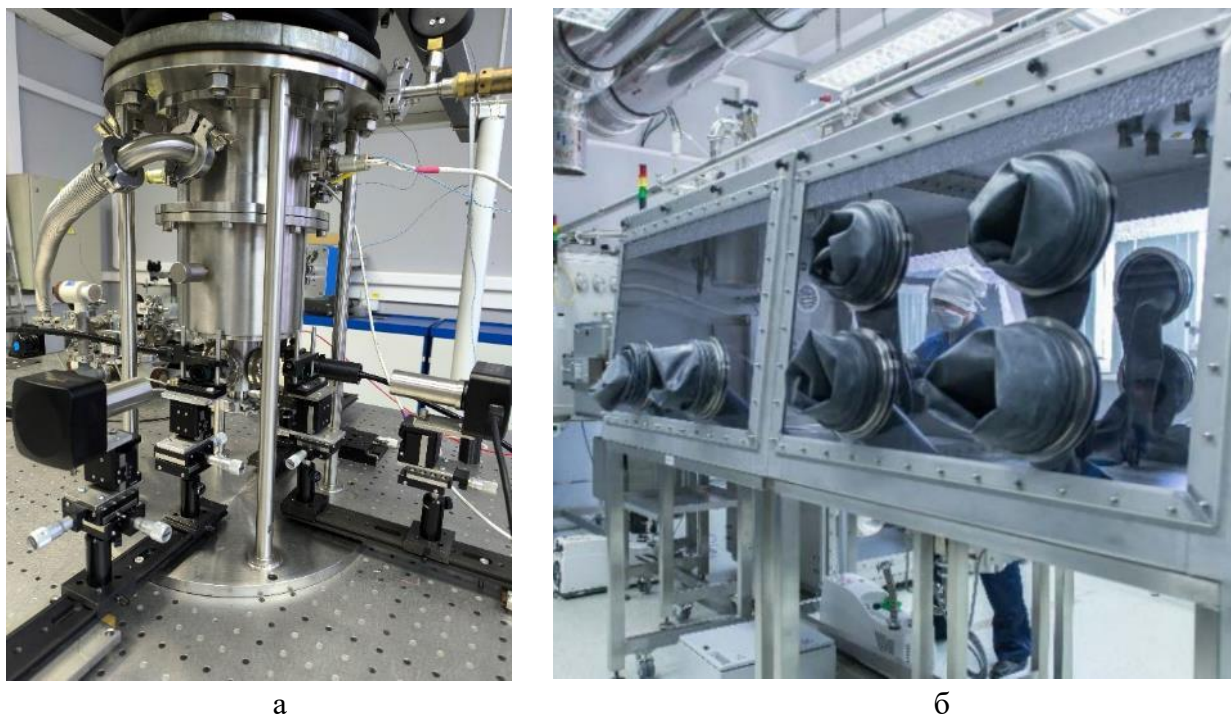


Рисунок 3.1 – Фотографии стендов для исследования мишеней при низких температурах: а) для работы с D_2 [100], б) для работы с D_2 и DT топливом [101]

На одном стенде, представленном на рисунке 3.1, а, возможна работа с нерадиоактивными изотопами водорода (D_2), что подразумевает собой формирование твердого слоя D_2 в капсуле с помощью воздействия на него ИК-излучения (имитация тепловыделения при бета-распаде в DT -слое). Соответственно, капсула должна быть прозрачна для длины волны применяемого ИК-излучения, чем и определяется ее материал: ПАМС, ПС или СН. Конструкция бокса-конвертера предполагает две взаимно перпендикулярные пары диагностических окон, поэтому криостат также имеет две взаимно перпендикулярные пары окон, позволяющие наблюдать капсулу с топливом в боксе-конвертере. На данном стенде невозможна РФК диагностика в связи с требованиями к размещению источника РИ в специально предназначенном для этого помещении, поэтому возможно применение только оптических методов диагностики.

Второй стенд для исследования мишеней при низких температурах находится в перчаточном боксе, предназначенном для работы с радиоактивным изотопом водорода, и представлен на рисунке 3.1, б. На стенде возможно использование РФК диагностики, поскольку стенд расположен в специально предназначенном для этого помещении. Поскольку имеется один источник РИ, то по другой оси возможна только ОТ диагностика. Соответственно, на данном стенде возможна работа с КМ с оптически прозрачными капсулами с D₂ или DT топливом, а также работа с непрозрачными капсулами с DT топливом. Характеристики стенда были приведены в пункте 2.1.2 об измерении параметров капсул.

Третий стенд (см. рисунок 2.38 главы 2) будет использоваться для получения КМ с последующей ее доставкой в транспортном криостате в камеру взаимодействия лазерной установки мегаджоульного уровня энергии для проведения эксперимента по зажиганию КМ.

В настоящее время отработка технологии получения ТСТ в капсуле проводится с использованием массивных боксов вместо бокса-конвертера [101]. Массивный бокс имеет сферическую внутреннюю поверхность с золотым напылением и две взаимно перпендикулярные пары диагностических окон, аналогично боксу-конвертеру, а также отверстие для заведения ИК-излучения внутрь бокса. При этом конструкция массивного бокса по сравнению с боксом-конвертером обеспечивает более равномерный тепловой контакт обеих частей бокса со столиком охлаждающей ступени криостата, на которую он устанавливается, что способствует более равномерному тепловому окружению капсулы.

Для оптической системы на данном стенде, включающей в себя две оптических теневых системы диагностики параметров ТСТ и источник ИК-излучения для формирования ТСТ, реализована возможность заведения двух различных типов излучения в соответствующие отверстия в боксе КМ, находящиеся в непосредственной близости друг от друга, что позволяет формировать ТСТ в капсуле с помощью ИК-излучения и осуществлять диагностику его параметров с помощью видимого излучения. На способ заведения зарегистрировано ноу-хау (секрет производства) «Способ ввода инфракрасного и видимого излучения в бокс криогенной мишени».

Измеренный КМУ после герметизации окон ввода ЛИ монтируется в криостат. Проведение эксперимента по получению КМ состоит из следующих основных этапов: откачка рабочего объема криостата и систем напуска газов (гелий, топливо - изотопы водорода) до 10^{-4} мбар; охлаждение КМУ до температуры выше тройной точки изотопов водорода (температура тройной точки для D₂ составляет 18,73 К, поэтому напуск D₂ осуществляется при 19 К; температура тройной точки для DT составляет 19,79 К, поэтому напуск DT осуществляется при 20 К); напуск теплообменного газа гелия в полость бокса-конвертера до 10^{-2} мбар; дозированный напуск топлива в капсулу через капилляр; понижение температуры

для кристаллизации топлива; формирование ТСТ с требуемыми характеристиками (с применением ИК-излучения для D₂ топлива).

С момента дозирования жидкого топлива необходимо постоянно осуществлять контроль параметров топлива (как жидкого, так и твердого). При использовании ОТ системы наблюдения контроль за параметрами топлива осуществляется по ОТ изображению в режиме реального времени. Схема ОТ системы наблюдения приведена на рисунке 3.2. В качестве зондирующего излучения используются коллимированные светодиодные источники: источники белого света мощностью до 4,5 Вт и источник на рабочей длине волны 625 нм и мощностью 700 мВт. Объективы используются с увеличением 2X ($NA=0,06$ и $WD=92$ мм) и с увеличением 3X ($NA=0,07$ и $WD=77,8$ мм). Характеристики используемых CMOS-камер: разрешение 4912×3684 пикселей, размер пикселя $1,25 \times 1,25$ мкм, спектральный диапазон 380-650 нм (с ИК-фильтром), скорость 5,6 кадров/с.

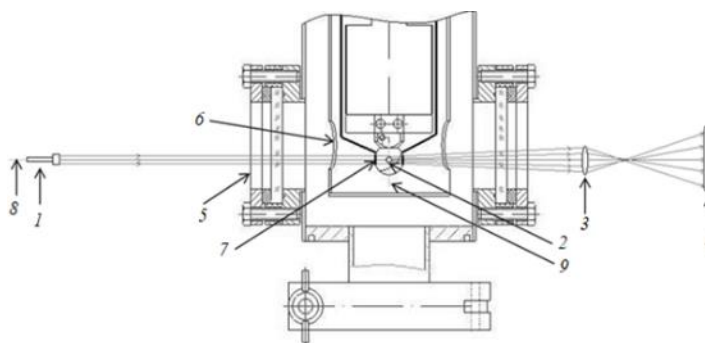


Рисунок 3.2 – ОТ схема наблюдения: 1 – светодиодный источник с коллиматором, 2 – КМ, 3 – объектив, 4 – камера, 5 – окна криостата, 6 – окна криогенного экрана, 7 – окна бокса-конвертера, 8 – оптическая ось, 9 – плоскость фокусировки объектива

ОТ система наблюдения за капсулой с топливом имеет переменное увеличение для того, чтобы при охлаждении от комнатной до рабочей температуры (наполнение жидким D₂ осуществляется при 19 К) при малом увеличении оценивать смещение КМУ (которое может достигать до 2 мм во всех направлениях) для последующего заведения коллимированного пучка ИК-лазера в дополнительное отверстие в боксе для выравнивания ТСТ, а при достижении рабочей температуры капсула была полностью видна на камере с максимально возможным увеличением.

Примеры ОТ изображений пустой капсулы, капсулы с жидким и твердым дейтерием, полученных с двух осей наблюдения в один момент времени, приведены на рисунке 3.3. На ОТ изображениях видны характерные яркие и бледные кольца (ЯК и БК), которые можно использовать для диагностики параметров топлива (жидкого и твердого), но поскольку они являются результатом прохождения видимого излучения через капсулу с топливом, нужно выявить источники этих колец и определить связь колец с положениями поверхностей КМ.

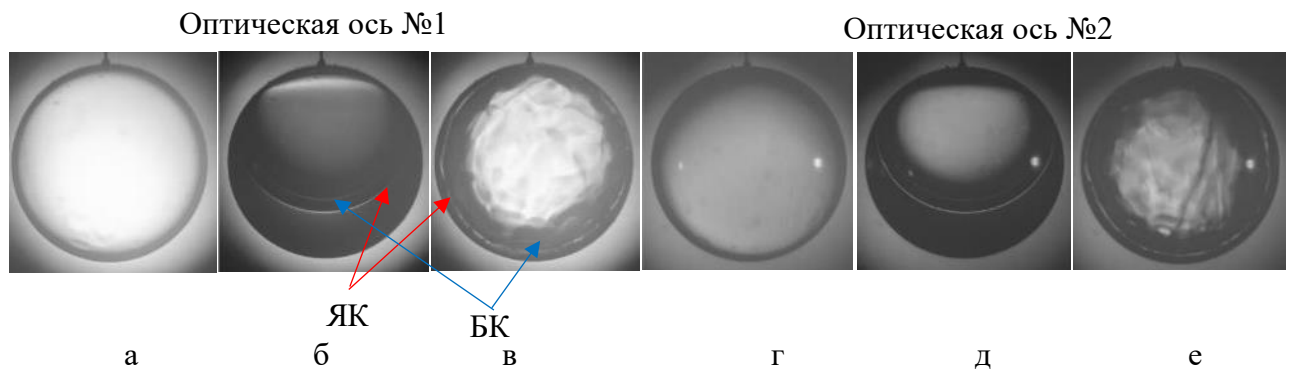


Рисунок 3.3 – Оптические теневые изображения капсулы при наблюдении с двух осей в один момент времени: а) и г) пустой, б) и д) с жидким дейтерием, в) и е) с твердым дейтерием

3.2 Численное моделирование

Для нахождения взаимосвязей положений поверхностей с характеристическими особенностями на ОТ и РФК изображениях КМ, а также для исследования влияния ряда факторов на формирование ОТ и РФК изображений КМ и, соответственно, на корректность вычисления параметров жидкого (форма поверхности, объем топлива) и твердого (СПМ внутренней поверхности, толщина и разнотолщинность слоя) топлива необходимо выполнить численное моделирование прохождения видимого и рентгеновского излучения через КМ, чему посвящены пункты 3.2.1 и 3.2.2 соответственно.

3.2.1 Оптический теневой метод

3.2.1.1 Двумерное численное моделирование распространения пучка видимого излучения через криогенную мишень

Проведено двумерное численное моделирование прохождения пучка видимого излучения через КМ методом трассировки лучей в приближении геометрической оптики, необходимое для нахождения связей положения характеристических особенностей на ОТ изображении с параметрами поверхностей КМ, а также для исследования влияния ряда факторов (несоосность оптической системы, смещение плоскости фокусировки объектива относительно экватора капсулы, влияние расходимости и длины волны источника излучения, возмущения поверхностей КМ) на формирование ОТ изображения КМ, и соответственно, на вычисление параметров жидкого и твердого топлива. Применение приближения геометрической оптики обусловлено тем, что характерные размеры КМ (диаметр ≈ 2 мм, толщина стенки капсулы от ≈ 30 мкм и выше, толщина слоя топлива от ≈ 100 мкм и выше) и поперечные размеры пучка зондирующего излучения (диаметр $\approx 2-3$ мм) значительно

превышают длину волны зондирующего излучения (белый свет / монохроматическое излучение с $\lambda=625$ нм).

Все линейные величины в дальнейшем нормируются на внешний радиус капсулы. Угол преломления луча на поверхности двух сред α_t вычисляется по закону Снеллиуса (3.1) [102]:

$$\alpha_t = \arcsin \left(\sin(\alpha_i) \cdot \frac{n_i}{n_r} \right) \quad (3.1),$$

где n_i и n_t – показатели преломления первой и второй среды, а α_i и α_t – углы падения и преломления на границе раздела сред. Если показатель преломления второй среды меньше, вычисляется угол полного внутреннего отражения (ПВО) α_{TIR} (3.2) (TIR - total internal reflection), при котором происходит ПВО. Если угол падения луча α_i больше угла ПВО α_{TIR} , то луч отражается от поверхности без потери интенсивности.

$$\alpha_{TIR} = \arcsin \left(\frac{n_t}{n_i} \right) \quad (3.2).$$

Пояснение к основам двумерного моделирования представлено на рисунке 3.4. Начало системы отсчета находится в центре $O(0, 0, 0)$ внешней поверхности капсулы. Ось x направлена вдоль направления распространения пучка лучей, ось z – по вертикали. Угол падения α_{i-1} луча на поверхность $(i-1)$ определяется углом между образующими его прямыми, то есть принадлежащей лучу прямой $A_{i-1}A_{i-2}$ и нормалью к поверхности $(i-1)$ в точке A_{i-1} (3.3), и принимает значения $\alpha_{i-1} = \gamma$, если $\gamma < \pi/2$ или $\alpha_{i-1} = \pi - \gamma$, если $\gamma > \pi/2$.

$$\gamma = \arccos \left(\frac{(x_{i-1}-x_{i-2}) dFx_{i-1} + (z_{i-1}-z_{i-2}) dFz_{i-1}}{\sqrt{(x_{i-1}-x_{i-2})^2 + (z_{i-1}-z_{i-2})^2} \sqrt{dFx_{i-1}^2 + dFz_{i-1}^2}} \right) \quad (3.3),$$

где dFx_{i-1} , dFz_{i-1} – компоненты нормали к поверхности F_{i-1} в точке A_{i-1} , полученные путем нахождения частных производных dF_{i-1}/dx , dF_{i-1}/dz уравнения поверхности $F_{i-1}(x, z)$ и последующей подстановки в них значений точки $A_{i-1}(x_{i-1}, z_{i-1})$.

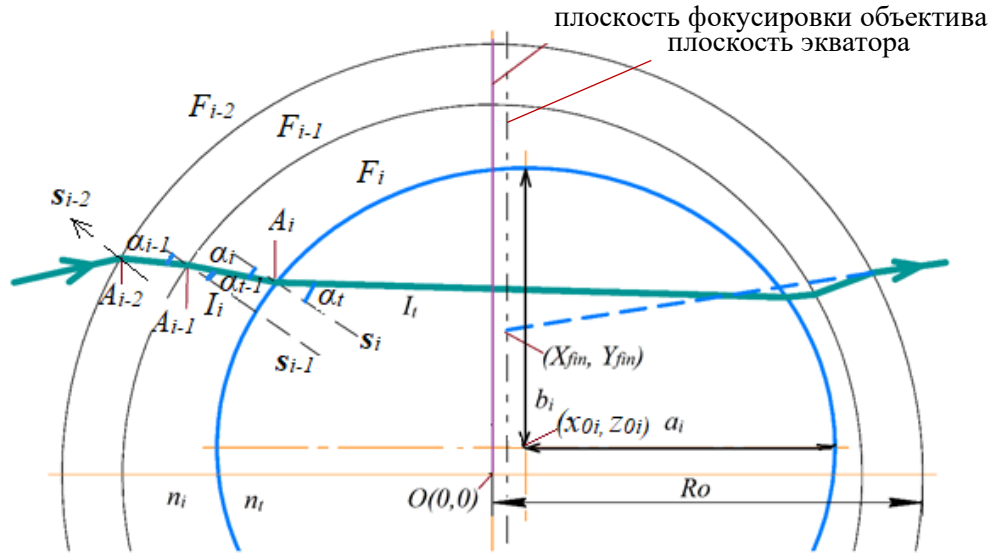


Рисунок 3.4 – Пояснение к основам двумерного моделирования. A_{i-2}, A_{i-1}, A_i – координаты пересечений луча с поверхностями F_{i-2}, F_{i-1} и F_i соответственно. s_{i-2}, s_{i-1}, s_i – нормали к поверхностям F_{i-2}, F_{i-1}, F_i в точках A_{i-2}, A_{i-1}, A_i соответственно, (x_{0i}, z_{0i}) – центр поверхности F_i . n_i и n_t – показатели преломления сред, I_i и I_t – интенсивность падающего и прошедшего луча через поверхность F_i , α_i и α_t – углы падения и преломления на поверхности F_i , α_{i-1} и α_{t-1} – углы падения и преломления на поверхности F_{i-1}

Координаты пересечения луча (x_i, z_i) с i -й поверхностью определяются решением системы уравнений (3.4). Первое уравнение – известный угол β , между прямыми $A_{i-1}A_i$ и нормалью к $(i-1)$ -й поверхности, принимающий значения угла преломления на i -й поверхности α_{t-1} или $(\pi - \alpha_{t-1})$. Второе уравнение является условием принадлежности точки (x_i, z_i) i -й поверхности.

$$\begin{cases} \beta = \arccos \left(\frac{(x_i - x_{i-1}) dFx_{i-1} + (z_i - z_{i-1}) dFz_{i-1}}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \sqrt{dFx_{i-1}^2 + dFz_{i-1}^2}} \right) \\ \frac{(x_i - x_{0i})^2}{a_i^2} + \frac{(z_i - z_{0i})^2}{c_i^2} - 1 = 0 \end{cases} \quad (3.4),$$

где (x_i, z_i) – неизвестные координаты точки A_i , (x_{i-1}, z_{i-1}) – координаты точки A_{i-1} ; dFx_{i-1}, dFz_{i-1} – компоненты нормали к поверхности F_{i-1} в точке A_{i-1} ; a_i, c_i – полуоси эллипса, описывающего поверхность F_i с центром (x_{0i}, z_{0i}) .

На основе данного моделирования разработана программа трассировки видимого излучения через КМ, в которой входными данными являются параметры КМ (материалы капсулы и топлива, температура топлива (влияет на показатель преломления топлива), параметры всех поверхностей в приближении эллипсов со смещениями центров), а также параметры ОТ наблюдения (расходимость и угол наклона пучка видимого излучения относительно оптической оси; диаметры окон бокса-конвертера, ограничивающие диаметр

входного пучка и апертуру наблюдения; число лучей ($\approx 10^3$ - 10^4 лучей), числовая апертура объектива, положение плоскости фокусировки объектива). По этим входным данным в программе моделируется профиль интенсивности на оси, куда фокусируется объектив. При условии, что КМ является симметричной относительно оси распространения излучения и угол наклона пучка относительно оптической оси равен нулю, профиль интенсивности разворачивается в ОТ изображение, в остальных случаях необходимо трехмерное моделирование для построения ОТ изображения. При задании расходимости или угла наклона пучка относительно оптической оси, отличными от нуля, число лучей пересчитывается таким образом, чтобы в результате заданное число лучей прошло через КМ. Массив лучей задается равномерно распределенным.

Определены основные группы лучей через КМ, отличающиеся наборами преломлений и отражений на поверхностях, которые показаны на рисунке 3.5. Распространение лучей вычисляется от момента входа в капсулу до момента выхода из капсулы, затем для тех лучей, которые попали в апертуру наблюдения, вычисляется пересечение с плоскостью фокусировки объектива (локализации изображения) – конечное положение Y_{fin} (в двумерном моделировании плоскостью фокусировки объектива является ось, далее обозначенная как ось X_0).

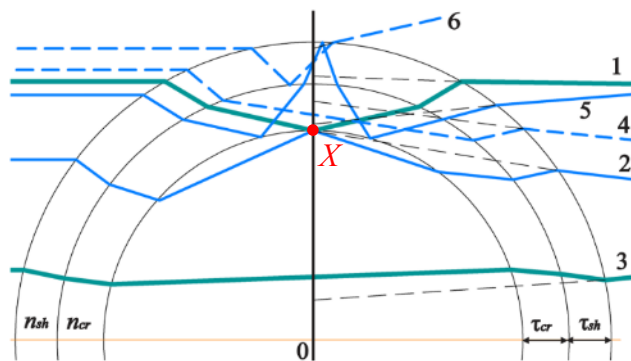


Рисунок 3.5 – Ход основных групп лучей. n_{sh} и n_{cr} показатели преломления капсулы и криослоя соответственно, τ_{sh} и τ_{cr} – толщина стенки капсулы и ТСТ соответственно, 1-6 – группы лучей с разными оптическими путями, X – исследуемая область внутренней поверхности ТСТ

Пример трассировки лучей через капсулу с ТСТ показан на рисунке 3.6. Нормированные толщины стенки капсулы и ТСТ (D_2) составляют 0,15, показатели преломления капсулы и D_2 равны 1,552 и 1,1564 соответственно, диаметр параллельного пучка зондирующего излучения и диаметр выходного окна бокса-конвертера равны 3 мм, числовая апертура объектива равна 0,14, плотность лучей составляет около 2400 (лучей на единицу внешнего радиуса капсулы) (на рисунке 3.6 число лучей уменьшено до 400 для наглядности). Первая (характеристическая) группа лучей, показанная на рис. 3.6, а, с одним ПВО от внутренней поверхности ТСТ формирует ЯК на ОТ изображении.

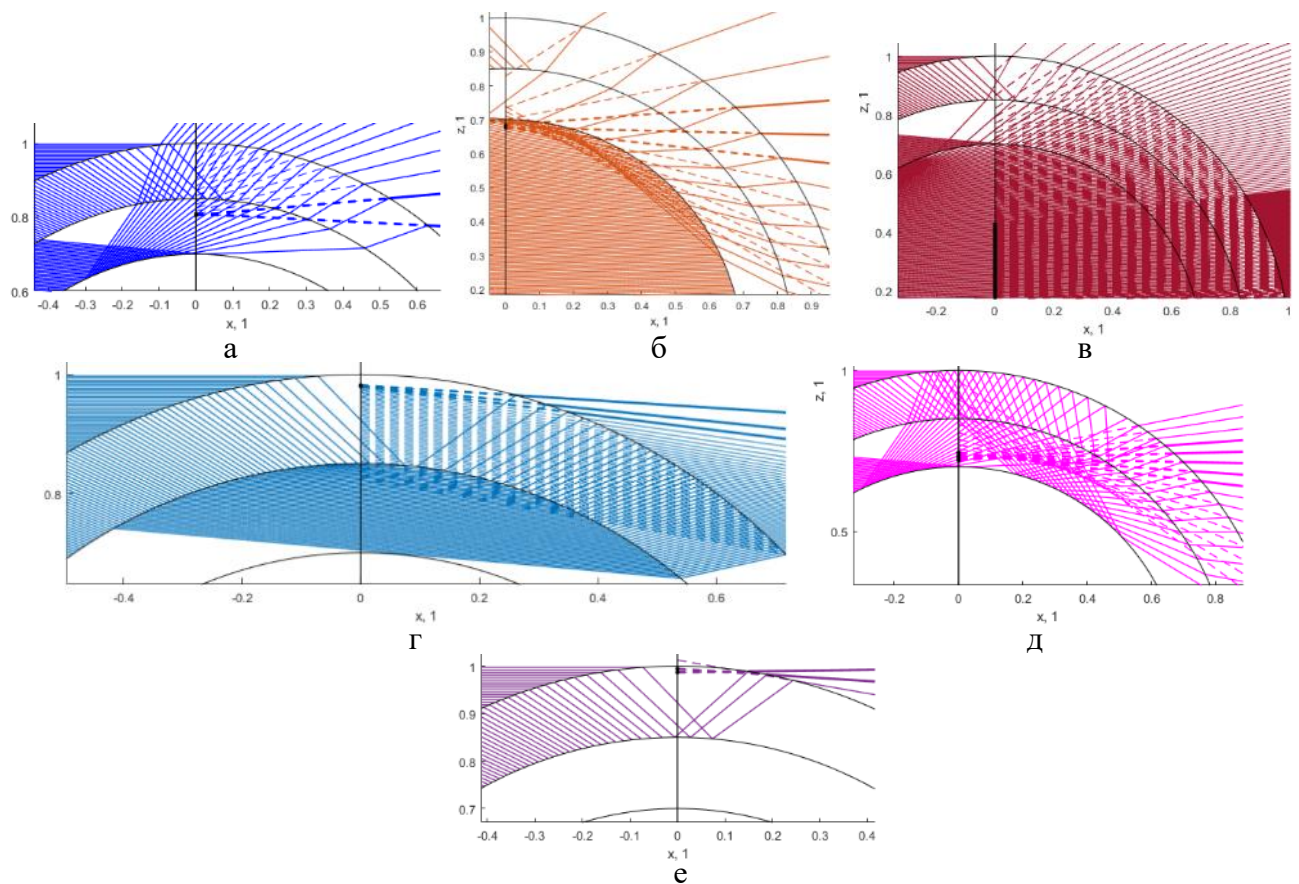


Рисунок 3.6 – Трассировка лучей через капсулу с ТСТ: а) первой группы с одним ПВО от внутренней поверхности ТСТ (со стороны ТСТ); б) второй группы с частичным внутренним отражением от внутренней поверхности ТСТ (со стороны насыщенного пара); в) третьей группы, пересекающей все поверхности; г) четвертой группы с прохождением через ТСТ без пересечения его внутренней поверхности; д) пятой группы с двумя ПВО от внутренней поверхности ТСТ (со стороны ТСТ); е) шестой группы с ПВО на внутренней поверхности капсулы. Толстыми линиями выделены лучи, вносящие вклад в формирование изображения

Вторая группа лучей, показанная на рисунке 3.6, б, с частичным отражением от внутренней поверхности ТСТ со стороны насыщенного пара формирует БК на ОТ изображении. При этом эта группа лучей исследует ту же область внутренней поверхности ТСТ, что и лучи первой группы, но при этом меньше подвержена влиянию капилляра благодаря другому пути лучей и может быть использована как характеристическая. Есть еще несколько основных групп лучей, вносящих вклад в ОТ изображение. Третья группа – центральная группа лучей, показанная на рисунке 3.6, в, последовательно проходит через все поверхности КМ и образует большое светлое пятно. Четвертая группа – преломляющаяся на поверхностях капсулы и проходящая через ТСТ, не попадая на его внутреннюю поверхность – появляется при большой апертуре наблюдения и толстом ТСТ и приведена на рисунке 3.6, г. Пятая группа лучей с двумя ПВО на внутренней поверхности ТСТ, показанная на рисунке 3.6, д, образует кольцо очень малой интенсивности и слабо заметна на ОТ изображении. Шестая

группа с ПВО на внутренней поверхности капсулы, показанная на рисунке 3.6, е, образует кольцо вблизи внешней границы капсулы и наблюдается в толстых капсулах.

Для всех лучей вычисляется интенсивность, которая меняется при каждом пересечении границ раздела. Интенсивность I_t прошедшего через границу раздела луча вычисляется по формуле Френеля: (3.5):

$$I_t = I_i \times \left(1 - \frac{1}{2} \times \left[\left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha_i - \alpha_t)}{\operatorname{tg}(\alpha_i + \alpha_t)} \right)^2 + \left(\frac{\sin(\alpha_i - \alpha_t)}{\sin(\alpha_i + \alpha_t)} \right)^2 \right] \right), \quad (3.5),$$

где I_i – интенсивность падающего луча. Поглощением в среде можно пренебречь.

На рисунке 3.7, а приведен вклад отдельных групп лучей в профиль интенсивности для рассматриваемого примера. В случае, если КМ симметрична относительно направления зондирующего излучения (оси x) и отклонение пучка от оптической оси равно нулю (осесимметричная задача относительно оси x), профиль интенсивности разворачивается в ОТ изображение.

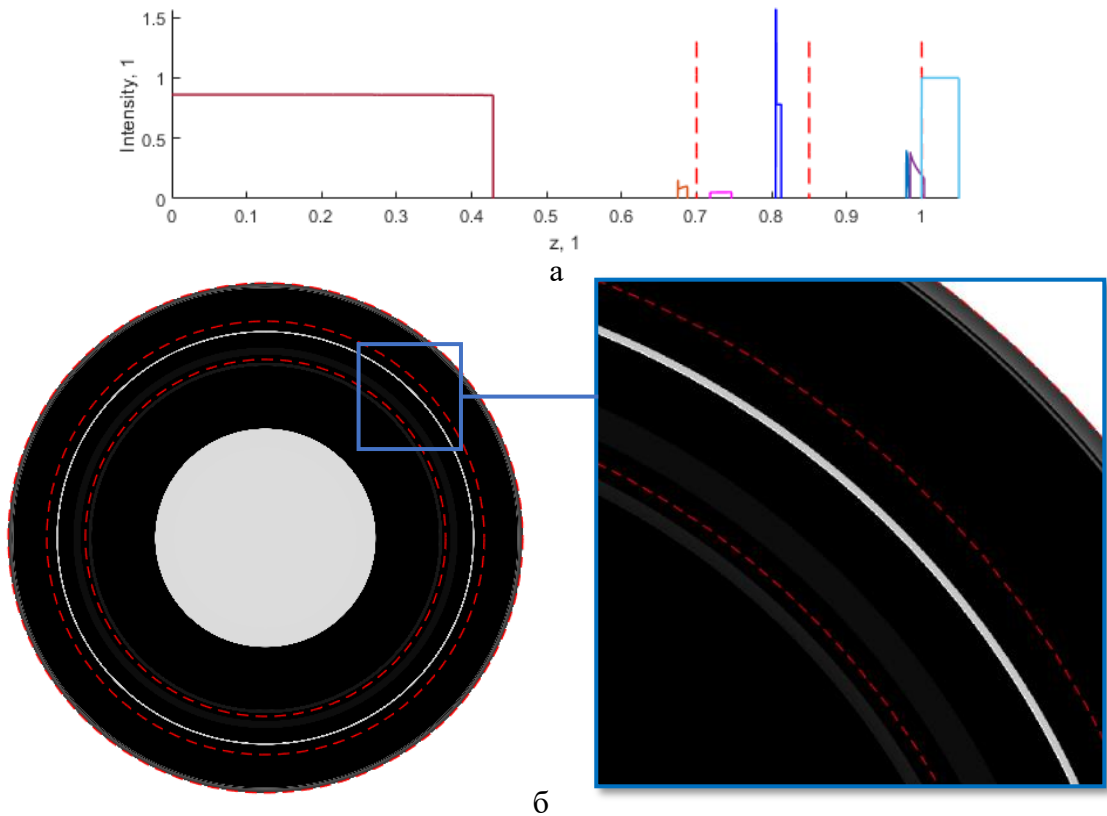


Рисунок 3.7 – Результат трассировки лучей: а) профиль интенсивности (цвета соответствуют разным группам лучей, показанным на рисунке 3.6); б) ОТ изображение. Красной штриховой линией отмечены границы капсулы и ТСТ в плоскости экватора капсулы

3.2.1.2 Решение обратных задач

Поскольку первая и вторая группы лучей зондируют внутреннюю поверхность ТСТ и образуют кольца на ОТ изображении, которые удобно использовать в качестве

характеристических, необходимо решить обратные задачи отслеживания данных групп лучей от ОТ изображения до внутренней поверхности ТСТ и получить зависимости, которые можно будет использовать при диагностике параметров топлива. Граничными условиями обратных задач являются центральная симметрия КМ и параллельный пучок зондирующего излучения без наклона относительно оптической оси (идеальный случай).

Из решения обратной задачи получена зависимость положения внутренней поверхности ТСТ от положения яркого кольца (3.6), учитывающая толщину стенки капсулы и показатели преломления капсулы и ТСТ:

$$t_{cr} = 1 - t_{sh} - \frac{R_{br}}{n_{cr} \times \cos(\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3)} \quad (3.6),$$

где t_{sh} – толщина стенки капсулы, R_{br} – радиус ЯК (br – bright ring – яркое кольцо), n_{cr} – показатель преломления ТСТ, а углы α_0 , α_1 , α_2 и α_3 определяются выражениями (3.7):

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \arcsin(R_{br}) \\ \alpha_1 &= \arcsin\left(\frac{R_{br}}{n_{sh}}\right) \\ \alpha_2 &= \arcsin\left(\frac{R_{br}}{n_{sh} \times (1 - t_{sh})}\right) \\ \alpha_3 &= \arcsin\left(\frac{R_{br}}{n_{cr} \times (1 - t_{sh})}\right) \end{aligned} \quad (3.7),$$

в которых t_{cr} – толщина ТСТ, n_{sh} – показатель преломления капсулы.

На рисунке 3.8 представлен сдвиг видимой по ЯК толщины ТСТ относительно реальной в плоскости экватора. Все величины нормированы на внешний радиус капсулы, соответственно, например, для полимерной капсулы внешним диаметром 2 мм и толщиной стенки 40 мкм, с толщиной ТСТ 200 мкм (средние рабочие величины на данный момент) видимая граница сдвинется почти на 100 мкм. Как видно, относительная толщина стенки капсулы также сильно влияет на данное смещение.

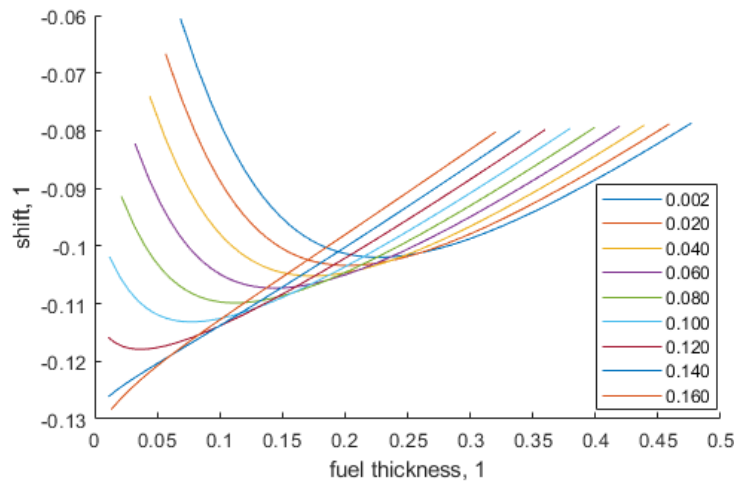


Рисунок 3.8 – Сдвиг видимой по ЯК толщины ТСТ относительно реальной в плоскости экватора для разных толщин стенки капсулы

Для второй группы лучей также решена обратная задача и получена зависимость положения внутренней поверхности ТСТ от положения БК в неявном виде (3.8), учитывающая толщину стенки капсулы и показатели преломления капсулы и топлива:

$$\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4 - 2 \times \alpha_5 + \frac{\pi}{2} = 0 \quad (3.8),$$

где R_{tr} – радиус БК (*tr* – thin ring – бледное кольцо), а углы $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и α_5 определяются выражениями (3.9):

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \arcsin(R_{tr}) \\ \alpha_1 &= \arcsin\left(\frac{R_{tr}}{n_{sh}}\right) \\ \alpha_2 &= \arcsin\left(\frac{R_{tr}}{n_{sh} \times (1 - t_{sh})}\right) \\ \alpha_3 &= \arcsin\left(\frac{R_{tr}}{n_{cr} \times (1 - t_{sh})}\right) \\ \alpha_4 &= \arcsin\left(\frac{R_{tr}}{n_{cr} \times (1 - t_{sh} - t_{cr})}\right) \\ \alpha_5 &= \arcsin\left(\frac{R_{tr}}{(1 - t_{sh} - t_{cr})}\right) \end{aligned} \quad (3.9).$$

На рисунке 3.9 представлен сдвиг видимой по БК толщины ТСТ относительно реальной в плоскости экватора.

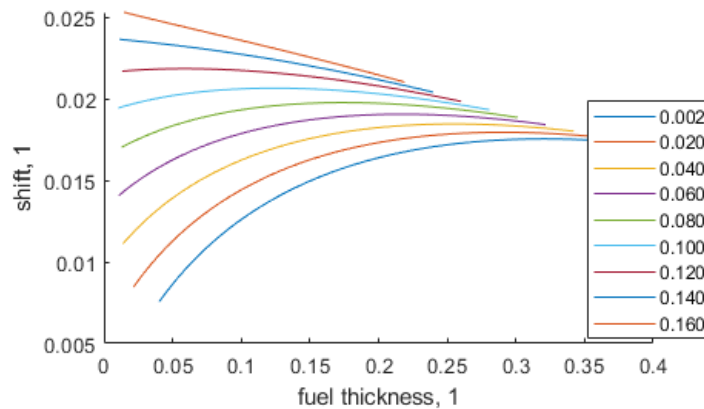


Рисунок 3.9 – Сдвиг видимой по БК толщины ТСТ относительно реальной в плоскости экватора для разных толщин стенки капсулы

При решении обратных задач не могут быть учтены возмущения поверхностей капсулы и ТСТ, а также неидеальная постановка эксперимента, поскольку в уравнения (3.6) - (3.7) и (3.8) - (3.9) добавится ряд неизвестных, и уравнения будут нерешаемыми.

3.2.1.3 Оценка возникающих ошибок при диагностике параметров твердого слоя топлива оптическим теневым методом с помощью двумерного численного моделирования

С помощью описанной программы трассировки видимого излучения через КМ исследовано влияние возмущений поверхностей капсулы и топлива, а также параметров ОТ системы наблюдения на результаты диагностики параметров ТСТ. Эта работа является важной для оценки параметров ТСТ в текущих экспериментах по отработке технологии получения

КМ с требуемыми характеристиками, поскольку исследуемые поверхности могут иметь возмущения. Кроме того, на изотермическую поверхность, которой определяется положение внутренней поверхности ТСТ, оказывают влияние вклеенный в капсулу капилляр, расположение капсулы относительно центра бокса-конвертера, наличие диагностических окон (окон ввода ЛИ), зондирующее видимое излучение, использование ИК-излучения для выравнивания твердого слоя D_2 , контакт поверхностей КМУ и столика охлаждающей ступени криостата. Поэтому получение слоя топлива с удовлетворяющими требованиям характеристиками является нетривиальной и сложной задачей, и для постановки задач на каждый следующий эксперимент необходимо определить достигнутые параметры ТСТ на данном КМУ и с использованием этой информации определить недостатки КМУ в проведенном эксперименте.

Поскольку наблюдаемое ОТ изображение является результатом преломления и отражения зондирующего излучения на поверхностях капсулы и ТСТ, возмущения поверхностей и ОТ система наблюдения могут оказывать влияние на формирование изображения, анализ которого является единственным способом определить параметры ТСТ. Это обуславливает необходимость определения корректности вычисления параметров ТСТ по ОТ изображению и установления случаев, в которых ОТ метод неприменим или требует дополнительных расчетов.

Поскольку используемая модель является двумерной, ее можно использовать только в случаях, когда задача может быть сведена к осесимметричной относительно направления распространения зондирующего излучения. Для не осесимметричных случаев для понимания порядков величин потенциальных ошибок при вычислении параметров слоя топлива могут быть оценены потенциальные ошибки в двух точках: на пересечении плоскости моделирования и плоскости фокусировки объектива с поверхностью ТСТ – точка X , обозначенная на рисунке 3.5, и симметричная ей относительно оси x точка. Но поскольку выполнять диагностику параметров ТСТ необходимо во всей плоскости фокусировки объектива, требуется трехмерное моделирование, которое рассмотрено в пунктах 3.2.1.4 – 3.2.1.5. Тем не менее, двумерное моделирование является удобным инструментом как минимум для выявления критичных факторов.

Для заданных параметров КМ и ОТ системы наблюдения в программе трассировки излучения моделируется профиль интенсивности на оси локализации изображения. На профиле интенсивности отображаются смоделированные положения ЯК и БК, $r_{як}$ и $r_{бк}$ (на оси X_0 , относительно положения границ КМ на этой же оси).

По этим смоделированным положениям ЯК и БК ($r_{як}$ и $r_{бк}$) выполняется обратное вычисление: с помощью зависимостей (3.6) - (3.7) и (3.8) - (3.9), полученных при решении

обратной задачи, вычисляется толщина ТСТ на оси X_0 , как будто она неизвестна. Т.е., получаются два независимых вычисления толщины ТСТ по двум разным кольцам: $t_{як}$ и $t_{бк}$ (или соответствующие радиусы внутренней поверхности слоя - $R_{ср\ як}$ и $R_{ср\ бк}$). При варьировании одного из переменных параметров наблюдается влияние этого параметра на точность вычисления толщины ТСТ $t_{як}$ и $t_{бк}$. При сравнении вычисленной по ЯК толщины твердого слоя топлива $t_{як}$ с изначально заданной толщиной t_0 получается ошибка вычисления толщины по ЯК, $\Delta t_{як}$. Аналогично, при сравнении вычисленной по БК толщины твердого слоя топлива $t_{бк}$ с изначально заданной толщиной t_0 получается ошибка вычисления толщины по БК, $\Delta t_{бк}$. Эти ошибки и накладывают ограничения на границы применимости оптического теневого метода.

Основными константами в исследовании, определяющимися текущими средними рабочими параметрами, являются диаметр капсулы 2000 мкм, толщина стенки капсулы 30 мкм, толщина ТСТ 200 мкм, числовая апертура объектива 0,06, плотность лучей примерно 10^3 (лучей на внешний радиус капсулы). Уравнения поверхностей капсулы и внутренней поверхности ТСТ описываются уравнением эллипса. Все линейные величины далее нормированы на внешний радиус капсулы.

В качестве примера на рисунке 3.10 приведена иллюстрация ошибки вычисления положения внутренней поверхности ТСТ при наличии смещения x_{03} данной поверхности вдоль оптической оси к источнику освещения. В идеальном случае, когда все поверхности являются сферическими и концентрическими, реальная толщина ТСТ на оси X_0 составляет $t_0=0,200$. Вычисленные по ЯК и БК толщины слоя топлива совпадают с реальной ($t_{як}=t_{бк}=t_0=0,200$), как видно на рисунке 3.10, а. Соответствующие положения внутренней поверхности слоя топлива на оси X_0 составляют $R_{ср\ як}=R_{ср\ бк}=R_0=0,770$. В случае, если все поверхности КМ являются сферическими, но центр внутренней поверхности ТСТ смещен на $x_{03}=0,05$ к источнику освещения, положение внутренней поверхности ТСТ на оси X_0 составляет 0,768, как видно на рисунке 3.10, б). Положения ЯК и БК значительно сместились по отношению к внешней поверхности капсулы. Вычисленное по зависимостям (3.6) - (3.7) и (3.8) - (3.9) положение внутренней поверхности ТСТ по ЯК составляет $R_{ср\ як}=0,804$ (т.е. ошибка $\Delta t_{як}=0,036$), по БК – $R_{ср\ бк}=0,755$ (ошибка составляет $\Delta t_{бк}=0,013$). Такая ошибка при оценке положения поверхности является большой, поэтому прямое использование метода будет некорректным. Следует отметить, что для выявления, как минимум, наличия данного смещения необходимо наблюдение со второй ортогональной оптической оси. Важной целью исследования таких возникающих ошибок является учет потенциальных ошибок при диагностике параметров ТСТ по ОТ изображению, поскольку ЯК и БК являются единственным средством диагностики параметров слоя топлива в капсуле.

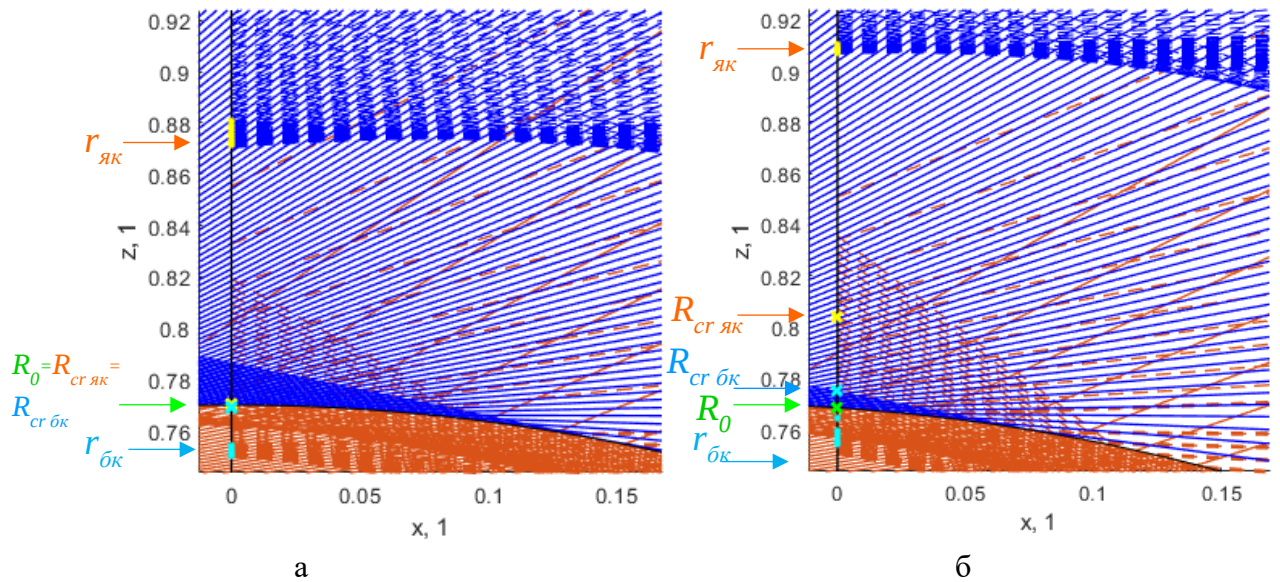


Рисунок 3.10 – Влияние смещения центра x_{03} сферической внутренней поверхности ТСТ (мода $l=1$) вдоль оптической оси на формирование ЯК и БК: а) пример с трассировкой лучей при $x_{03}=0$; б) пример с трассировкой лучей при $x_{03}=-0,050$ (смещение к источнику освещения)

Влияние смещения центра внутренней поверхности ТСТ x_{03} (мода $l=1$) вдоль оптической оси исследовано в диапазоне смещения от $-0,100$ до 0 в сторону источника освещения и от 0 до $0,100$ в сторону объектива, как показано на рисунке 3.11, а, что соответствует неконцентричности от 0 до 7% . Неконцентричность определяется по формуле (3.10) [94]:

$$nonconc = \frac{x_{03}}{d_{aver}} \times 100\% \quad (3.10),$$

где d_{aver} – средний диаметр поверхности. Наличие данного возмущения значительно влияет на ширину ЯК на оси X_0 , как видно на рисунке 3.11, б: ширина ЯК уменьшается при смещении x_{03} в сторону источника освещения и увеличивается при смещении x_{03} в сторону объектива. На рисунке 3.11, в приведены зависимости ошибки вычисления толщины ТСТ с учетом разных толщин стенки капсулы t_{sh} при постоянном объеме ТСТ V_f для разных V_f при постоянной t_{sh} . Как видно, при смещении к источнику освещения вычисленная толщина занижается, а при смещении к объективу вычисленная толщина завышается. Таким образом, как видно на рисунке 3.11, в, при наличии смещения вдоль оптической оси вычисление по БК потенциально будет содержать меньшую ошибку, чем по ЯК. При этом смещение к объективу не так критично, как к источнику освещения. По ширине ЯК можно предположить, куда смещена поверхность, поскольку при смещении к объективу кольцо сильно размывается относительно своей стандартной ширины, а при смещении к источнику – сужается.

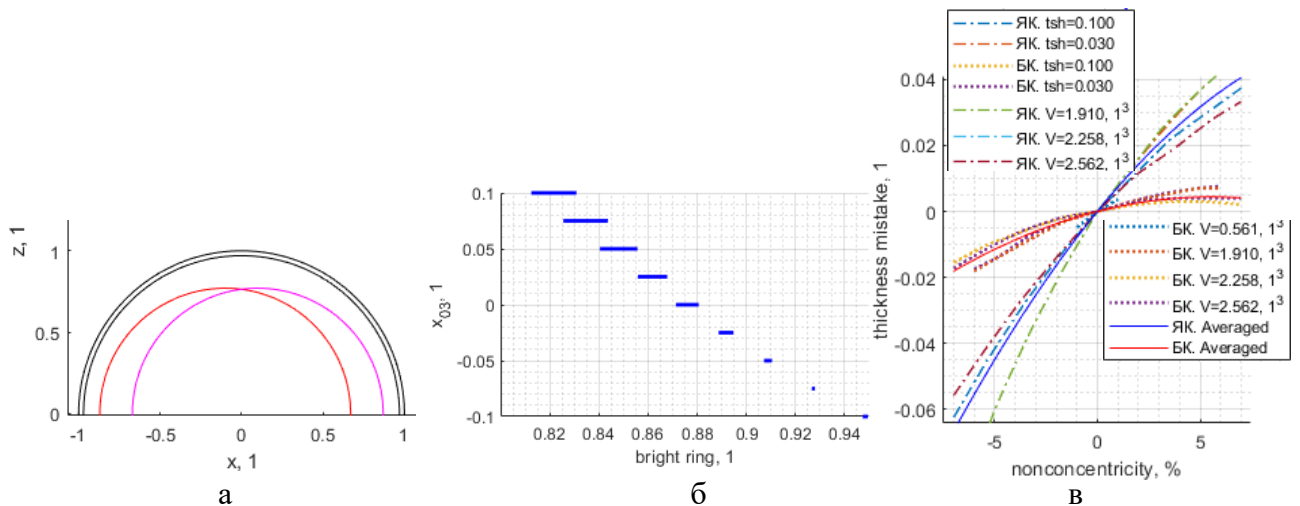


Рисунок 3.11 – Влияние смещения центра x_{03} сферической внутренней поверхности ТСТ (мода $l=1$) вдоль оптической оси на формирование ЯК и БК: а) иллюстрация смещения; б) положение и ширина ЯК на оси X_0 при толщине капсулы $t_{sh}=0,030$, объеме твердого топлива $V_f=1,210$ (в единицах внешнего радиуса капсулы в кубе, т.е. $1^3=1$) и x_{03} от -0,100 до 0,100; в) ошибка вычисления толщины ТСТ по ЯК и БК для разных t_{sh} (при постоянном V_f); ошибка для разных V_f (при постоянной t_{sh}); итоговая ошибка, усредненная по разным t_{sh} и разным V_f (синяя кривая – по ЯК, красная – по БК). Для наглядности на графике области $nonconc < 0$ соответствует $x_{03} < 0$

Если есть ОТ изображение КМ со второй оптической оси в этот же момент времени, на которой видно смещение внутренней поверхности твердого слоя топлива вдоль первой оптической оси, то можно оценить величину этого смещения (по второму ОТ изображению) и сделать поправку к вычисленной толщине криослоя (по первому ОТ изображению) с учетом потенциальной ошибки. Таким образом данные расчетно-теоретические исследования можно применять для диагностики параметров ТСТ. Эти оценки справедливы при наличии одного рассматриваемого фактора, в случае присутствия дополнительных факторов необходимо рассматривать интегральное влияние факторов на формирование профиля интенсивности.

Подобным образом проведено сравнительное исследование влияния ряда факторов на положение характеристических колец на оси X_0 и, соответственно, на вычисление положения внутренней поверхности ТСТ на этой оси по ЯК и БК.

Исследовано смещение центра внутренней поверхности капсулы (мода $l=1$) вдоль оптической оси: $nonconc$ от 0% до 4%, что соответствует от $x_{02}=-0,015$ до $x_{02}=0,015$ для капсулы с толщиной стенки 0,030 и от $x_{02}=-0,070$ до $x_{02}=0,070$ для капсулы с толщиной стенки 0,100. На рисунке 3.12 приведены зависимости ошибки вычисления толщины ТСТ для разных толщин стенки капсулы t_{sh} при постоянном объеме ТСТ V_f и для разных V_f при постоянной t_{sh} . Как видно, при $x_{02} < 0$ (смещение центра поверхности к источнику освещения) вычисленная толщина занижается, а при $x_{02} > 0$ (смещение центра поверхности к объективу) вычисленная толщина завышается. При этом в случаях малого объема топлива ($V_f=0,561$ на рисунке 3.12,

соответствующий толщине твердого слоя топлива 0,040) ошибка, очевидно, больше, но поскольку ЯК находится вблизи внешнего края капсулы (что будет описано ниже), то оно не может быть использовано в этом случае для определения толщины ТСТ и при усреднении этот случай не учтен.

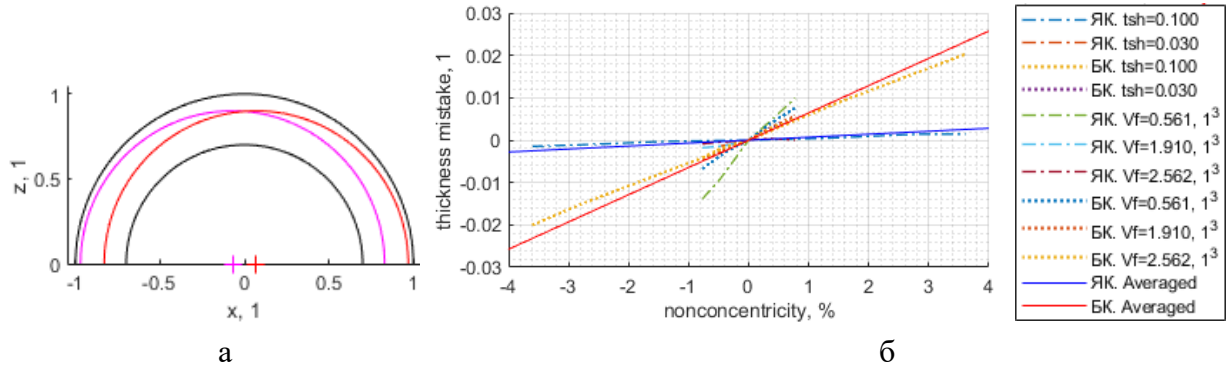


Рисунок 3.12 – Влияние смещения центра x_{02} сферической внутренней поверхности капсулы (мода $l=1$) вдоль оптической оси на формирование ЯК и БК: а) иллюстрация смещения; б) ошибка вычисления толщины ТСТ по ЯК и БК для разных t_{sh} (при постоянном V_f); ошибка для разных V_f (при постоянной t_{sh}); итоговая ошибка, усредненная по разным t_{sh} и разным V_f (синяя кривая – по ЯК, красная – по БК). Для наглядности на графике области $nonconc < 0$ соответствует $x_{02} < 0$

Наличие данного возмущения можно определить по ОТ изображению пустой капсулы с ортогональной оптической оси. На рисунке 3.13 приведено смоделированное ОТ изображение полой капсулы с толщиной стенки 0,030 при фокусировке объектива на экватор капсулы, при этом положение видимого кольца отличается от положения внутренней поверхности капсулы. Видно, что всего образуются три кольца: два кольца от группы лучей с одним и с двумя ПВО на внутренней поверхности капсулы (они сливаются с внешней границей капсулы) и кольцо от группы лучей с частичным внутренним отражением от внутренней поверхности капсулы (со стороны полости в капсуле). Для последнего кольца решена обратная задача и получена зависимость (3.11) в неявном виде, учитывающая и показатель преломления капсулы:

$$\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_2 - 2\alpha_3 + \frac{\pi}{2} = 0 \quad (3.11),$$

где углы α_0 , α_1 , α_2 и α_3 определяются выражениями (3.12)

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \arcsin(R_r) \\ \alpha_1 &= \arcsin\left(\frac{R_r}{n_{sh}}\right) \\ \alpha_2 &= \arcsin\left(\frac{R_r}{n_{sh} \times (1 - t_{sh})}\right) \\ \alpha_3 &= \arcsin\left(\frac{R_r}{n_0 \times (1 - t_{sh})}\right) \end{aligned} \quad (3.12),$$

а R_r – радиус кольца. Уравнения (3.11) - (3.12) позволяют определять толщину стенки капсулы в плоскости фокусировки объектива (экватора капсулы).

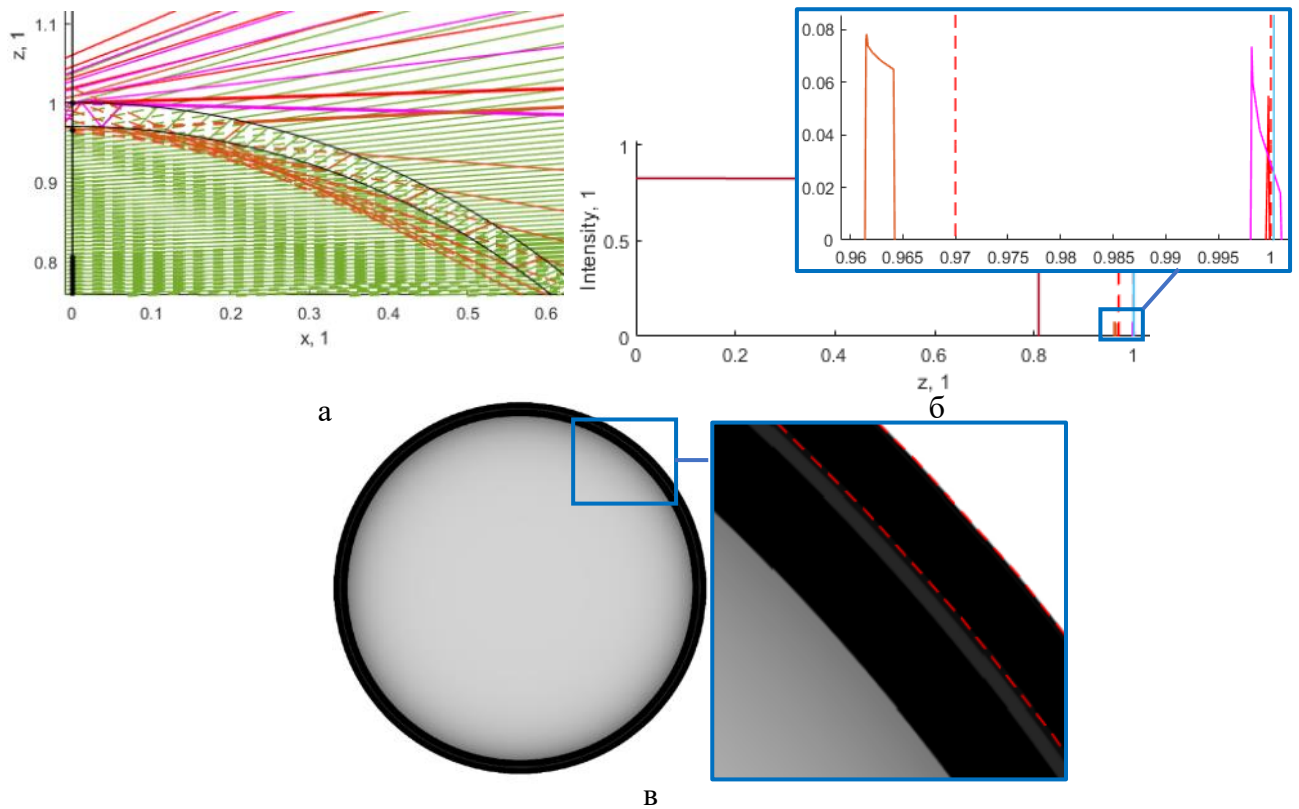


Рисунок 3.13 – Моделирование ОТ изображения пустой капсулы: а) трассировка лучей; б) профиль интенсивности на оси X_0 ; в) изображение (красной штриховой линией показаны реальные поверхности капсулы в плоскости фокусировки объектива)

Измерение толщины капсулы по оптическому теневому изображению не используется как самостоятельный метод при измерении параметров капсул, поскольку уступает в разрешении методу конфокальной микроскопии, но вполне может использоваться для оценки толщины стенки капсулы в плоскости экватора при диагностике параметров ТСТ в этой плоскости. На рисунке 3.14 представлены зависимость толщины стенки капсулы от радиуса кольца, и поправка, равная разнице радиуса внутренней поверхности капсулы и радиуса кольца.

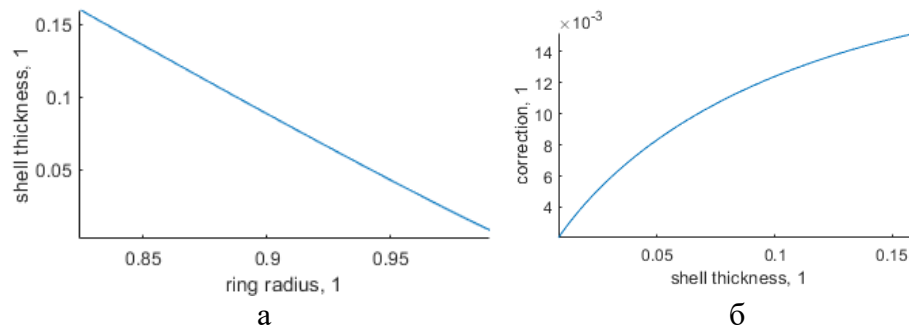


Рисунок 3.14 – Связь реальной толщины стенки капсулы с видимой толщиной по кольцу:
 а) график зависимости толщины стенки t_{sh} от радиуса кольца R_r ,
 б) $correction = R_{sh} - R_r$ – смещение положения внутренней поверхности капсулы
 $R_{sh} = 1 - t_{sh}$ относительно видимого по кольцу R_r

Толщина капсулы не влияет на определение толщины ТСТ, хотя при увеличении толщины капсулы ЯК заметно сужается, как видно на рисунке 3.15. Толщину капсулы можно оценить по наблюдаемому кольцу на ОТ изображении пустой капсулы с помощью уравнений (3.11) - (3.12) при толщине стенки капсулы более 0,010, когда кольцо не сливается с внешней границей капсулы.

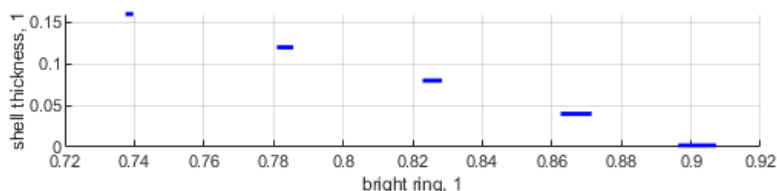


Рисунок 3.15 – Влияние толщины капсулы на положение и ширину ЯК на ОТ изображении КМ

При толщине ТСТ до 0,050 (при толщине капсулы 0,030) ЯК находится вблизи внешней границы капсулы, поэтому необходимо определить минимальное разрешаемое расстояние на ОТ изображении для используемых объективов. По критерию Релея [103] минимальное разрешаемое расстояние составляет: для объектива с числовой апертурой 0,06 – 5,0 мкм в видимом свете и 6,4 мкм для 625 нм; для объектива с числовой апертурой 0,14 – 2,2 мкм в видимом свете и 2,7 мкм для 625 нм, где 625 нм – рабочая длина волны имеющегося светодиодного источника зондирующего излучения, которая находится вблизи минимума поглощения D_2 (поскольку слой топлива становится тоньше вдоль оптической оси из-за нагрева от источника излучения) [24]. То есть, при толщинах ТСТ менее 0,050 ЯК будет неразрешаемо от внешней границы капсулы и не может быть использовано для вычисления толщины ТСТ. Во всех остальных случаях при толщинах слоя от 0,010 до 0,300 вычисленная толщина слоя по ЯК и БК не содержит ошибки.

Апертура наблюдения определяется числовой апертурой имеющихся объективов. На выбор объективов накладывает ограничение минимальное рабочее расстояние, равное 50 мм, определяемое размерами криостата (криомишень располагается в криостате, а объектив – за пределами криостата, как было показано на рисунке 3.2). Угловые апертуры окон используемого бокса-конвертера, окон криоэкрана и окон криостата не накладывают ограничения на апертуру наблюдения. При увеличении апертуры наблюдения от 0,06 до 0,14 ЯК размывается во внешнюю сторону, а на внутреннем крае ЯК увеличивается интенсивность. БК размывается в обе стороны. Ошибка вычисления толщины слоя топлива как по ЯК, так и по БК при использовании имеющихся объективов отсутствует.

В случае, если зондирующий пучок излучения не является квазипараллельным, он обрезается стенкой бокса (окна бокса имеют диаметр от 2 до 3 мм), при этом расходимость

попадающего на капсулу пучка уменьшается, как видно на рисунке 3.16. В результате толщина ТСТ как по ЯК, так и по БК определяется верно.

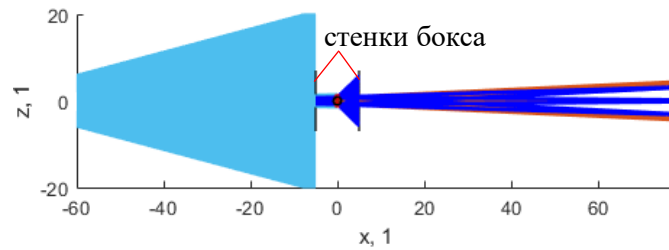


Рисунок 3.16 – Обрезание расходящегося пучка зондирующего излучения стенкой бокса для используемых боксов и ОТ системы

Длина волны зондирующего излучения должна быть близкой к 625 нм для исключения влияния зондирующего излучения на качество криогенного слоя топлива. Показатели преломления капсулы и топлива зависят от длины волны излучения. В литературе приведены значения показателя преломления для разных длин волн только для DT-топлива и полимера [82]. В пункте 1.3.5 эти значения были экстраполированы на видимый диапазон. Выполнено сравнение смоделированных профилей интенсивности для длин волн 400 нм и 700 нм соответственно. Как видно на рисунке 3.17, применение источника белого света приводит к уширению ЯК, БК и светлого пятна, но поскольку в зависимостях (3.6) - (3.7) и (3.8) - (3.9) учитываются показатели преломления, ошибки вычисления толщины слоя топлива не возникает.

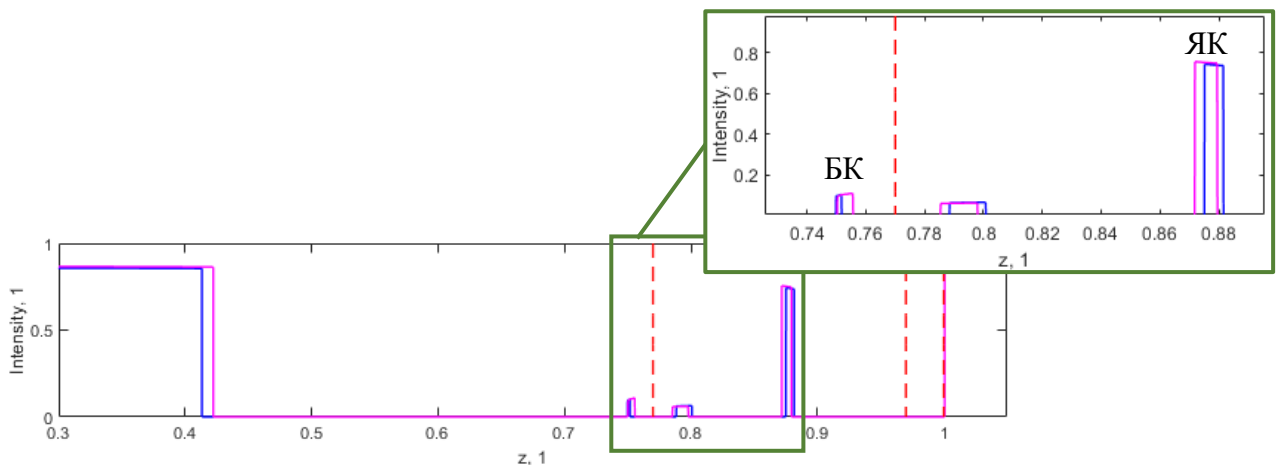


Рисунок 3.17 – Влияние дисперсии на формирование профиля интенсивности на оси X_0 . Синий цвет – 400 нм, розовый цвет – 700 нм

Исследовано влияние смещения плоскости фокусировки объектива относительно экватора капсулы (средней плоскости, проходящей через центр ее внешней поверхности и перпендикулярной оптической оси) от $shift=-0,1$ (к источнику излучения) до $shift=0,1$ (к объективу). Как видно на рисунке 3.18, смещение приводит к уширению или сужению ЯК и БК, в зависимости от направления сдвига. По рисунку 3.18, видно, что при фокусировке объектива на экватор капсулы ширина ЯК в два раза больше ширины БК, что удобно

использовать для поиска правильной плоскости фокусировки объектива при настройке ОТ системы.

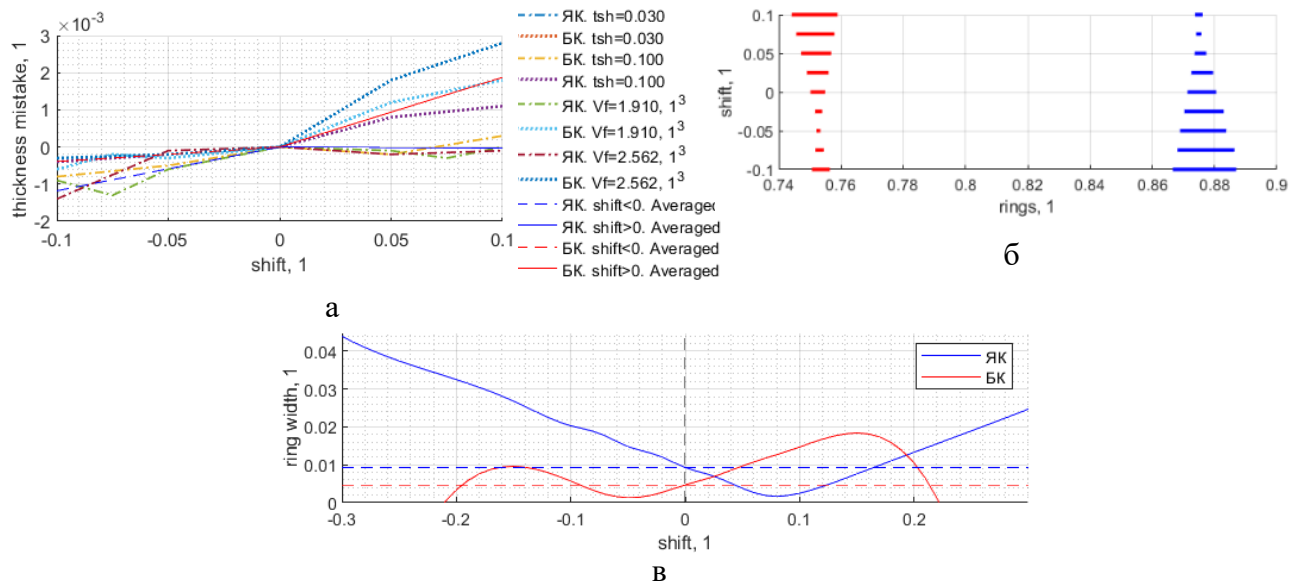


Рисунок 3.18 – Влияние смещения плоскости фокусировки объектива относительно экватора капсулы на положение и ширину ЯК и БК. а) ошибка вычисления толщины ТСТ по ЯК и БК для разных толщин стенки капсулы t_{sh} (при постоянном V_f), ошибка для разных V_f (при постоянной t_{sh}); итоговая ошибка, усредненная по разным t_{sh} и разным V_f (синяя кривая – по ЯК, красная – по БК). б) положение и ширина ЯК и БК для разных смещений $shift$; в) ширина ЯК и БК для поиска экватора капсулы на ОТ изображении

При наличии следующих возмущений - смещение центров внутренних поверхностей ТСТ z_{03} ($l=1$) и капсулы z_{02} ($l=1$) в плоскости фокусировки объектива, несферичность внутренней поверхности ТСТ ($l=2$), несферичность капсулы (которая при охлаждении от комнатной температуры до 19 К может увеличиваться с 0,1% до 1,1%, $l=2$) – когда задача не может быть сведена к осесимметричной, для учета потенциальных ошибок необходимо выполнить трехмерное моделирование, поскольку ошибка будет являться еще и функцией угла ϕ . Также для исключения влияния несоосности пучка зондирующего излучения с оптической осью (источник зондирующего излучения, капсула, объектив, камера) она должна быть выставлена максимально точно: угол наклона пучка относительно оптической оси не должен превышать $0,8^\circ$ при диагностике по ЯК и 1° при диагностике по БК.

Таким образом, применение ОТ метода может оказаться некорректным при наличии возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива в модах $l=1$ и $l=2$. Наличие моды $l=1$ внутренней поверхности ТСТ можно предположить по ширине ЯК, которое значительно сужается при смещении к источнику излучения, кроме того, наличие возмущения видно на ОТ изображении, полученной с ортогональной оптической оси. Наличие возмущения в моде $l=2$ видно по ОТ изображениям с обеих оптических осей, ЯК и БК не будут представлять собой окружности. Наличие возмущений внутренней поверхности капсулы в модах $l=1$ и $l=2$ может быть оценено по ОТ изображениям пустой капсулы до наполнения ее топливом. Толщины

слоев капсулы и ТСТ, числовая апертура имеющихся объективов, расходимость пучка и дисперсия не вносят ошибки в вычисление толщины ТСТ.

3.2.1.4 Трехмерное численное моделирование распространения пучка видимого излучения через криогенную мишень с возмущениями поверхностей

Поскольку необходимо оценивать корректность диагностики на всем экваторе капсулы, в том числе и при наличии различных возмущений поверхностей капсулы и ТСТ, когда задача не может быть сведена к осесимметричной, и поскольку результаты диагностики поверхностей капсулы и ТСТ должны быть представлены в виде двумерного СПМ, необходимо построить трехмерную модель прохождения пучка видимого излучения через КМ, в которой поверхности капсулы и ТСТ могут иметь гармонические возмущения.

Для моделирования распространения пучка видимого излучения через КМ необходимо задать ее поверхности в виде уравнений. В идеальном случае уравнения поверхностей являются уравнениями сферы. Реальные поверхности капсулы и ТСТ, как правило, содержат возмущения: в модах низких порядков - крупномасштабные (неконцентричность – мода $l=1$, несферичность – мода $l=2$ и так далее до моды 20), в модах средних порядков (от моды $l=21$ до моды $l=250$) и в модах высоких порядков (от моды $l=251$ до моды $l=1000$). Каждая мода характеризуется своей амплитудой, и возмущения поверхностей могут быть сформулированы в виде СПМ, как было представлено на рисунке 2. Возмущения на поверхности принято считать изотропно распределенными. Поэтому в общем случае уравнения поверхностей в трехмерном пространстве должны включать в себя гармонические возмущения, которые могут быть описаны с помощью сферических гармоник $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ (3.13):

$$Y_{lm}(\theta, \varphi) = \begin{cases} CP_l^m(\cos \theta) \cos(m(\varphi + \varphi_0)), & m \geq 0 \\ CP_l^m(\cos \theta) \sin(|m|(\varphi + \varphi_0)), & m < 0 \end{cases} \quad (3.13),$$

где $l=0, 1, 2, 3, \dots$ – степень полиномов Лежандра $P_l(\cos \theta)$ (3.14):

$$P_l(\cos \theta) = \frac{1}{2^l l!} \frac{d^l}{d(\cos \theta)^l} (\cos^2 \theta - 1)^l \quad (3.14),$$

$m=1, 2, 3, \dots, l$ - порядок присоединенных функций (присоединенных полиномов) Лежандра $P_l^m(\cos \theta)$ (3.15):

$$P_l^m(\cos \theta) = (-1)^m (1 - \cos^2 \theta)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{d(\cos \theta)^m} P_l(\cos \theta) \quad (3.15),$$

θ – полярный угол в сферической системе координат (ССК), определенный на интервале $(0 \leq \theta \leq \pi)$, φ – азимутальный угол $(0 \leq \varphi \leq 2\pi)$, φ_0 – начальная фаза, C – нормирующий коэффициент [104]. Радиус возмущенной поверхности в ССК определяется выражением (3.16):

$$\rho_{harm}(\theta, \varphi) = r + dr(Y_{lm}(\theta, \varphi)) \quad (3.16),$$

где $dr(Y_{lm}(\theta, \varphi))$ – функция сферических гармоник, несущая в себе информацию о возмущениях (модах и их амплитудах). Пример смоделированной сферической поверхности с гармоническими возмущениями приведен на рисунке 3.19, а.

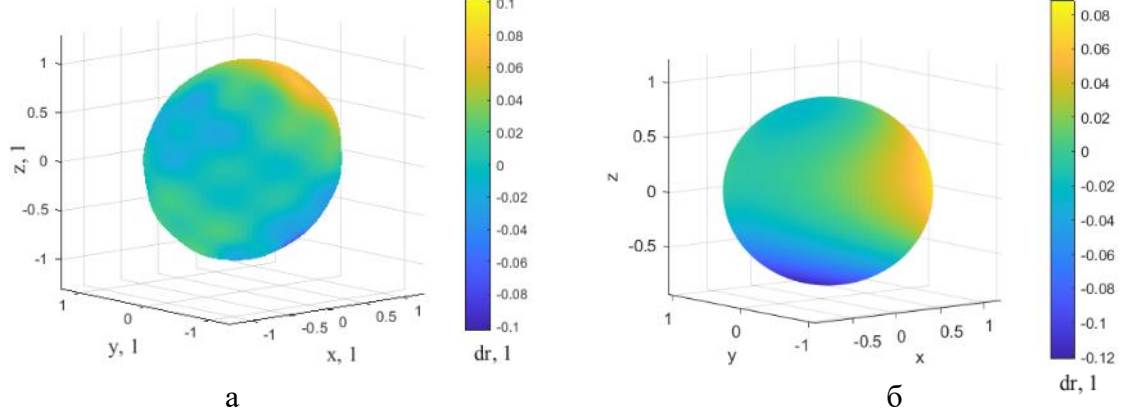


Рисунок 3.19 – Примеры смоделированных поверхностей: а) поверхность, заданная уравнением сферы с гармоническими возмущениями. Радиус сферической поверхности $r=1$, возмущения поверхности в модах $l=1, 2, 10$ соответственно: $A_1 = 0,050, A_2 = 0,100, A_3 = 0,010$. Цветом показано отклонение функции ρ_{harm} от сферической поверхности радиусом r . б) поверхность, заданная уравнением эллипсоида. Полуоси $a = 0,950, b = 0,950, c = 0,850$, смещения центра $x_0 = 0,050, y_0 = 0,000, z_0 = 0,050$. Цветом показано отклонения функции ρ_{ell} (радиус поверхности в сферической системе координат) от сферической поверхности

Так как задача распространения пучка видимого излучения через КМ решается в декартовой системе координат (ДСК), выполняется преобразование углов θ и φ по формулам (3.17), в результате чего получается функция $R_{harm}(x, y, z)$, которая будет использоваться при решении системы уравнений для определения координат пересечения луча с поверхностью.

$$\begin{cases} \theta = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}\right) \\ \varphi = \arccos\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \end{cases} \quad (3.17)$$

Поскольку гармонические возмущения являются изотропно распределенными по сферической поверхности, а отдельный экспериментальный интерес представляют собой поверхности с модами $l=1$ и $l=2$, которые ориентированы в определенных направлениях ДСК (например, возмущения внутренней поверхности твердого слоя топлива, вызванные наличием диагностических окон бокса-конвертера и зондирующего излучения), дополнительно определены уравнения поверхностей, представляющие собой эллипсоиды (3.18):

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (3.18),$$

где a, b, c – полуоси эллипсоида с центром (x_0, y_0, z_0) . Для графической визуализации отклонения такой поверхности от сферической поверхности выполняется преобразование уравнения (3.18) в сферическую систему координат по формулам (3.19) [105]:

$$\begin{cases} x = \rho_{ell} \cos \varphi \sin \theta, \\ y = \rho_{ell} \sin \varphi \sin \theta, \\ z = \rho_{ell} \cos \theta, \end{cases} \quad (3.19),$$

где ρ_{ell} – радиус поверхности в ССК, φ – азимутальный угол, θ – полярный угол. На рисунке 3.19, б представлен пример поверхности, заданной уравнениями (3.18)–(3.19).

На основе данного моделирования разработана программа трассировки видимого излучения через КМ в приближении геометрической оптики. Входными данными в программе являются параметры капсулы и топлива (материалы капсулы и топлива, температура топлива (влияет на показатель преломления топлива); параметры поверхностей (с возможностью задания гармонических возмущений на сферической поверхности радиуса r с использованием уравнений (3.13)–(3.17) или возмущений двух первых мод в конкретных направлениях (в плоскости фокусировки объектива или вдоль оптической оси) с использованием уравнения эллипсоида (3.18), требуемая толщина ТСТ для моделирования ОТ изображения с жидким топливом), а также параметры ОТ системы наблюдения (расходимость и угол наклона пучка зондирующего излучения относительно оптической оси; диаметры и положение окон бокс-конвертера, ограничивающие диаметр входного в бокс-конвертер пучка и выходного из бокс-конвертера пучка; число лучей ($\approx 10^6$); числовая апертура объектива, положение плоскости фокусировки объектива). По этим входным данным в программе моделируется ОТ изображение КМ.

Угол преломления луча на поверхности двух сред α_t вычисляется по закону Снеллиуса (3.1), аналогично двумерной модели. Если показатель преломления второй среды n_t меньше n_i , вычисляется угол ПВО α_{TIR} (3.2). Если угол падения луча α_i больше угла ПВО α_{TIR} , то луч отражается от поверхности без потери интенсивности.

Начало системы отсчета находится в центре $O(0, 0, 0)$ внешней поверхности капсулы. Ось x направлена в направлении распространения пучка лучей, ось z – по вертикали. Уравнение поверхности в случае гармонических возмущений записывается как (3.20), в случае задания поверхности в виде эллипсоида – как (3.21):

$$F(x, y, z) = F_{harm}(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - R_{harm} = 0 \quad (3.20),$$

$$F(x, y, z) = F_{ell}(x, y, z) = \frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} - 1 = 0 \quad (3.21).$$

Угол падения α_{i-1} луча на поверхность $(i-1)$ определяется углом между образующими его прямыми, то есть принадлежащей лучу прямой $A_{i-1}A_{i-2}$ и нормалью к поверхности $(i-1)$ в

точке A_{i-1} (3.22), и принимает значения $\alpha_{i-1} = \gamma$, если $\gamma < \pi/2$ или $\alpha_{i-1} = \pi - \gamma$, если $\gamma > \pi/2$.

$$\gamma = \arccos \left(\frac{(x_{i-1}-x_{i-2}) dFx_{i-1} + (y_{i-1}-y_{i-2}) dFy_{i-1} + (z_{i-1}-z_{i-2}) dFz_{i-1}}{\sqrt{(x_{i-1}-x_{i-2})^2 + (y_{i-1}-y_{i-2})^2 + (z_{i-1}-z_{i-2})^2} \sqrt{dFx_{i-1}^2 + dFy_{i-1}^2 + dFz_{i-1}^2}} \right) \quad (3.22),$$

где dFx_{i-1} , dFy_{i-1} , dFz_{i-1} – компоненты нормали к поверхности F_{i-1} в точке A_{i-1} , полученные путем нахождения частных производных dF_{i-1}/dx , dF_{i-1}/dy , dF_{i-1}/dz уравнения поверхности $F_{i-1}(x, y, z)$ и последующей подстановки в них значений точки $A_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$. Пояснение к основам трехмерного моделирования представлено на рисунке 3.20.

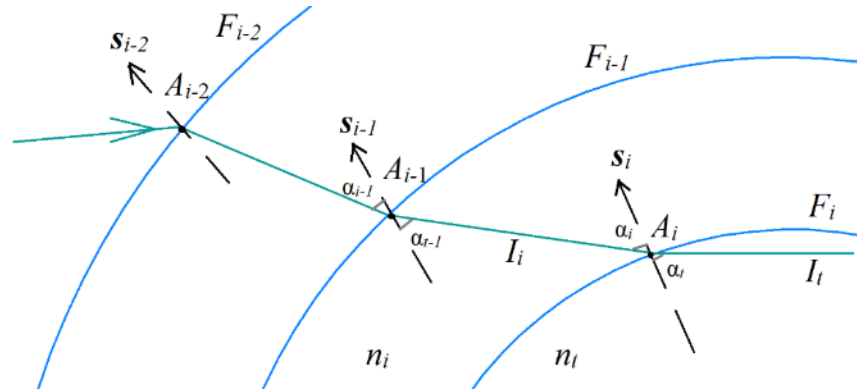


Рисунок 3.20 - Пояснение к основам трехмерного моделирования. A_{i-2}, A_{i-1}, A_i – координаты пересечений луча с поверхностями F_{i-2}, F_{i-1} и F_i соответственно. s_{i-2}, s_{i-1}, s_i – нормали к поверхностям F_{i-2}, F_{i-1}, F_i в точках A_{i-2}, A_{i-1}, A_i соответственно. n_i и n_t – показатели преломления сред, I_i и I_t – интенсивность падающего и прошедшего луча через поверхность F_i , α_i и α_t – углы падения и преломления на поверхности F_i , α_{i-1} и α_{t-1} – углы падения и преломления на поверхности F_{i-1}

Координаты пересечения луча (x_i, y_i, z_i) с i -й поверхностью определяются решением системы уравнений (3.23). Первое уравнение – условие принадлежности точки (x_i, y_i, z_i) плоскости, образованной принадлежащей лучу прямой $A_{i-2}A_{i-1}$ и прямой, образованной нормалью к поверхности (поскольку угол падения α_i и угол преломления α_t луча лежат в одной плоскости, при этом плоскость падения луча на i -ю поверхность определяется падающим на поверхность $(i-1)$ лучом $A_{i-2}A_{i-1}$ и нормалью к $(i-1)$ поверхности в точке A_{i-1}). Второе уравнение – известный угол β , между прямыми $A_{i-1}A_i$ и нормалью к $(i-1)$ -й поверхности, принимающий значения угла преломления на i -й поверхности α_{t-1} или $(\pi - \alpha_{t-1})$. Третье уравнение является условием принадлежности точки (x_i, y_i, z_i) i -й поверхности, описываемой уравнением с гармоническими возмущениями (3.20) или уравнением эллипсоида (3.21).

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{vmatrix} x_i - x_{i-1} & y_i - y_{i-1} & z_i - z_{i-1} \\ x_{i-1} - x_{i-2} & y_{i-1} - y_{i-2} & z_{i-1} - z_{i-2} \\ dFx_{i-1} & dFy_{i-1} & dFz_{i-1} \end{vmatrix} = 0 \\ \beta = \arccos \left(\frac{(x_i - x_{i-1}) dFx_{i-1} + (y_i - y_{i-1}) dFy_{i-1} + (z_i - z_{i-1}) dFz_{i-1}}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \sqrt{dFx_{i-1}^2 + dFy_{i-1}^2 + dFz_{i-1}^2}} \right) \\ \begin{cases} \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} - R_{harm i} = 0 \quad (*) \\ \frac{(x_i - x_{0i})^2}{a_i^2} + \frac{(y_i - y_{0i})^2}{b_i^2} + \frac{(z_i - z_{0i})^2}{c_i^2} - 1 = 0 \quad (**) \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.23),$$

где (x_i, y_i, z_i) – неизвестные координаты точки A_i , $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ и $(x_{i-2}, y_{i-2}, z_{i-2})$ – координаты точек A_{i-1} и A_{i-2} соответственно; dFx_{i-1} , dFy_{i-1} , dFz_{i-1} – компоненты нормали к поверхности F_{i-1} в точке A_{i-1} ; $R_{harm i}$ – радиус сферической поверхности с гармоническими возмущениями; a_i , b_i , c_i – полуоси эллипсоида, описывающего i -ю поверхность с центром (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) .

Интенсивность I_t прошедшего через границу раздела луча вычисляется по формуле Френеля (3.5). Путь каждого луча отслеживается до его выхода из капсулы с топливом. Затем, если луч попадает в выходное окно бокса-конвертера, рассчитывается его путь до входного зрачка объектива и для лучей, попадающих на объектив, рассчитывается пересечение продолжения выходящих из капсулы лучей до плоскости фокусировки объектива, которая является плоскостью локализации изображения. Эти лучи формируют ОТ изображение КМ.

В качестве примера на рисунке 3.21, а, б представлены результаты моделирования распространения пучка видимого излучения через КМ с капсулой, внешняя поверхность которой имеет радиус 1000 мкм, внутренняя поверхность – радиус 950 мкм, внутренняя поверхность ТСТ – радиус 750 мкм (в моделировании линейные величины нормируются на внешний радиус капсулы). Диаметр окон бокса-конвертера 3 мм, объектив с рабочим расстоянием 78 мм и числовой апертурой 0,14 сфокусирован на экватор капсулы. Пучок зондирующего излучения параллельный, наклон относительно оптической оси равен нулю. Число лучей составляет 10^6 . Показатель преломления капсулы равен 1,552 (полимер) [82], показатель преломления топлива равен 1,1564 (D_2 при температуре 18,34 К, что немного ниже температуры тройной точки 18,73 К, при длине волны зондирующего излучения 543 нм) [89]. На рисунке 3.21, в-д представлены результаты моделирования распространения пучка видимого излучения через КМ с капсулой внешним радиусом 1000 мкм, внешняя поверхность которой радиусом 1000 мкм не имеет возмущений, а внутренняя поверхность радиусом 950 мкм имеет возмущение в режиме $l=2$ с амплитудой 10 мкм (несферичность), внутренняя поверхность ТСТ радиусом 750 мкм имеет возмущения в режиме $l=1$ (неконцентричность) с амплитудой 100 мкм и в режиме $l=9$ с амплитудой 15 мкм. Параметры оптической системы – те же, что указаны выше. По смоделированным изображениям на рисунке 3.21 видно, что возмущения поверхностей капсулы и ТСТ значительно искажают ход зондирующего

излучения, в том числе и характеристических групп лучей, образующих ЯК и БК, приводя к разрывам и размытию колец. Поскольку положения данных колец являются единственным средством оценки положения внутренней поверхности ТСТ в плоскости экватора капсулы, необходимо более детально исследовать влияние различных возмущений поверхностей капсулы и топлива на формирование изображения и соответственно, на корректность результатов диагностики, а также оценить влияние неидеальной постановки эксперимента (ОТ системы).

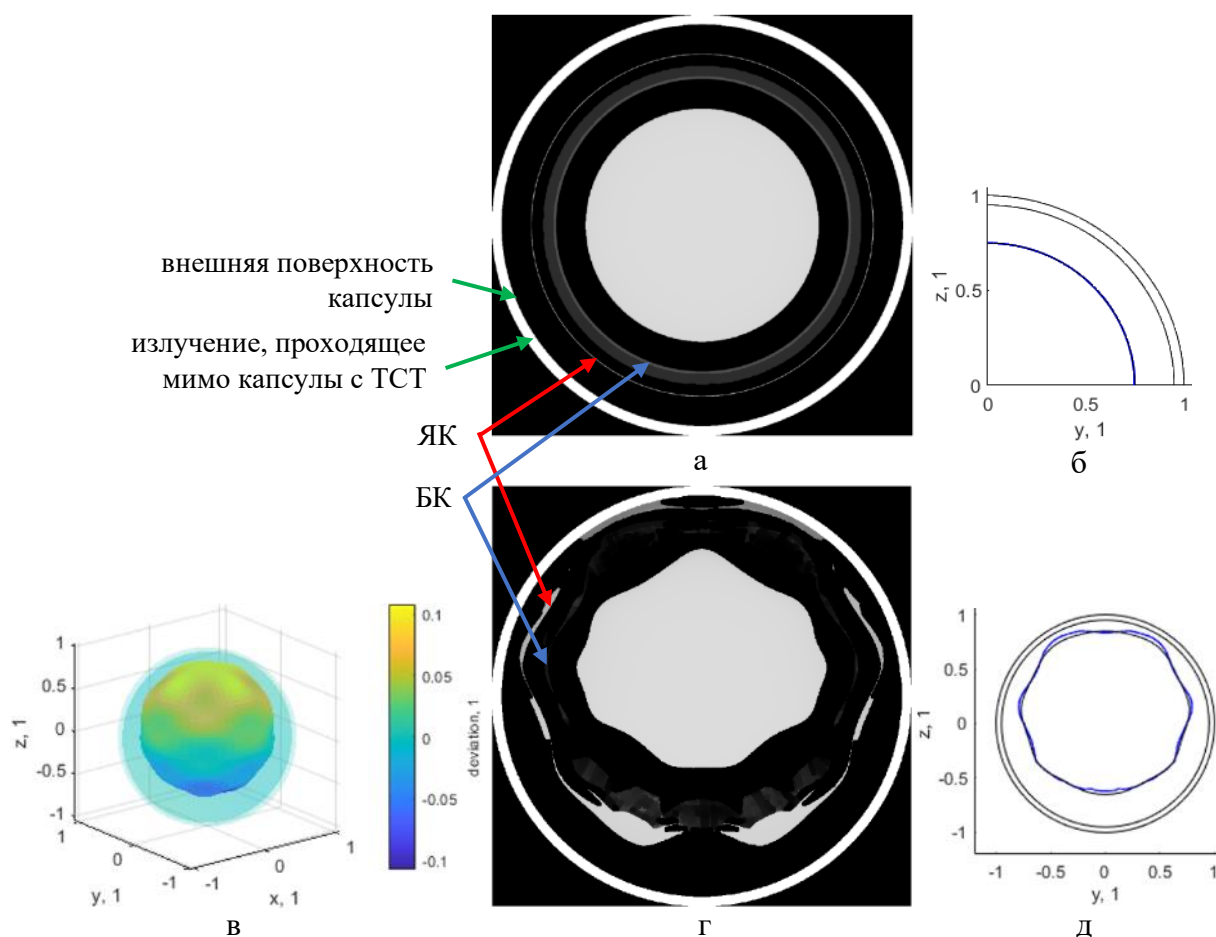


Рисунок 3.21 – Пример моделирования распространения видимого излучения через КМ с поверхностями капсулы и ТСТ без возмущений (а, б) и с возмущениями (в, г, д). а) и г) смоделированные ОТ изображения; б) и д) плоскость фокусировки объектива ($x=0$): черный цвет - поверхности капсулы и ТСТ, синий цвет - вычисленное положение внутренней поверхности ТСТ, усредненное по ЯК и БК. в) заданное возмущение.

3.2.1.5 Метод учета возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива при диагностике параметров топлива

Для оценки корректности вычисления параметров возмущенной внутренней поверхности ТСТ по двум ОТ изображениям, полученным в один момент времени в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, необходимо иметь заведомо известную поверхность.

Для этого можно использовать программу трехмерного моделирования распространения видимого излучения через криомишень, описанную в предыдущем пункте 3.2.1.4, где в целях сокращения времени моделирования будут отслеживаться только группы лучей, формирующие характеристические ЯК и БК на ОТ изображениях.

Внутренняя поверхность ТСТ будет представляться в виде уравнения эллипсоида (3.18) (учет первых двух мод возмущений, ориентированных определенным образом), т.к. с точки зрения анализа распределения температур в капсуле, определяющего стабильное положение внутренней поверхности ТСТ, по результатам эксперимента по формированию ТСТ это представление информативней, чем в виде уравнения поверхности с гармоническими возмущениями (3.13) - (3.17), которое подразумевает изотропное распределение возмущений по поверхности.

Учесть потенциальные ошибки, которые могут возникать при диагностике параметров ТСТ с возмущениями внутренней поверхности в модах порядка 3 и выше, при наличии двух осей наблюдения не представляется возможным, поскольку на реальной поверхности эти моды могут быть ориентированы произвольным образом, а численное моделирование дает возможность только повернуть возмущение вокруг вертикальной оси z путем добавления начальной фазы φ_0 .

В качестве примера на рисунке 3.22 представлена внутренняя поверхность ТСТ, описываемая уравнением (3.24):

$$\frac{(x+0,020)^2}{0,800^2} + \frac{(y-0,030)^2}{0,750^2} + \frac{(z-0,010)^2}{0,700^2} = 1 \quad (3.24)$$

и имеющая возмущения в модах 1 и 2 (неконцентричность и несферичность соответственно). Внешняя и внутренняя поверхности капсулы диаметром 2 мм и толщиной стенки 30 мкм, а также элементы ОТ систем не отображены на рисунке 3.22, а. Отклонения от концентричности и сферичности заданной поверхности составляют 2,5% и 13,3% соответственно. На рисунке 3.22, б, в представлены смоделированные положения ЯК и БК в двух взаимно перпендикулярных плоскостях 1 и 2 фокусировки объективов (на экваторах капсулы) относительно реальных границ капсулы и ТСТ в этих же плоскостях. Далее внутренняя поверхность ТСТ считается неизвестной и используется лишь для анализа результатов.

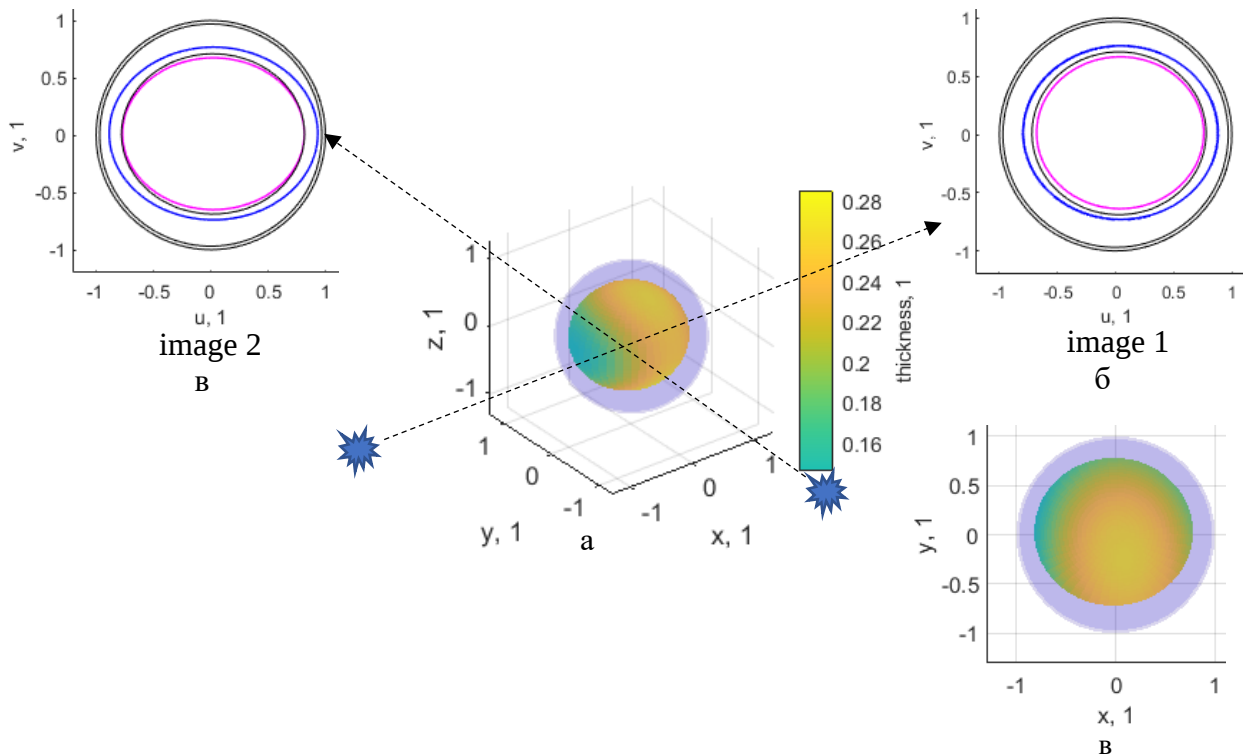


Рисунок 3.22 - Моделирование распространения видимого излучения через КМ вдоль двух взаимно перпендикулярных оптических осей: а) внутренняя поверхность ТСТ, цветом показана толщина слоя топлива, б) и в) положения ЯК (синий цвет) и БК (розовый цвет) относительно реальных границ капсулы и ТСТ (черный цвет) в плоскостях фокусировки объективов для изображений 1 и 2 соответственно. в) вид на КМ сверху

На рисунке 3.23, а представлены вычисленные с использованием зависимостей (3.6) - (3.7) и (3.8) - (3.9) положения внутренней поверхности ТСТ в плоскостях 1 и 2. Видно, что максимальная ошибка в толщине превышает в данном случае 0,050; она вызвана тем, что сферически несимметричная поверхность нарушает ход характеристических групп лучей через КМ, поэтому результаты требуют дополнительной обработки. Кроме того, в положениях $angle = -\pi/2$ и $angle = \pi/2$ вычисленные толщины по ЯК и БК в плоскостях 1 и 2 должны совпадать между собой, поскольку положение $angle = -\pi/2$ является одной и той же точкой на северном полюсе поверхности, $angle = \pi/2$ - одной и той же точкой на южном полюсе.

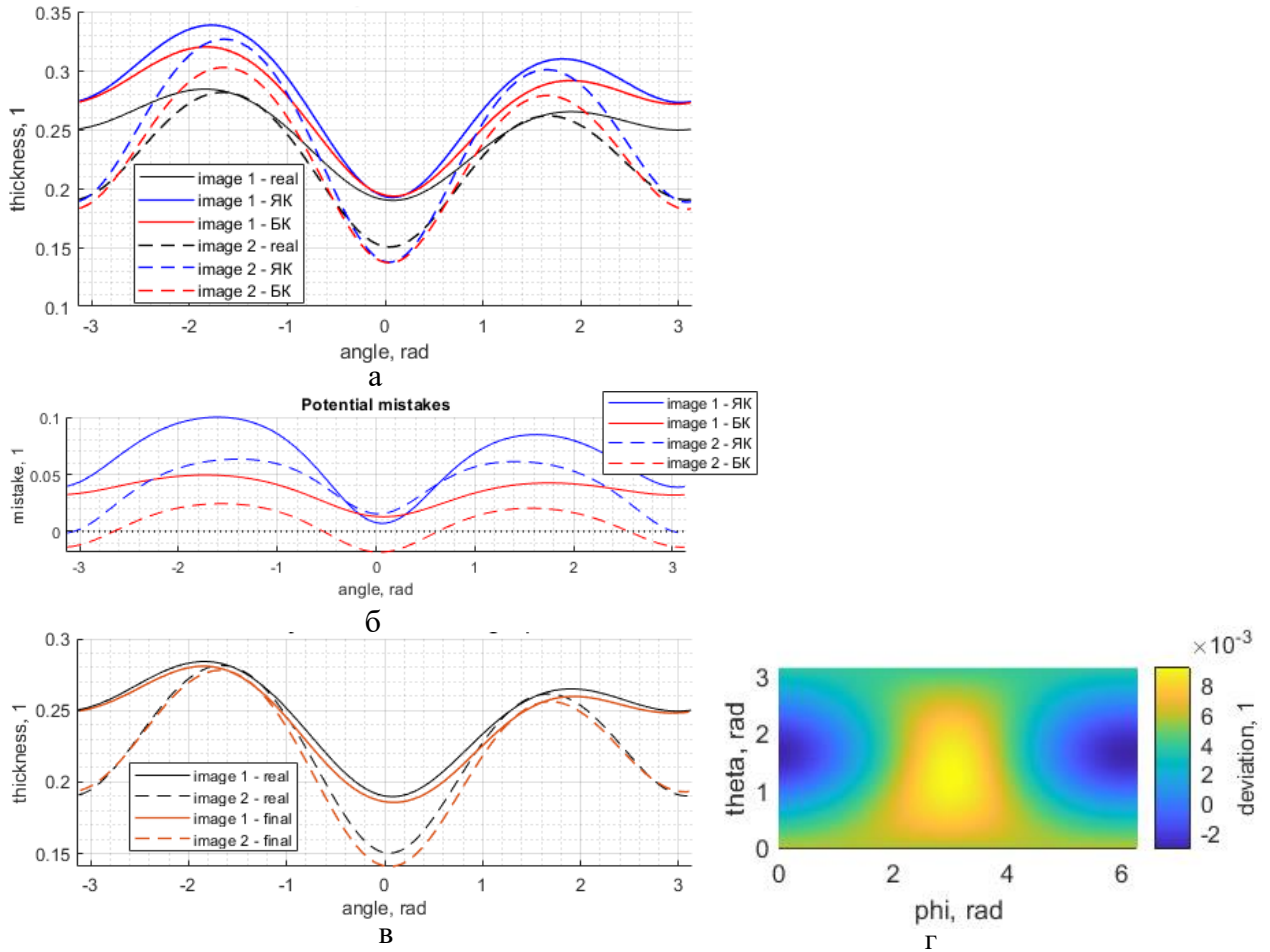


Рисунок 3.23 – Введение поправок к вычисленным по ЯК и БК толщинам ТСТ в двух перпендикулярных плоскостях 1 и 2 фокусировки объективов: а) вычисленная толщина, б) потенциальные ошибки, в) финальная скорректированная толщина. Сплошная линия – результаты в плоскости 1, штриховая – в плоскости 2. г) отклонение радиуса восстановленной поверхности от радиуса заданной поверхности, приведенной на рисунке 3.22, а

Предложен следующий способ введения поправок к вычисляемой толщине ТСТ. По вычисленным толщинам в плоскости 1 и плоскости 2, представленным на рисунке 3.23, а, получаются два уравнения (3.25) - (3.26) поверхности, полученные независимо по ЯК и БК соответственно по изображению 1, и два уравнения (3.27) - (3.28) поверхности, полученные независимо по ЯК и БК соответственно по изображению 2 и которые можно сравнить с исходным уравнением (3.24). При этом по одному изображению нельзя полностью определить уравнение поверхности: по изображению 1 не определяются полуось a и смещение центра x_0 поверхности, а по изображению 2 - b и y_0 , поэтому одной оси наблюдения недостаточно для определения уравнения поверхности. Это первая итерация поиска уравнения поверхности.

$$\frac{(x+0,026)^2}{0,807^2} + \frac{(y-0,040)^2}{0,737^2} + \frac{(z-0,015)^2}{0,650^2} = 1 \quad (3.25)$$

$$\frac{(x+0,023)^2}{0,810^2} + \frac{(y-0,039)^2}{0,737^2} + \frac{(z-0,015)^2}{0,670^2} = 1 \quad (3.26)$$

$$\frac{(x+0,026)^2}{0,807^2} + \frac{(y-0,040)^2}{0,737^2} + \frac{(z-0,013)^2}{0,657^2} = 1 \quad (3.27)$$

$$\frac{(x+0,023)^2}{0,810^2} + \frac{(y-0,039)^2}{0,737^2} + \frac{(z-0,012)^2}{0,680^2} = 1 \quad (3.28)$$

Во второй итерации необходимо оценить потенциальные ошибки. Для этого выполняется четыре моделирования: формирование ЯК для уравнения поверхности (3.25) и формирование БК для уравнения поверхности (3.26) - для плоскости 1, формирование ЯК для уравнения поверхности (3.27) и формирование БК для уравнения поверхности (3.28) - для плоскости 2. По этим положениям ЯК и БК вычисляются соответствующие толщины ТСТ t_{calc_i} (где индекс i принимает значения: $i=1$ (плоскость 1, ЯК), $i=2$ (плоскость 1, БК), $i=3$ (плоскость 2, ЯК), $i=4$ (плоскость 2, БК)) в двух плоскостях, которые можно сравнить с заданными толщинами, заведомо известными из соответствующих поверхностей (3.25) - (3.28), по которым и выполнялись эти четыре моделирования. В результате получаются четыре соответствующие потенциальные ошибки $mistake_{1_i}$, представленные на рисунке 3.23, б, которые возникают при возмущениях внутренней поверхности ТСТ, определенных при первой итерации. В результате скорректированная толщина определяется как (3.29):

$$t_{corr\ 1_i} = t_{calc_i} - mistake_{1_i} \quad (3.29).$$

Скорректированная таким образом толщина $t_{corr\ 1_i}$ не совпадает с реальной, но в разных примерах с разными возмущенными поверхностями наблюдается устойчивая тенденция: применение потенциальной ошибки $mistake_{1_i}$, умноженной на какой-либо коэффициент $k_{2_i} \leq 1$, приводит к максимальному соответствию вычисляемой толщины заданной толщине, но коэффициенты для разных примеров отличаются и не имеют какой-либо закономерности. Поэтому коэффициент находится из условия, что вычисленная по ЯК и БК толщина в положении $angle = -\pi/2$ в плоскостях 1 и 2 должна совпадать, так как это одна и та же область поверхности, аналогично и для положения $angle = \pi/2$. В результате получаются толщины ТСТ в плоскости 1 и плоскости 2, представленные на рисунке 3.23, в, которые значительно ближе к заданной толщине. Восстановленная по этим результатам поверхность описывается уравнением (3.30):

$$\frac{(x+0,026)^2}{0,803^2} + \frac{(y-0,031)^2}{0,752^2} + \frac{(z-0,011)^2}{0,705^2} = 1 \quad (3.30)$$

а ее отклонение от заданной поверхности, приведенной на рисунке 3.22, а, представлено на рисунке 3.23, г.

До введения поправок к вычисляемой толщине ТСТ, как видно на рисунке 3.23, а, величина максимального отклонения вычисленной поверхности от реальной (в двух взаимно перпендикулярных плоскостях) составляла 0,054 (54 мкм при диаметре капсулы 2 мм) и по таким расходящимся между собой данным нельзя найти уравнение поверхности. После

введения поправок, как показано на рисунке 3.23, в, величина максимального отклонения полной восстановленной поверхности от реальной не превышает 0,008 (в единицах внешнего радиуса капсулы), что соответствует 8 мкм при диаметре капсулы 2 мм. Таким образом, введением поправок ошибка в вычислении положения поверхности уменьшена на 85%. Отклонения от concentricности и сферичности для восстановленной поверхности составляют 2,8% и 13,0% соответственно (для заданной поверхности 2,5% и 13,3% соответственно).

Амплитуды выделенных мод n для профилей в плоскостях 1 и 2 для заданной и восстановленной поверхностей приведены на рисунке 3.24, а. СПМ Фурье $P_{1D}(n)$, приведенный на рисунке 3.24, б представляет собой зависимость квадратов амплитуд мод от номеров мод. У восстановленной поверхности амплитуда моды $n=1$ получилась выше на 1 мкм в плоскости 1 и на 5 мкм в плоскости 2, чем у заданной поверхности, а амплитуда моды $n=2$ ниже на 1 мкм в обеих плоскостях.

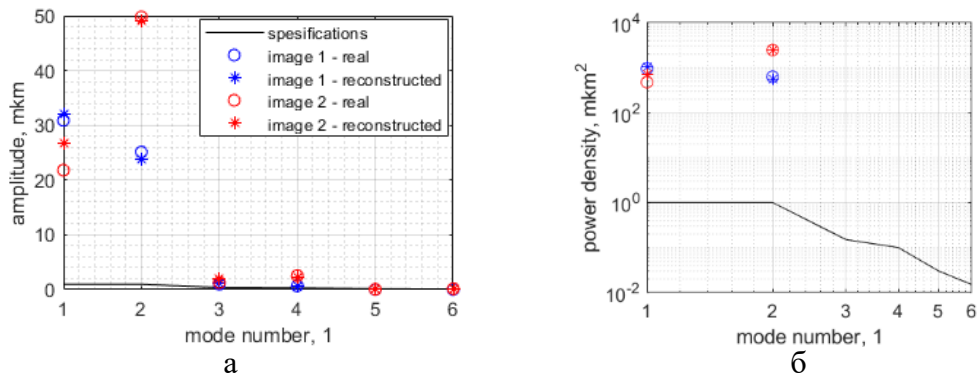


Рисунок 3.24 – Сравнение амплитуд выделенных мод n в профилях в плоскостях 1 и 2 для заданной и восстановленной поверхностей: а) амплитуды мод n , б) СПМ Фурье $P_{1D}(n)$

Подобное моделирование проведено для ряда разных случаев с возмущенной в двух первых модах внутренней поверхностью ТСТ. Исследовались примеры со слоями ТСТ в диапазоне толщин от 70 до 400 мкм, где в каждом из примеров разброс по толщине ($max-min$) составлял от 100 до 240 мкм, что представляет собой сильные возмущения внутренней поверхности ТСТ. Получено, что предложенный метод введения поправок позволяет уменьшить ошибку в вычислении толщины ТСТ более чем на 80% (относительно результатов до введения поправок), при этом величина максимального отклонения восстановленной поверхности от реальной не превышает 0,013 от внешнего радиуса капсулы (13 мкм для капсулы диаметром 2 мм), ошибка в определении величин неконцентричности и несферичности восстановленной поверхности составляет $<1,1\%$, а ошибка в определении амплитуды моды $l=1$ составляет <5 мкм, моды $l=2$ составляет <7 мкм (чем меньше возмущения, тем меньше ошибки).

Необходимо отметить, что две оси наблюдения, определяющиеся числом пар окон бокса-конвертера, не позволяют определить ориентацию (поворот) поверхности вокруг вертикальной оси. На рисунке 3.25 представлен пример с той же самой поверхностью, которая анализировалась выше (см. рисунок 3.22), но поверхность повернута на произвольный угол ($\pi/4$) так, что полуоси эллипсоида, описывающего поверхность, не совпадают с осями наблюдения, как видно на рисунке 3.25, г.

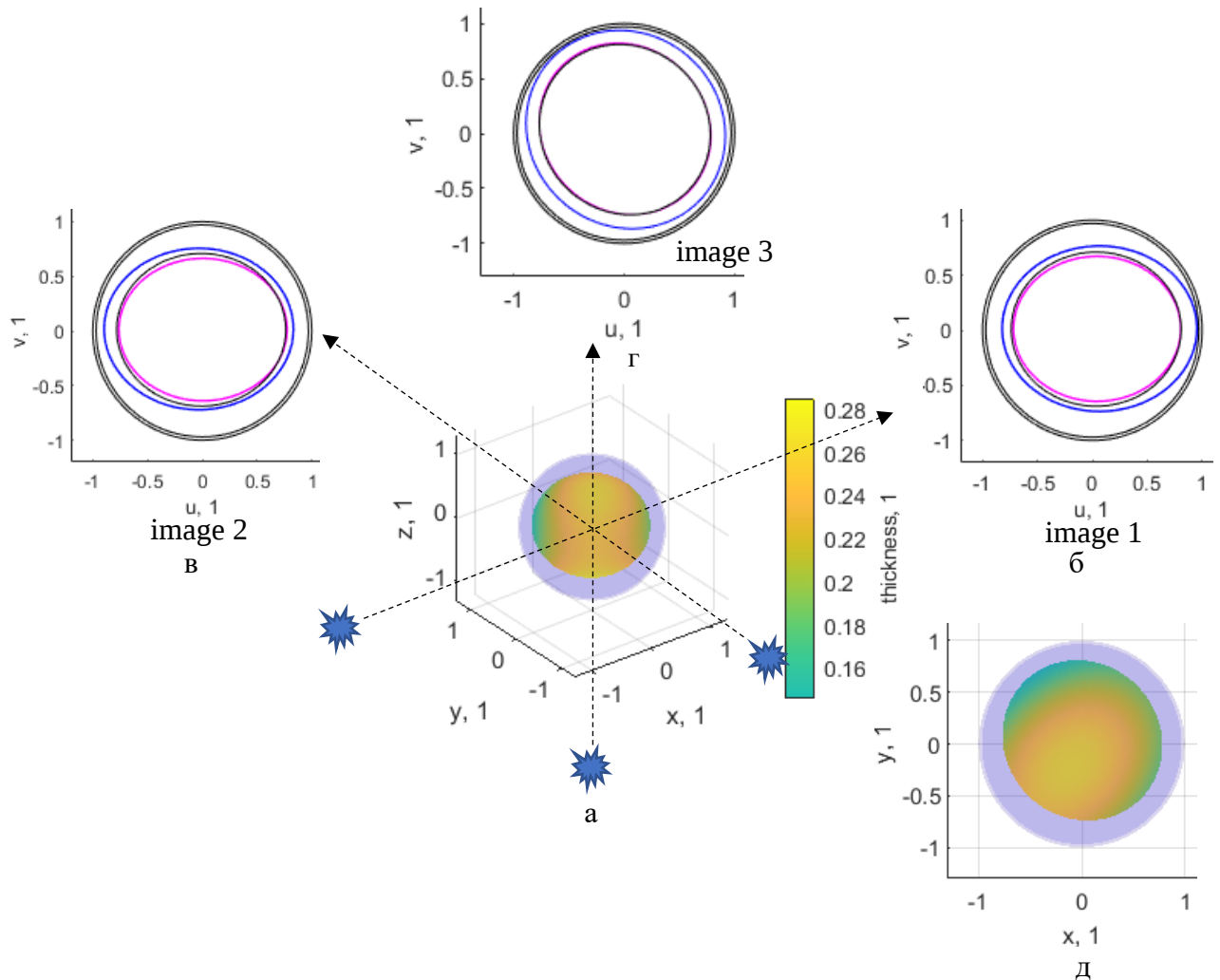


Рисунок 3.25 - Моделирование распространения видимого излучения через КМ вдоль оптических осей: а) внутренняя поверхность ТСТ, цветом показана толщина слоя топлива, б) и в) положения ЯК (синий цвет) и БК (розовый цвет) относительно реальных границ капсулы и ТСТ (черный цвет) в плоскостях фокусировки объективов для изображений 1 и 2 соответственно, г) ЯК и БК в случае в плоскости 3 - если бы была третья ось наблюдения; д) вид на КМ сверху: поверхность повернута на $\pi/4$ вокруг вертикальной оси

Вычисленные с помощью решения обратных задач толщины в анализируемых плоскостях представлены на рисунке 3.26, а: разница между фактическими толщинами и вычисленными достигает 0,065 (65 мкм для капсулы диаметром 2 мм). Скорректированная толщина после учета влияния возмущений поверхности, оцененных в первом приближении,

представлена на рисунке 3.26, б. Скорректированная толщина лежит близко к фактической в областях $[-\pi, -\pi/2]$ радиан, $[\pi/2, \pi]$ радиан, а на интервале $[-\pi/2, \pi/2]$ радиан отличается на величину до 0,038. Это объясняется тем, что сечения повернутого эллипсоида в любых, в том числе анализируемых, плоскостях представляют собой эллипсы, и лучи, зондирующие поверхность в данной области, образуют ЯК и БК в форме эллипсов, как видно на рисунке 3.25, б, в. Без наличия третьей оси наблюдения вдоль вертикальной оси невозможно определить, что поверхность повернута вокруг вертикальной оси, поэтому при моделировании влияния возмущений не может быть учтен угол поворота поверхности. Поэтому при наличии поворота поверхности вокруг вертикальной оси метод введения поправок снижает ошибку в вычислении толщины слоя топлива в меньшей степени, чем при отсутствии поворота. При наличии третьей оси наблюдения наличие поворота было бы видно на ОТ изображении, как видно на рисунке 3.25, г: угол поворота поверхности, вычисленный из уравнений ЯК и БК, составляет $\pi/4$ и может быть учтен при моделировании влияния возмущений поверхности.

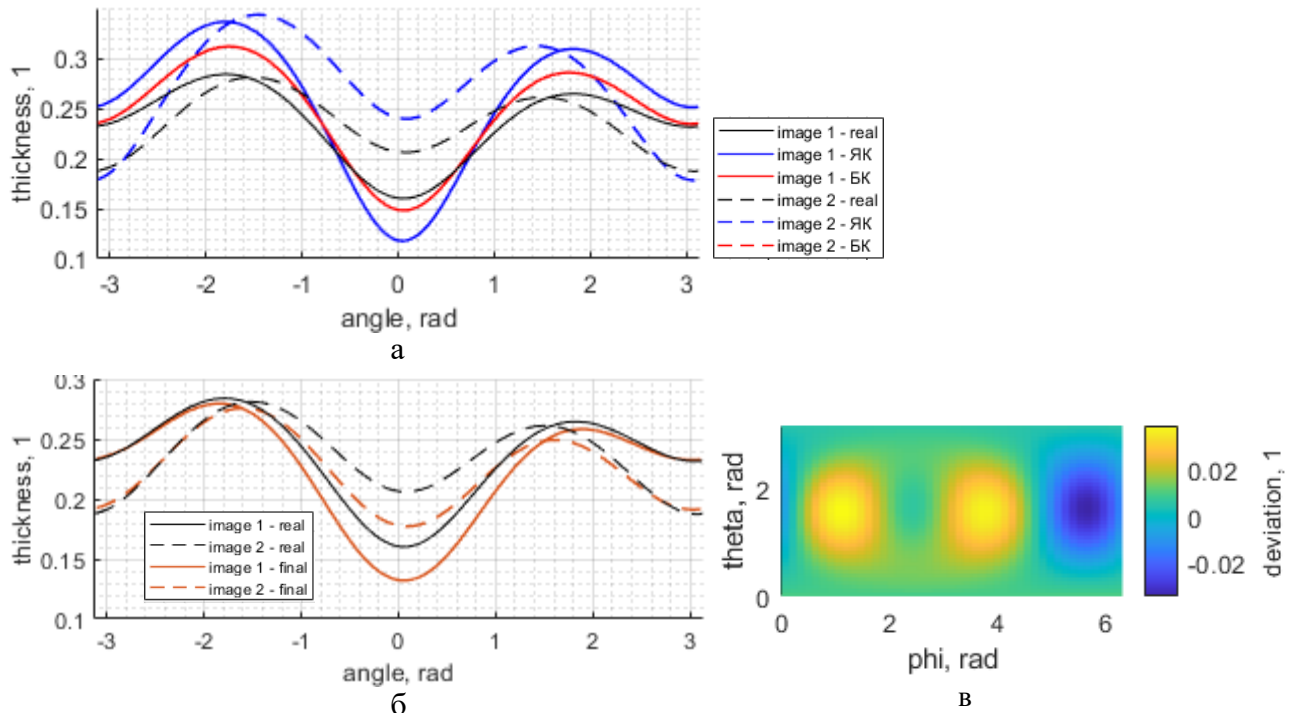


Рисунок 3.26 – Введение поправок к вычисленным по ЯК и БК толщинам ТСТ в двух перпендикулярных плоскостях 1 и 2 фокусировки объективов: а) вычисленная толщина, б) финальная скорректированная толщина. Сплошная линия – результаты в плоскости 1, штриховая – в плоскости 2. в) отклонение радиуса восстановленной поверхности от радиуса заданной поверхности, приведенной на рисунке 3.25, а

По информации из зарубежных публикаций ОТ метод применим только для КМ со сферически симметричными поверхностями, и в случае, если по ОТ изображению видно, что КМ не удовлетворяет этому условию, процесс формирования ТСТ в капсуле начинается сначала, поэтому методы учета потенциальных ошибок для сферически несимметричных поверхностей не прорабатывались зарубежными исследователями в принципе. Но поскольку

в процессе отработки технологии получения КМ для выявления проблем в текущих экспериментах и постановки задач на следующие эксперименты требуется выполнять оценку параметров ТСТ и при наличии разных возмущений его внутренней поверхности, предложенный метод оценки параметров сферически несимметричного ТСТ имеет важную экспериментальную значимость. При этом для ТСТ хорошего качества со сферической симметрией, которые пригодны для эксперимента по зажиганию, вычисленное по ЯК и БК положение поверхности в плоскостях фокусировки объективов не будет содержать в себе ошибки вследствие искажения хода характеристических групп лучей, поэтому полная поверхность восстанавливается с разрешением до 0,6 мкм для капсулы диаметром 2 мм, что определяется разрешением ОТ изображения (0,6 мкм/пиксель).

3.2.1.6 Влияние положения свободной поверхности жидкого топлива на положение характеристических колец

Для получения ТСТ заданной толщины необходимо контролировать количество напускаемого жидкого топлива в объем капсулы. В случае оптически прозрачной капсулы это можно делать по ОТ изображению, пример которого приведен на рисунке 3.27, а именно по видимой высоте мениска жидкости. При этом видимый мениск жидкости представлен частью ЯК и частью БК и отличается от мениска реальной поверхности жидкости в плоскости фокусировки объектива.

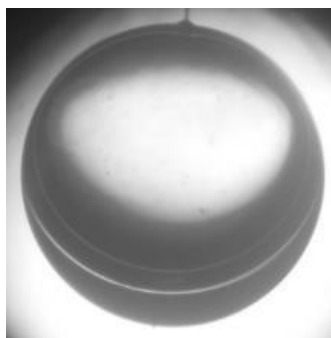


Рисунок 3.27 – ОТ изображение капсулы с жидким дейтерием

Мениск жидкости в плоскости фокусировки объектива может быть описан эллипсом со смещением вверх относительно центра капсулы, что подтверждается в работе [15]. В работе приведены зависимости (3.30) полуосей a и c и смещения z_0 центра эллипса от требуемой толщины ТСТ t_{cr} (величины приведены в [мкм]):

$$\begin{cases} z_0 = 1.17t_{cr} + 21,72, \\ a = -1.27t_{cr} + 437,14, \\ c = -1.27t_{cr} + 432,79. \end{cases} \quad (3.30).$$

В работе отмечено, что эти выражения подходят только для КМ, применяемых на установке OMEGA диаметром 860 мкм и толщиной ТСТ от 19,6 до 115,8 мкм, т.е. это частный

случай и выражения нельзя считать универсальными. Поэтому для интересующих нас КМ можно определить аналогичные зависимости параметров эллипса, описывающего форму свободной поверхности жидкости в плоскости фокусировки объектива, от требуемой толщины ТСТ как линейные функции (3.31):

$$\begin{cases} z_0 = k_1 t_{cr} + b_1, \\ a = k_2 t_{cr} + b_2, \\ c = k_3 t_{cr} + b_3. \end{cases} \quad (3.31).$$

В работе [106] приведены формы поверхности жидкости в капсуле для параметров КМ, приближенных к используемым в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ. На рисунке 3.28 приведены построенные по этим данным контуры сечения поверхностей раздела жидкость-пар для трех размеров капсул, для каждой – три случая заполнения V_L/V_C . По этим графикам измерены полуоси (a , c) и смещения (z_0) эллипсов, аппроксимирующих свободную поверхность жидкости.

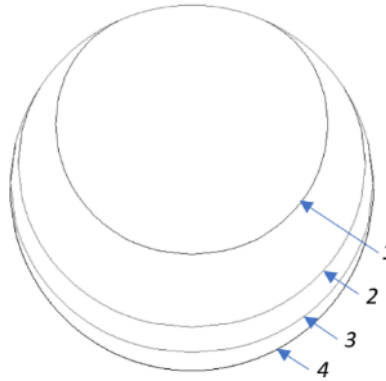


Рисунок 3.28 – Контурные сечения поверхностей раздела жидкость-пар для трёх случаев заполнения капсулы (1 - $V_L/V_C = 0,058$; 2 - $V_L/V_C = 0,2$ и 3 - $V_L/V_C = 0,6$) и 4 – внутренней поверхности капсулы. V_L и V_C – объём жидкости и внутренний объём капсулы соответственно. Внутренний радиус капсул (внешний радиус минус толщина стенки): 750 мкм, 1000 мкм, 1500 мкм

Из анализа зависимостей величин a , c , z_0 от внутреннего радиуса капсулы и от разных степеней заполнения V_L/V_C получено, что нормированные на внутренний радиус капсулы $r_{sh\ in}$ величины a , c и z_0 зависят только от степени заполнения V_L/V_C капсулы. После того, как зависимость формы свободной поверхности от радиуса капсулы исключена, можно записать систему из девяти уравнений (3.32), где неизвестными являются k_1 , k_2 , k_3 , b_1 , b_2 , b_3 . Величина t_{cr} останется неизвестной, поскольку задача стоит в нахождении зависимостей a , c , z_0 (t_{cr}).

$$\begin{cases} z_{0i} = k_1 \times t_{cr} + b_1, \\ a_i = k_2 \times t_{cr} + b_2, \\ c_i = k_3 \times t_{cr} + b_3, \end{cases} \quad (3.32),$$

где $i=1, 2, 3$ – индексы, соответствующие разным степеням заполнения капсулы. В результате решения системы уравнений получаются зависимости (3.33) формы поверхности (a , c , z_0) от

требуемой толщины криослоя t_{cr} , в которых все величины – z_0 , a , c , t_{cr} , $r_{sh\,in}$ – нормированы на внешний радиус капсулы $r_{sh\,out}$ и, соответственно, измеряются в единицах.

$$\begin{cases} z_0 = 1,49t_{cr} + 0,03r_{sh\,in}, \\ a = -1,15t_{cr} + 1,01r_{sh\,in}, \\ c = -1,19t_{cr} + 0,97r_{sh\,in}. \end{cases} \quad (3.33).$$

Объем жидкости V_{liq} (см. рисунок 3.29) определяется выражением (3.34) (задача является осесимметричной относительно оси Oz):

$$V_{liq} = V_2 - V_1 = \pi \int_{-r_{sh\,in}}^{z_{int}} (r_{sh\,in}^2 - z^2) dz - \pi \int_{z_0-c}^{z_{int}} (a^2 (1 - \frac{(z-z_0)^2}{c^2})) dz \quad (3.34),$$

где $r_{sh\,in}$ – внутренний радиус капсулы, z_{int} – высота заполнения капсулы жидкостью, V_{liq} – объем жидкости, a , c , z_0 – полуоси и смещение эллипса, аппроксимирующего свободную поверхность жидкости в капсуле в плоскости фокусировки объектива, V_1 – объем насыщенного пара до высоты z_{int} , $V_2 = V_{liq} + V_1$.

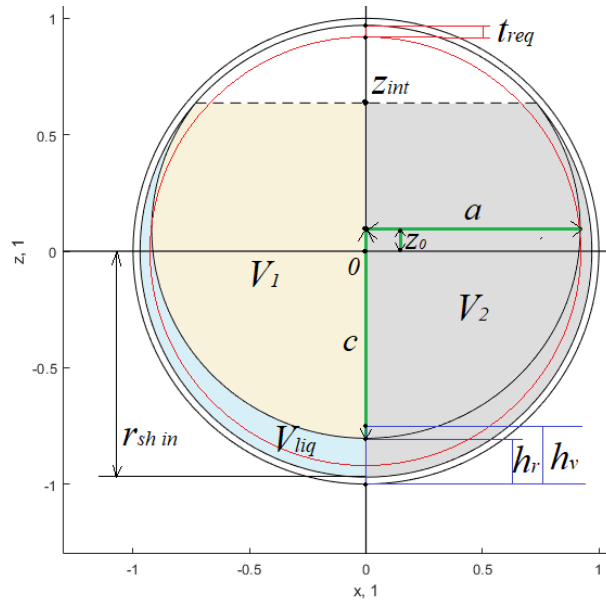


Рисунок 3.29 – Пояснение к вычислению видимой высоты мениска жидкого топлива h_v на оси Oz : t_{req} – требуемая толщина ТСТ, a , c , z_0 – полуоси и смещение эллипса, аппроксимирующего свободную поверхность жидкости в капсуле в плоскости фокусировки объектива, h_r – реальная высота мениска жидкости на оси Oz , O – центр внешней поверхности капсулы, z_{int} – высота заполнения капсулы жидкостью, $r_{sh\,in}$ – внутренний радиус капсулы, V_{liq} – объем жидкости (голубой), V_1 – объем насыщенного пара до высоты z_{int} (желтый), $V_2 = V_{liq} + V_1$ (серый)

С целью исследования влияния асимметрии поверхностей на связь реальной высоты мениска жидкого топлива и положений ЯК и БК проведено двумерное и трехмерное моделирование распространения видимого излучения через капсулу с жидким топливом, внутренняя поверхность которого описывается уравнениями (3.33). На рисунке 3.30, а представлена трассировка образующих ЯК и БК групп лучей (двумерное моделирование). Как видно, вычисляемая по ЯК (на рисунке 3.30, а отмечена цифрой 2) и БК (4) высота мениска на оси Oz (с помощью решения обратных задач) отличается от реальной (5), при этом ошибка

вычисления по БК меньше. Кроме того, как показывают результаты трехмерного моделирования на рисунке 3.30, б, положение БК находится ближе к поверхности жидкого топлива в плоскости фокусировки объектива, поэтому при наполнении капсулы жидким топливом визуально удобнее ориентироваться на БК.

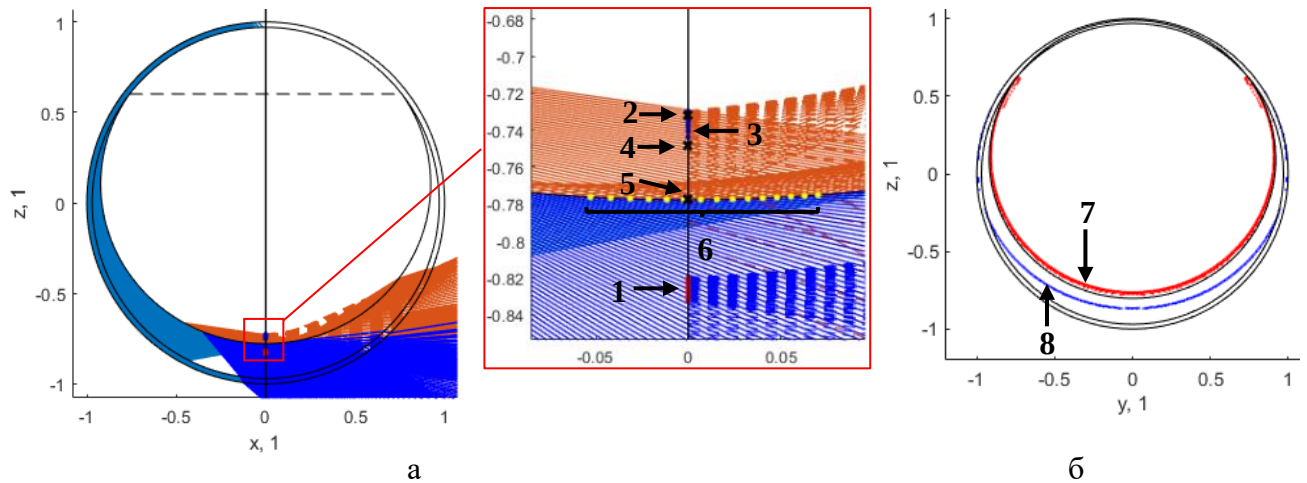


Рисунок 3.30 – Определение реальной высоты мениска жидкого топлива по видимой высоте. а) двумерное моделирование формирования ЯК и БК на оси Oz : 1 – ЯК на оси Oz , 2 – вычисленная по ЯК высота мениска жидкого топлива на оси Oz , 3 – БК на оси Oz , 4 – вычисленная по БК высота жидкого топлива на оси Oz , 5 – реальная ЯК высота мениска жидкого топлива на оси Oz , 6 – зондируемая образующими БК лучами область поверхности. б) трехмерное моделирование: БК (7) и ЯК (8) относительно положения свободной поверхности жидкого топлива в плоскости фокусировки объектива

Поскольку видимая по БК высота мениска жидкости зависит не только от требуемой толщины ТСТ, но и от толщины стенки капсулы и показателей преломления капсулы и топлива, то оптимальный способ определения видимой высоты мениска жидкого топлива для получения требуемой толщины ТСТ – с помощью прямого двумерного моделирования вычислять видимую по БК высоту мениска для параметров используемой капсулы. Входными параметрами при этом являются диаметр и толщина стенки капсулы, требуемая толщина ТСТ, плотность твердого и жидкого топлива, показатели преломления капсулы и топлива.

3.2.2 Рентгеновский фазоконтрастный метод

Для нахождения взаимосвязей положений поверхностей с характеристическими особенностями на РФК изображениях КМ, а также для исследования влияния возмущений поверхностей КМ на формирование изображений необходимо выполнить численное моделирование прохождения рентгеновского излучения через КМ.

3.2.2.1 Двумерное численное моделирование распространения пучка рентгеновского излучения через криогенную мишень

Двумерное моделирование прохождения параллельного пучка РИ через центрально-симметричную капсулу с ТСТ аналогично моделированию с полый капсулой, которое было рассмотрено в пункте 2.1.2.1 об измерении параметров полых капсул.

Для РИ с энергией 8 кэВ значение δ для СН составляет $2,2 \times 10^{-6}$, для Be(Cu) составляет $5,6 \times 10^{-6}$, для твердого DT и D₂ – $0,65 \times 10^{-6}$, для газообразного DT и D₂ – $1,6 \times 10^{-9}$ [71]. Значение β для СН – $1,6 \times 10^{-9}$, для Be(Cu) – $1,05 \times 10^{-8}$, для твердого DT и D₂ – $7,4 \times 10^{-13}$, для газообразного DT и D₂ – $1,8 \times 10^{-15}$.

В случае капсулы с ТСТ необходимо рассмотреть два отдельных случая преломления РИ на поверхностях, представленные на рисунке 3.31. Первый случай - преломление из более оптически плотной среды с большим показателем преломления в менее оптически плотную среду с меньшим показателем преломления, включает следующие границы раздела: «вакуум – капсула» ($n_1 < n_0$), «насыщенный пар топлива – ТСТ» ($n_2 < n_3$), «ТСТ – капсула» ($n_1 < n_2$). Второй случай, наоборот, преломление из менее оптически плотной среды с меньшим показателем преломления в более оптически плотную среду с большим показателем преломления, включает границы раздела: «капсула – ТСТ» ($n_2 > n_1$), «ТСТ – насыщенный пар топлива» ($n_3 > n_2$), «капсула – вакуум» ($n_0 > n_1$). Лучи можно разделить на четыре группы, которые отличаются между собой путями прохождения, что видно на рисунке 3.31: нулевая группа проходит мимо капсулы с топливом и падает на детектор; первая группа проходит только через капсулу и затем падает на детектор, вторая группа – через капсулу, ТСТ и снова через капсулу, третья группа – через капсулу, ТСТ, насыщенный пар топлива, снова через ТСТ, капсулу, выходит из капсулы и падает на детектор.

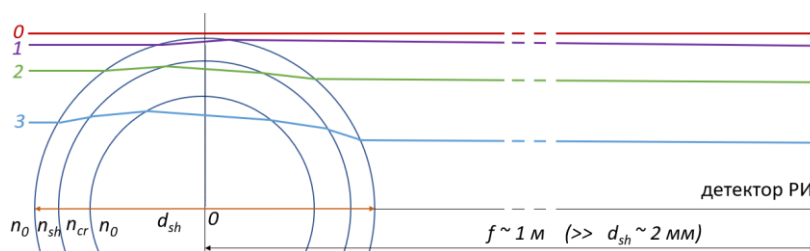


Рисунок 3.31 – Группы лучей с разными путями прохождения через капсулу с ТСТ: проходящая через: 1 – только капсулу, 2 – капсулу + ТСТ + капсулу, 3 – капсулу + ТСТ + насыщенный пар топлива + ТСТ + капсулу; 0 – не проходящая через капсулу с ТСТ

На основе моделирования разработана программа, в которой по заданным параметрам (диаметр и толщина стенки капсулы, толщина ТСТ, расстояние от капсулы с ТСТ до детектора, материалы капсулы и ТСТ) моделируется РФК изображение методом трассировки лучей. Для приведенного ниже примера параметры КМ и эксперимента взяты из работы [74] для проверки численного моделирования: радиус Be капсулы 1077 мкм, толщина стенки капсулы 105 мкм, толщина ТСТ (DT) 150 мкм, расстояние от центра КМ до детектора 490 мм. На рисунке 3.32

представлен вклад всех групп лучей в профиль интенсивности, финальный профиль интенсивности и РФК изображение.

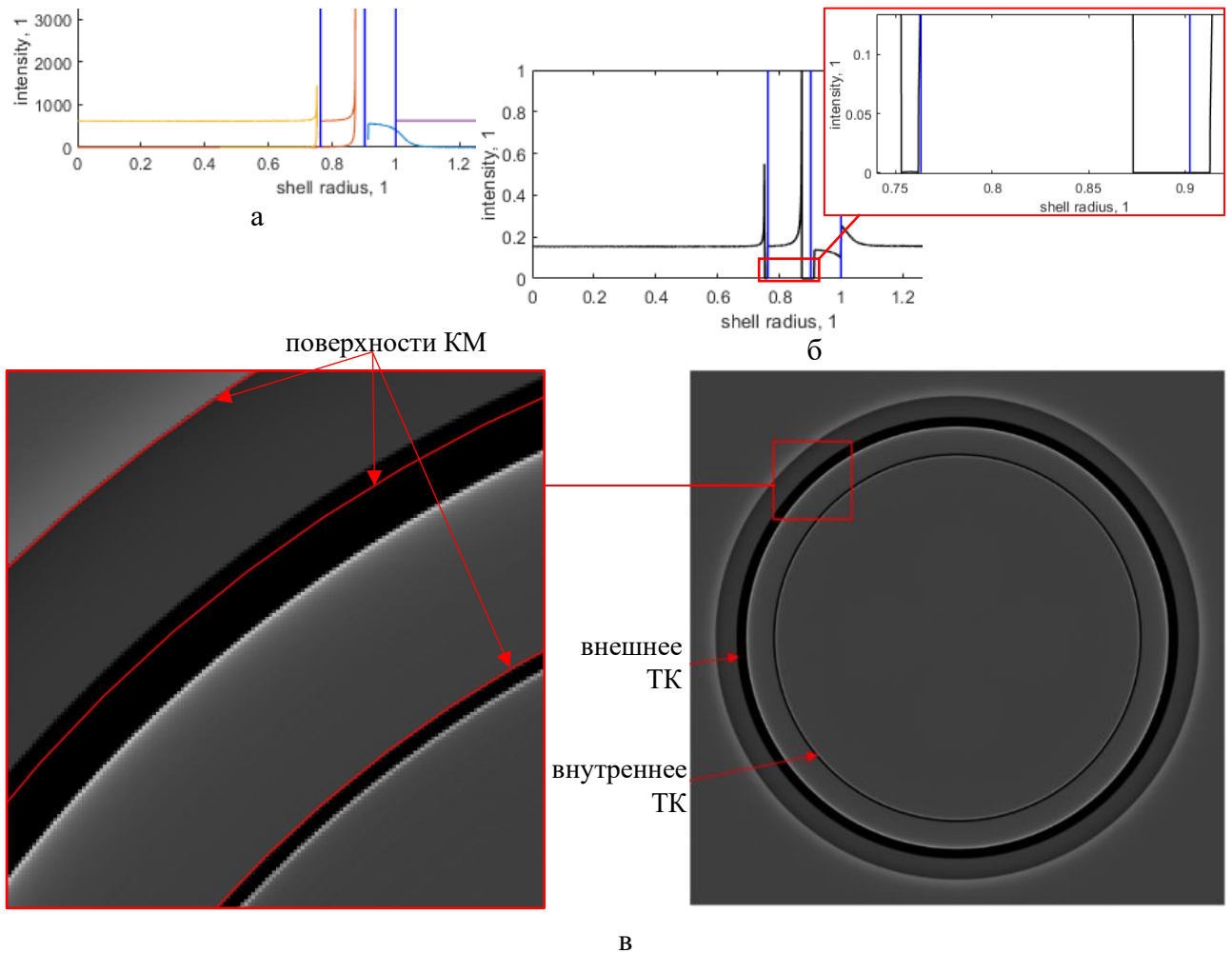


Рисунок 3.32 – Результаты моделирования: а) Вклад различных групп лучей в профиль интенсивности (фиолетовый цвет – нулевая группа лучей, голубой – первая, оранжевый – вторая, желтый – третья; синий цвет – положения границ КМ), б) финальный профиль интенсивности, в) РФК изображение

На рисунке 3.33 представлено сравнение смоделированных профилей интенсивности, полученных в результате трассировки лучей через капсулу с ТСТ. На рисунке 3.33, а – профиль интенсивности из работы [74], а на рисунке 3.33, б – профиль интенсивности, смоделированный в программе трассировки лучей. Положение и ширина характеристических темных зон на профилях интенсивности отлично согласуются, подтверждая численное моделирование.

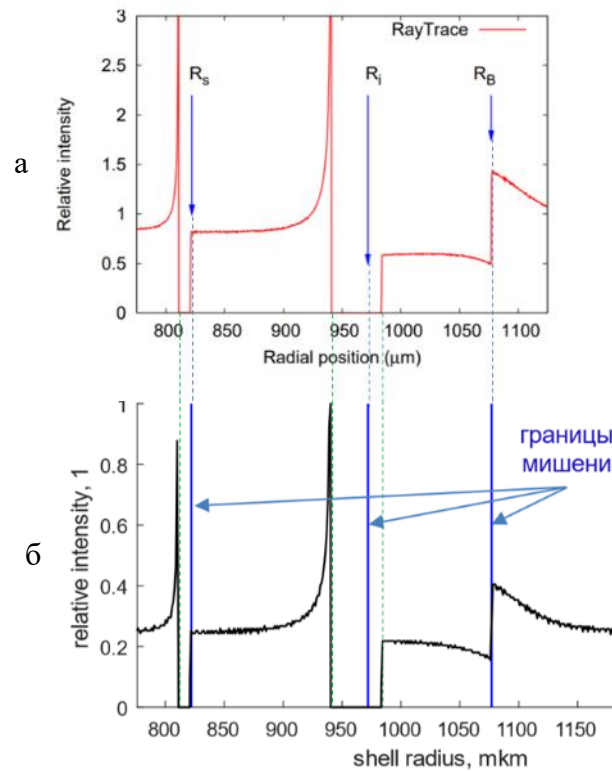


Рисунок 3.33 – Сравнение смоделированных профилей интенсивности по параметрам, взятым из работы [74]: радиус R_B капсулы 1077 мкм, толщина стенки капсулы 105 мкм, толщина ТСТ (DT) 150 мкм, расстояние от капсулы до детектора 490 мм. *a* - профиль интенсивности из работы [74] (R_s - граница ТСТ-насыщенный пар топлива, R_i - граница капсула-ТСТ, R_B – внешняя граница капсулы), *б* - профиль интенсивности, смоделированный в программе трассировки лучей

3.2.2.2 Решение обратной задачи

По рисунку 3.32 видно, что внешнее темное кольцо (ТК) на РФК изображении образуется в результате сильного преломления лучей второй группы, падающих почти по касательной к поверхности капсула-ТСТ и лучей первой группы, проходящих вблизи этой поверхности. Зависимость толщины стенки капсулы τ_{sh} от положения внешнего края этого темного кольца уже была получена в пункте 2.1.2.2 (формула (2.23)). Лучи второй группы отклоняются в сторону ТСТ, образуя светлое кольцо внутри темного. А лучи первой группы, проходящие почти по касательной к поверхности «вакуум - капсула», образуют пик интенсивности, сразу за внешней границей капсулы.

Внутреннее ТК образуется в результате сильного преломления лучей третьей группы, падающих почти по касательной к поверхности ТСТ-насыщенный пар топлива и лучей второй группы, проходящих вблизи этой поверхности. Эти лучи третьей группы отклоняются в сторону насыщенного пара, образуя светлое кольцо внутри темного. Поэтому выполнено решение обратной задачи отслеживания рентгеновских лучей от изображения до их

преломления на внутренних поверхностях капсулы и топлива. Зависимость (3.35) толщины ТСТ τ_{cr} от положения внешнего края внутреннего ТК $R_{inner-dr-out}$ получена в неявном виде:

$$\tau_{cr} = \frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - f \times \tan(\varphi_1 - 2 \times \varphi_2 - \varphi_4) - R_{inner-dr-out} \quad (3.35),$$

где $R_{inner-dr-out}$ – радиус внешнего края внутреннего ТК, $\varphi_1 = \alpha_1 - \alpha_0$,

$\varphi_2 = \alpha_2 - \alpha_3$, $\varphi_4 = \alpha_6 - \alpha_1$ – углы отклонения лучей на поверхностях капсулы и ТСТ, определяющиеся выражениями (3.36):

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \arctan \frac{\left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{cr}\right)}{-\sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{cr}\right)^2}} \\ \alpha_1 &= \arctan \frac{\left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{cr}\right)}{-\sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{cr}\right)^2}} + \delta_{sh} \times \frac{\left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{cr}\right)}{-\sqrt{1 - \left(\frac{d_{sh}}{2} - \tau_{sh} - \tau_{cr}\right)^2}} \\ \alpha_2 &= \arcsin \left(\frac{\sin(\alpha_1)}{1 - \tau_{sh}} \right) \\ \alpha_3 &= \arcsin \left(\frac{n_{sh} \times \sin(\alpha_1)}{n_{cr} \times (1 - \tau_{sh})} \right) \\ \alpha_6 &= \arcsin \left(\frac{n_{sh} \times \sin(\alpha_1)}{n_0} \right) \end{aligned} \quad (3.36),$$

где n_{sh} , n_{cr} и n_0 – показатели преломления РИ в капсуле, слое топлива и окружающей капсулу среде (вакуум) соответственно. Пояснение к формуле представлено на рисунке 3.34.

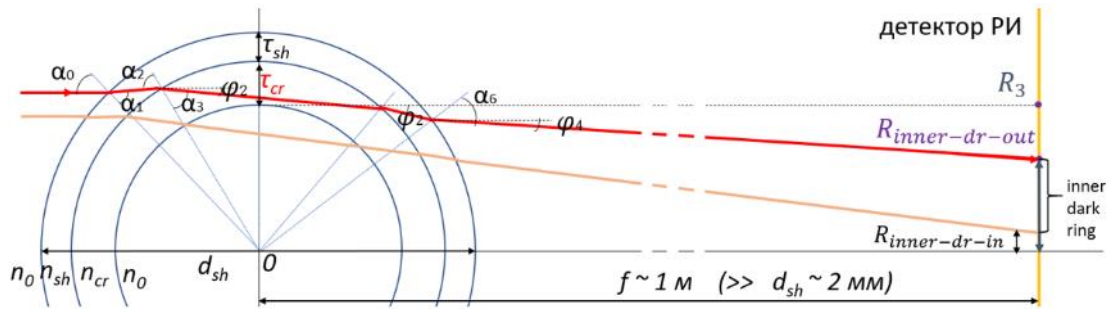


Рисунок 3.34 – Схематичное прохождение групп лучей через капсулу с ТСТ, характеризующих толщину ТСТ

На рисунке 3.35 видно, что поправка к видимому положению внутренней поверхности ТСТ для определения фактического положения мала и растет с увеличением расстояния до детектора, но составляет не более 0,0025, то есть для капсулы диаметром 2 мм – не более 2,5 мкм. Тем не менее, и эта величина является критичной с учетом требований к шероховатости внутренней поверхности ТСТ не более 1-2 мкм.

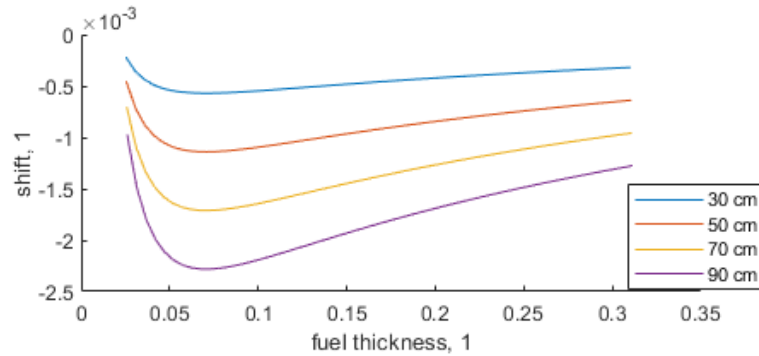


Рисунок 3.35 – Сдвиг видимой на РФК изображении толщины ТСТ относительно реальной в плоскости экватора для разных расстояний капсула - детектор

3.2.2.3 Трехмерное численное моделирование распространения пучка рентгеновского излучения через криогенную мишень с возмущениями поверхностей

Проведено трехмерное моделирование прохождения пучка рентгеновского излучения через криогенную мишень методом трассировки лучей. На основе трехмерного моделирования разработана программа трассировки РИ, в которой входными данными являются параметры КМ (показатели преломления и декременты ослабления РИ с энергией $\approx 8-10$ кэВ в слоях капсулы, параметры всех поверхностей в приближении эллипсоидов со смещениями центров – учет первых двух мод возмущений поверхностей), параметры рентгеновской системы диагностики (расходимость и угол наклона пучка РИ относительно оси наблюдения; расстояния от микрофокусного источника РИ до КМ и от КМ до детектора), диаметры окон бокса-конвертера, ограничивающие диаметры входного и выходного пучка; число лучей ($\approx 10^6-2 \cdot 10^6$ лучей)). По этим входным данным в программе моделируется РФК изображение КМ.

Принцип трехмерного моделирования распространения РИ аналогичен трехмерному моделированию для видимого излучения (описанному в пункте 3.2.1.4) с той лишь разницей, что в рентгеновском диапазоне показатель преломления $n < 1$. Интенсивность луча при прохождении через каждый слой вычисляется по закону Бугера-Ламберта-Бэра $Int_i = Int_{i-1} \cdot \exp(-\mu l)$, где $l = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$ – путь, который луч прошел в слое от $(i-1)$ -й до i -й поверхности.

На рисунке 3.36 представлен пример моделирования распространения параллельного пучка РИ через КМ, для двух осей наблюдения. Параметры моделирования: внешний диаметр ПАМС капсулы 2 мм, внутренняя поверхность описывается уравнением (3.37), внутренняя поверхность твердого слоя D_2 -топлива – уравнением (3.38) (единицы измерения - в микронах). Расстояние от капсулы до детектора 100 см, число лучей 10^6 . По рисунку 3.39 видно, что

вычисленные по зависимостям (2.23), (3.35)–(3.36) положения внутренней поверхности капсулы и ТСТ полностью совпадают с заданными.

$$\frac{(x+5)^2}{950^2} + \frac{(y-5)^2}{945^2} + \frac{(z)^2}{940^2} = 1 \quad (3.37)$$

$$\frac{(x+75)^2}{800^2} + \frac{(y+50)^2}{850^2} + \frac{(z-50)^2}{750^2} = 1 \quad (3.38)$$

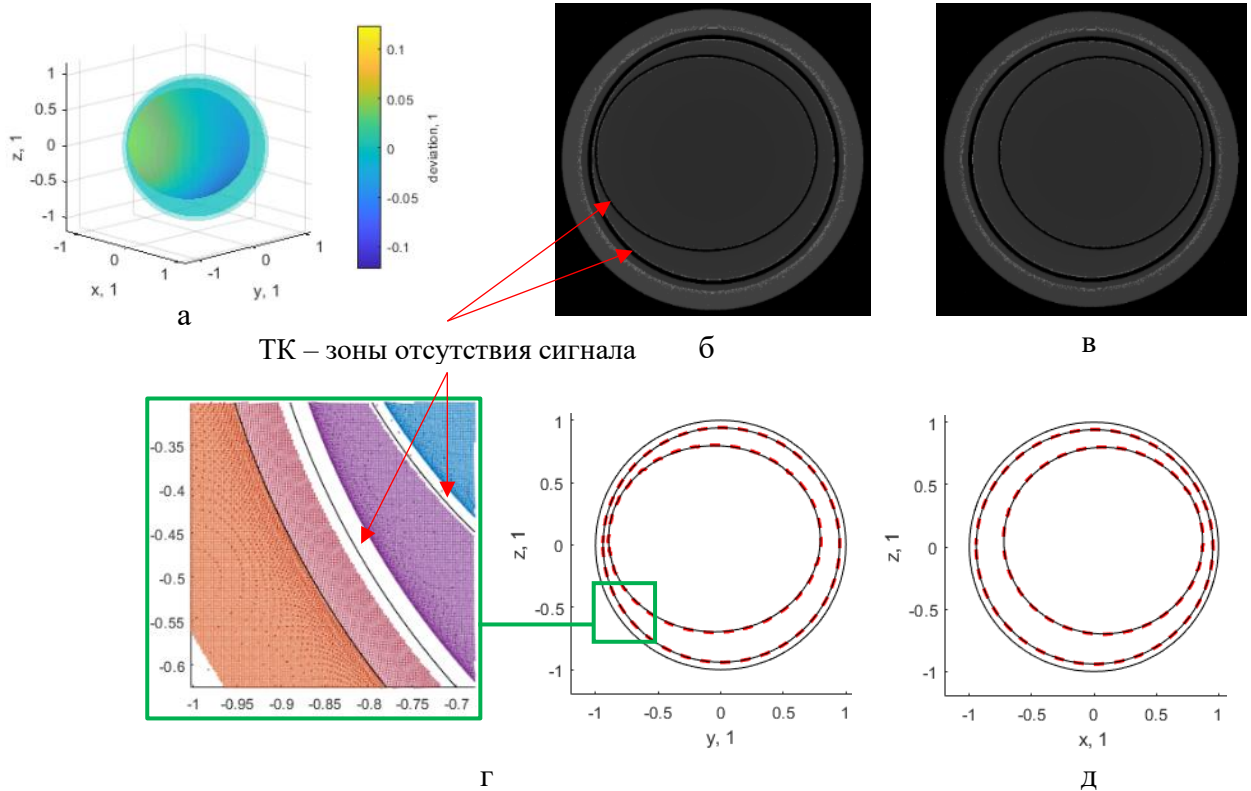


Рисунок 3.36 – Пример трехмерного моделирования распространения пучка РИ через КМ.

а) Заданные поверхности капсулы и ТСТ. РФК изображения: б) в плоскости $X=0$ (плоскости 1), в) в плоскости $Y=0$ (плоскости 2). Заданные положения поверхностей (черный цвет) и вычисленные по зависимостям (2.23), (3.35)–(3.36) положения (красный): г) в плоскости $X=0$, д) в плоскости $Y=0$. На увеличенной области показаны положения лучей в плоскости детектора (разными цветами обозначены разные группы лучей)

В случае с гармоническими возмущениями поверхностей результаты аналогичные. На рисунке 3.37 представлен пример моделирования распространения пучка РИ через КМ со следующими параметрами: ПАМС капсула диаметром 2000 мкм и толщиной стенки 50 мкм, твердое D_2 -топливо толщиной 150 мкм с возмущениями внутренней поверхности в моде $l=1$ с амплитудой 50 мкм и моде $l=8$ с амплитудой 20 мкм. Как видно, внешний край внутреннего ТК, характеризующего внутреннюю поверхность ТСТ, полностью повторяет возмущения поверхности в плоскости экватора.

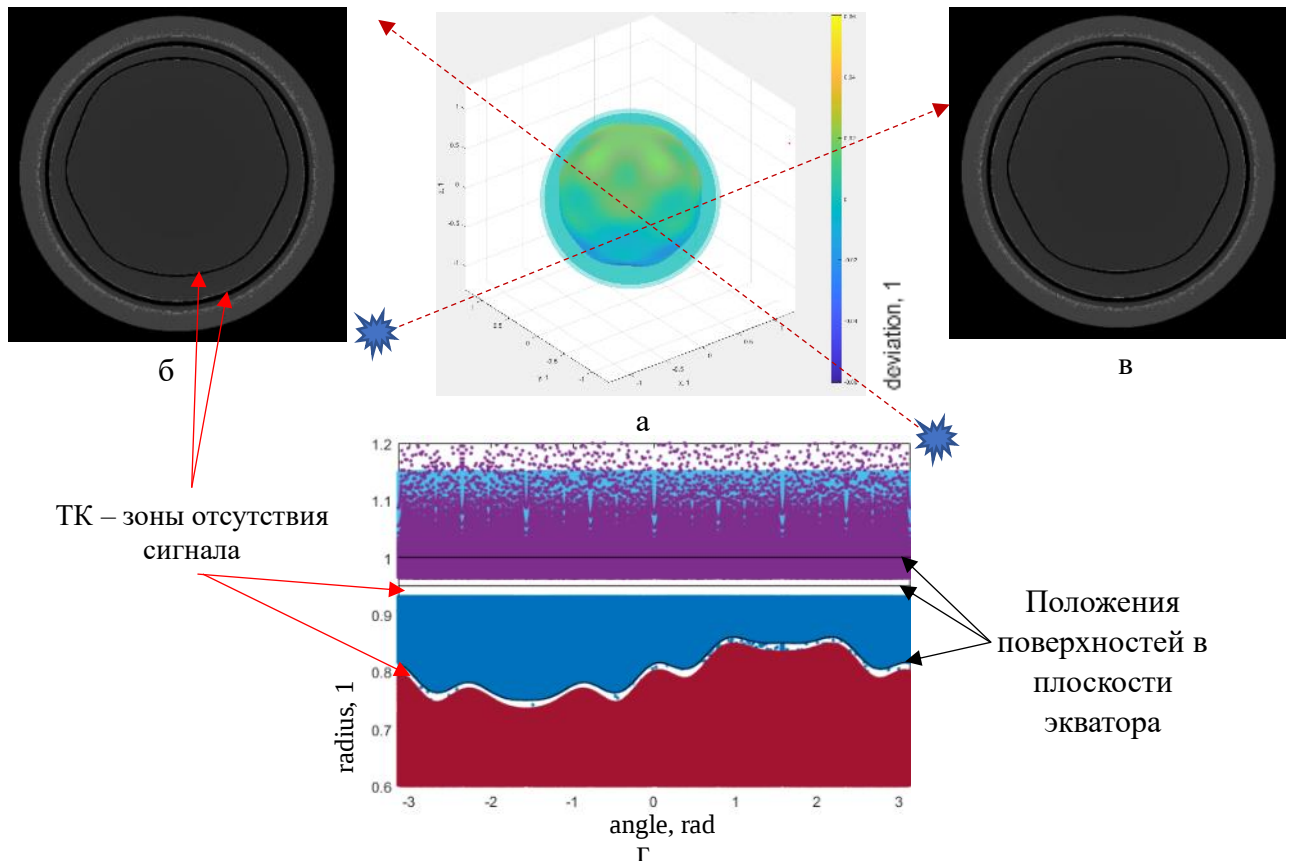


Рисунок 3.37 – Пример трехмерного моделирования распространения пучка РИ через КМ с гармоническими возмущениями поверхностей. а) Заданные поверхности капсулы и ТСТ. РФК изображения в плоскостях: б) $Y=0$, в) $X=0$. г) Развертка положения лучей в плоскости детектора (разными цветами обозначены разные группы лучей)

Ряд моделирований с различными возмущениями внутренних поверхностей капсулы и ТСТ показал аналогичные результаты. Таким образом, для РФК метода возмущения поверхностей не вносят ошибки при диагностике параметров поверхностей, в отличие от оптического теневого метода, соответственно, параметры поверхностей определяются с разрешением до 2,5 мкм, что определяется разрешением экспериментального изображения ($\approx 2,5$ мкм/пиксель), что было описано в пункте 2.1.2.

3.2.2.4 Точность восстановления двумерного спектра пространственных мод возмущений внутренней поверхности твердого слоя топлива по двум анализируемым экваторам

Конструкция КМ непрямого сжатия РФЯЦ-ВНИИЭФ позволяет выполнять наблюдение слоя топлива только в двух перпендикулярных друг другу вертикальных плоскостях экватора капсулы (количество анализируемых экваторов $k=2$). Поэтому с помощью численного моделирования, где поверхность заведомо известна и задана с помощью сферических гармоник, необходимо проанализировать точность восстановления двумерного

СПМ по двум перпендикулярным друг другу анализируемым экваторам (соответственно эксперименту).

В качестве примера на рисунке 3.38 приведен анализ поверхности радиусом 800 мкм (0,8 в единицах внешнего радиуса капсулы) с возмущением в моде $l=5$ и амплитудой $A_{given}=20$ мкм. Случаи, представленные на рисунке 3.38, б, в, г отличаются между собой случайной начальной фазой моды ($\varphi_0=0, \pi/4, \pi/6$ соответственно), т.е. ориентацией возмущения относительно двух плоскостей наблюдения. В случае $\varphi_0=0$ максимум возмущения попадает в обе анализируемые плоскости и амплитуда двумерной моды вычисляется достаточно точно ($A_{calc}=19,4$ мкм). В случае $\varphi_0=\pi/4$ возмущения совсем не попадают в анализируемые плоскости. А в случае $\varphi_0=\pi/6$ возмущения попадают в анализируемые плоскости, но не в максимуме, и поэтому вычисленная амплитуда моды занижена в два раза ($A_{calc}=9,7$ мкм). Увеличение числа анализируемых плоскостей до восьми с шагом $\pi/8$, может привести к повышению точности определения амплитуд двумерных мод ($A_{calc}=13,8$ мкм), как видно на рисунке 3.38, д. Для исключения ошибки вычисления амплитуды вследствие усреднения $P_{1D\ i}(n)$ по всем плоскостям (как было предложено в работе [95] и приведено в пункте 2.1.1) приведено сравнение со случаем, когда двумерный спектр $P_{2D}(l)$ вычислен не по усредненному одномерному спектру $\overline{P_{1D}(n)} = \frac{\sum_{i=1}^k P_{1D\ i}(n)}{k}$, а по максимальному $P_{1D\ max}(n) = \max(P_{1D\ i}(n))$, и амплитуда двумерной моды при этом вычислена лучше ($A_{calc}=19,3$ мкм), но также повышается и амплитуда ошибочно выделенной моды $l=1$.

Ниже приведен пример анализа поверхности радиусом 800 мкм (0,8 в единицах внешнего радиуса капсулы) с возмущениями в нескольких модах: от $l=1$ до $l=10$ со случайной начальной фазой φ_0 для каждой моды и одинаковой амплитудой ($A=20$ мкм) для всех мод. На рисунке 3.39, б анализ выполняется в двух вертикальных плоскостях наблюдения с шагом $\pi/2$, соответственно конструкции КМ РФЯЦ-ВНИИЭФ, а на рисунке 3.39, в – в восьми вертикальных плоскостях с шагом $\pi/8$. По рисунку 3.39, г видно, что увеличение числа анализируемых плоскостей может приводить к увеличению точности вычисления амплитуд двумерных мод. Поскольку основной интерес вызывает применение данного анализа к экспериментальным результатам, проведено сравнение ошибок вычисления $P_{2D}(l)$ для данной поверхности по усредненному одномерному спектру $\overline{P_{1D}(n)}$ и по максимальному $P_{1D\ max}(n)$. Ошибки в амплитудах двумерных мод в целом меньше при использовании $P_{1D\ max}(n)$, как видно на рисунке 3.39, д. Также получено, что ошибки вычисления амплитуд возмущений линейно увеличиваются с увеличением амплитуды, но для разных мод по-разному.

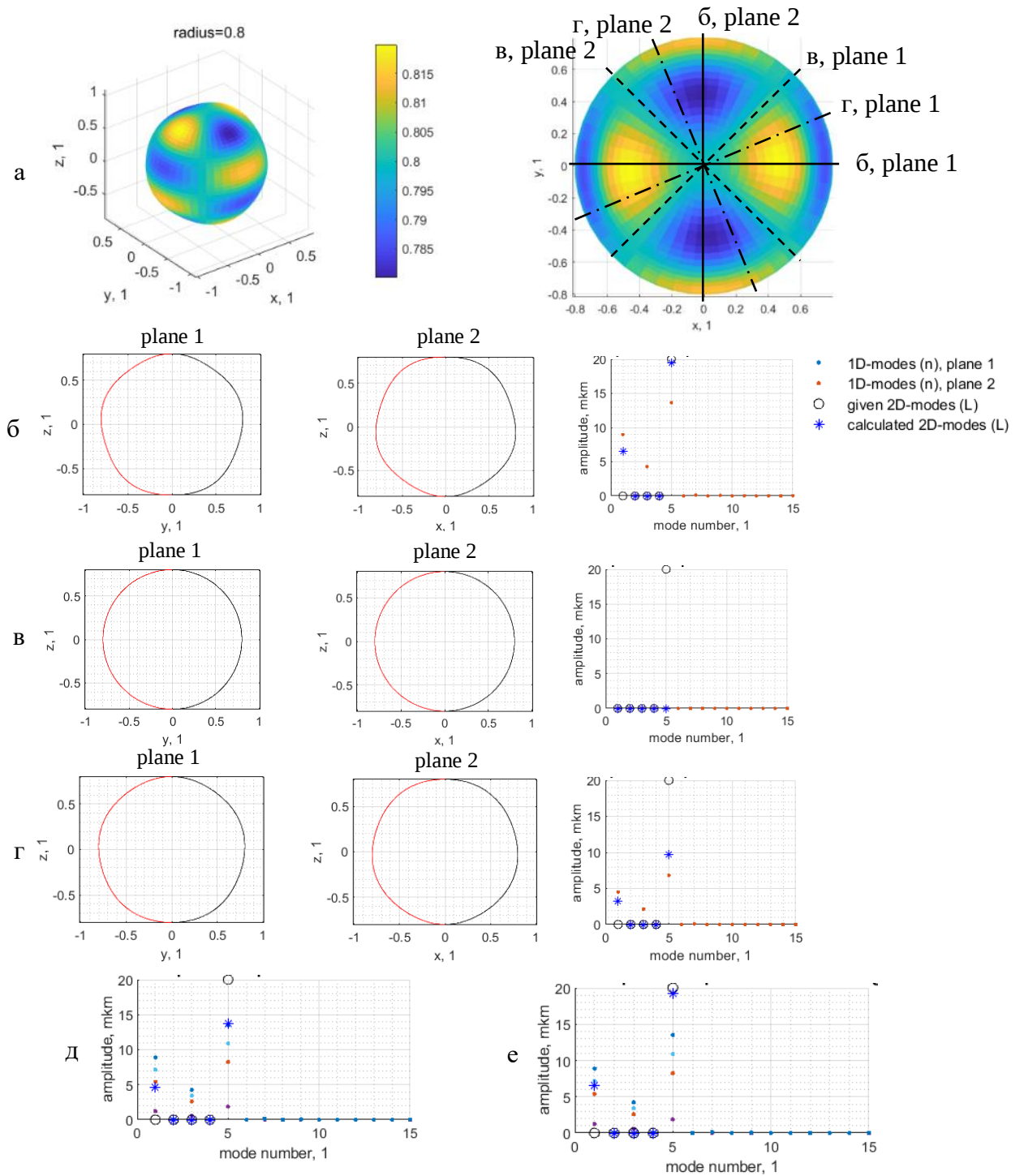


Рисунок 3.38 – Определение амплитуды возмущения поверхности в моде $l=5$ для трех случаев его ориентации относительно двух плоскостей наблюдения (заданная амплитуда $A_{given}=20$ мкм): б) $\phi_0=0$, $A_{calc}=19,4$ мкм, в) $\phi_0=\pi/4$, $A_{calc}=0$, г) $\phi_0=\pi/6$, $A_{calc}=9,7$ мкм.

Вычисление по восьми вертикальным плоскостям наблюдения с шагом $\pi/8$:
 д) по среднему $P_{1D_i}(n)$, $A_{calc}=13,8$ мкм, е) по максимальному $P_{1D_i}(n)$, $A_{calc}=19,3$ мкм

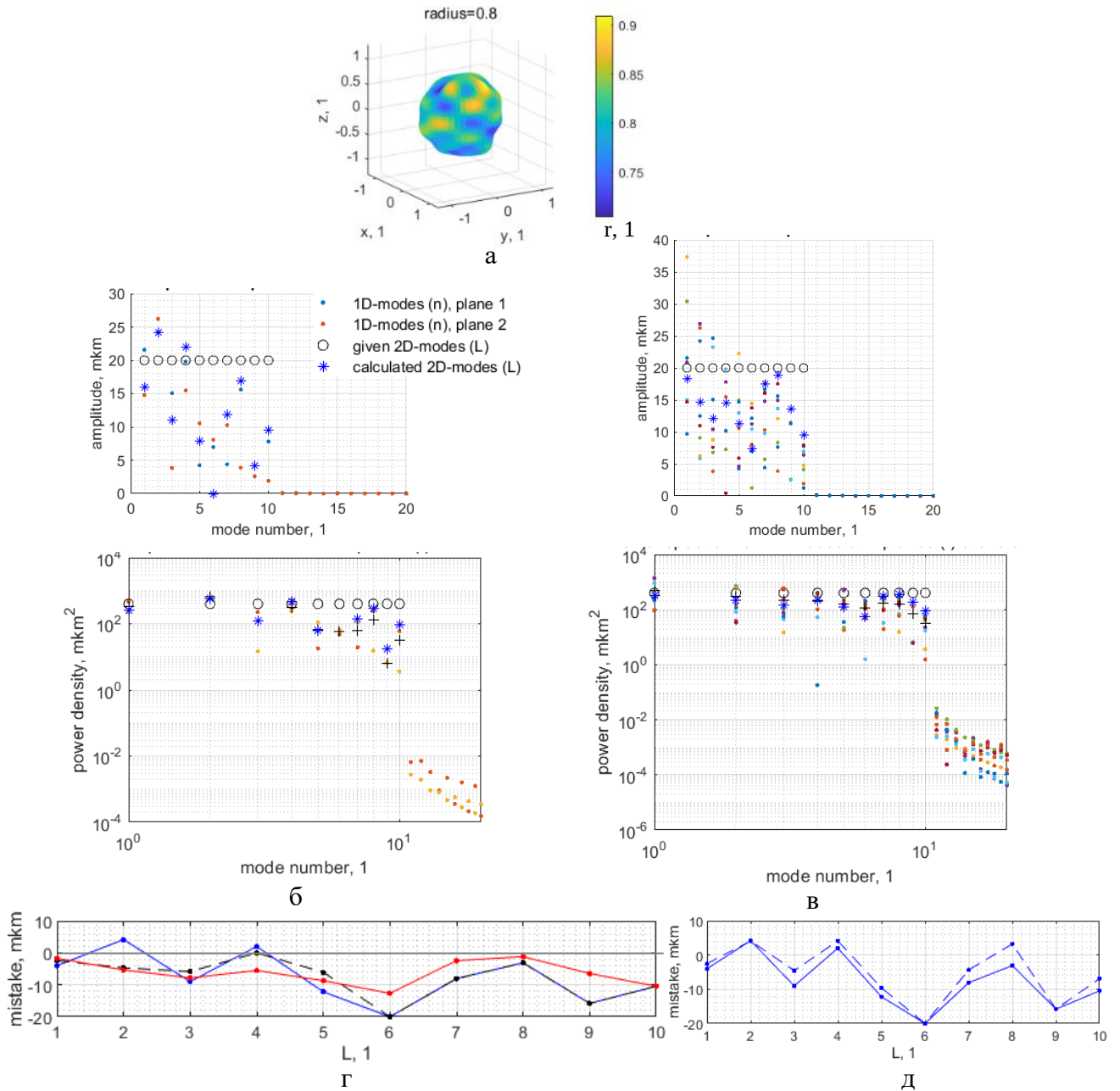


Рисунок 3.39 – Сравнение вычисления двумерного СПМ при использовании: б) двух вертикальных плоскостей наблюдения с шагом $\pi/2$, в) восьми вертикальных плоскостей наблюдения с шагом $\pi/8$. Задана поверхность с возмущениями в модах от $l=1$ до $l=10$ со случайной начальной фазой φ_0 для каждой моды и одинаковой амплитудой ($A=20$ мкм) для всех мод. г) ошибки определения амплитуд мод l по 2 плоскостям (синий цвет), по 4 плоскостям (черный пунктир), по 8 плоскостям (красный цвет). д) Сравнение ошибок вычисления амплитуд двумерных мод по двум плоскостям наблюдения с использованием усредненного одномерного СПМ $\overline{P_{1D}}(n)$ (сплошная линия) и максимального одномерного СПМ $P_{1D \max}(n)$ (пунктирная линия)

Таким образом, показано, что точность вычисления двумерного СПМ зависит от следующих факторов:

– экспериментально ограниченное конструкцией бокса-конвертера число анализируемых плоскостей (плоскостей наблюдения);

- ориентация возмущений относительно плоскостей наблюдения: амплитуда двумерной моды занижается, если максимум амплитуды возмущения в данной двумерной моде не попадает ни в одну анализируемую плоскость, а также если при вычислении двумерного СПМ использовать усредненный по всем анализируемым плоскостям одномерный СПМ;

- амплитуда возмущений: с увеличением амплитуд мод увеличиваются ошибки в вычислении их амплитуд.

3.3 Обработка результатов эксперимента по формированию твердого слоя топлива в капсуле

После того, как для ОТ и РФК методов определены механизмы формирования изображений КМ, выявлены характеристические группы лучей и решены обратные задачи для нахождения взаимосвязей положений характеристических особенностей на изображениях с положениями поверхностей КМ и исследовано влияние возмущений поверхностей на формирование изображений, можно применять данные методы для обработки результатов экспериментов.

3.3.1 Видимость дефектов на оптических теневых изображениях

Видимость дефектов на ОТ изображениях проанализирована с использованием полых ПАМС и СН капсул путем исследования неоднородностей разных размеров на их внешних поверхностях с помощью оптического профилометра и наблюдения этих же неоднородностей с помощью используемой на стенде исследования мишеней при низких температурах ОТ системы (параметры системы были указаны в пункте 2.1.1). В качестве примера приведена полая СН капсула диаметром (2184 ± 1) мкм. ОТ изображение при фокусировке на внешней поверхности передней по отношению к объективу стенки капсулы приведено на рисунке 3.40, а.

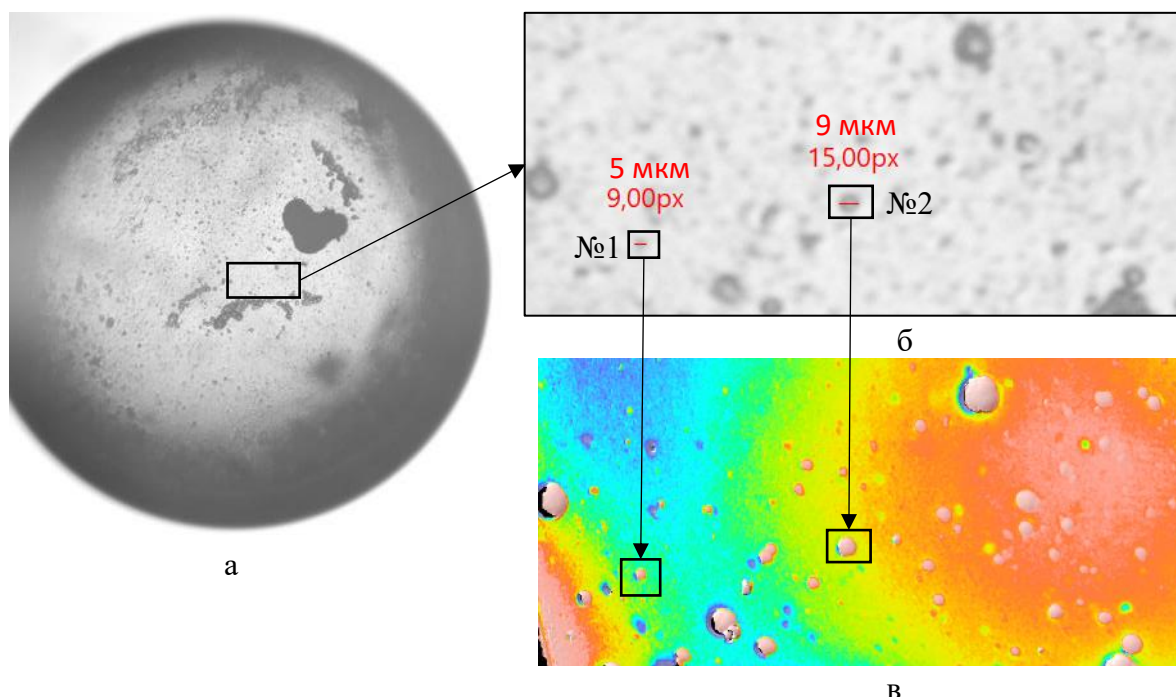


Рисунок 3.40 – Определение видимости дефектов на ОТ изображении:
 а) ОТ изображение полый СН капсулы диаметром (2184 ± 1) мкм; одна и та же область поверхности на ОТ изображении (б) и на топографии, полученной с помощью оптического профилометра (в)

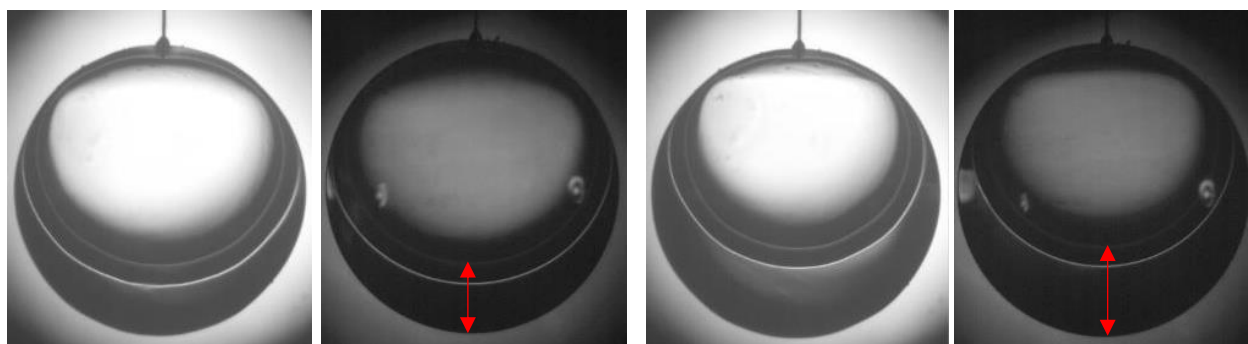
На рисунке 3.40, б, в представлена одна и та же область поверхности на ОТ изображении и на топографии, полученной на оптическом профилометре соответственно (на топографии вычтена сферическая форма для более четкого отображения неоднородностей). Получено, что минимальный латеральный размер неоднородности, видимой на ОТ изображении, составляет 5 мкм (неоднородность №1 высотой 0,4 мкм), при этом по изображению нельзя определить характер неоднородности (выпуклость или впадина). Эти результаты, полученные с помощью ОТ схемы наблюдения и оптического профилометра, подтверждают критерий Релея: минимальное разрешаемое расстояние для объектива с числовой апертурой 0,06 составляет 5,0 мкм в видимом свете. Для определения характера неоднородности она должна иметь латеральный размер более 8 мкм, тогда на ОТ изображении выпуклость может иметь светлое пятно в центре (неоднородность №2 высотой 0,7 мкм).

Ширина характеристических колец на ОТ изображении полых капсул и капсул с твердым и жидким слоем топлива составляет от 5 мкм, что соответствует критерию Релея. Тем не менее, благодаря большому размеру матрицы камеры (4912×3684 пикселей) разрешение изображения составляет в среднем 0,6 мкм/пиксель (зависит от диаметра капсулы, поскольку ОТ система настраивается так, чтобы капсула была полностью видна на камере с максимальным увеличением). Поэтому положение характеристических колец по изображению измеряется с субмикронной разрешением (в среднем до 0,6 мкм), что и определяет точность вычисления толщины ТСТ в случае, если капсула и ТСТ однородные по

толщине (сферически симметричный случай). В случае сферически несимметричных поверхностей капсулы и ТСТ добавляется еще неопределенность восстановления поверхности, что было описано в пункте 3.2.1.5: для ряда разных случаев с сильно возмущенной в двух первых модах внутренней поверхностью ТСТ (разнотолщинность ТСТ до 100%) получено, что величина максимального отклонения восстановленной поверхности от реальной не превышает 13 мкм для капсулы диаметром 2 мм при условии использования предложенного метода введения поправок для учета потенциальных ошибок из-за сферической асимметрии поверхностей.

3.3.2 Диагностика параметров жидкого и твердого топлива в капсуле с использованием оптического теневого метода

Дозирование жидкого топлива в объем капсулы осуществляется по видимой высоте мениска жидкого топлива на ОТ изображении. Для этого разработана программа, в которой для требуемой толщины ТСТ вычисляется форма свободной поверхности жидкого топлива и для параметров используемой капсулы (диаметр, толщина стенки), текущего размера пикселя на камере моделируется положение характеристического БК на вертикальной оси, что было подробно описано в пункте 3.2.1.7. Пример наполнения капсулы топливом представлен на рисунке 3.42.



а б
Рисунок 3.42 – Наполнение через капилляр полый ПАМС капсулы диаметром (2000 ± 1) мкм, $\bar{\tau} = 30$ мкм и $\Delta\tau = 5\%$ жидким D_2 внешним диаметром (22 ± 1) мкм. Наблюдение с двух ортогональных оптических осей. Интервал между кадрами (а) и (б) составляет 13 мин

При достижении нужной видимой высоты мениска, с учетом дозаполнения капсулы из магистрали подачи D_2 (время которого определяется экспериментально, поскольку отличается для каждого КМУ и зависит от внутреннего диаметра капилляра) напуск прекращается. Далее выполняется замораживание и выравнивание внутренней поверхности ТСТ, в процессе которого необходимо оценивать параметры ТСТ.

Для ОТ контроля параметров ТСТ разработана программа, в которой необходимо задать диаметр и толщину стенки капсулы в [мкм], названия ОТ изображений 1 и 2 для обработки, полученных в один момент времени в двух взаимно перпендикулярных плоскостях фокусировки объективов. Для анализируемого далее примера, приведенного на рисунке 3.43, известны следующие параметры: диаметр ПАМС капсулы составляет (2000 ± 1) мкм, $\bar{\tau} = 30$ мкм, $\Delta\tau = 5\%$, топливо – D_2 . Первый блок программы – определение параметров внутренней поверхности ТСТ по ЯК на полутоновом изображении 1. Поиск внешней границы и центра капсулы на исходном и развернутом изображении выполняется так же, как и на РФК изображении пустой капсулы, что было описано в пункте 2.1.2. Далее проводится идентификация внешнего и внутреннего краев ЯК на развернутом изображении, как показано на рисунке 3.44, а. Финальное положение ЯК $R_{BR}(\varphi)$, показанное на рисунке 3.44, б, используется для вычисления толщины $\tau_{crBR}(\varphi)$ и радиуса $\rho_{crBR}(\varphi)$ (где φ изменяется от 0 до 360°) ТСТ с использованием зависимостей (3.6)–(3.7), полученных при решении обратной задачи для ЯК. $R_{BR}(\varphi)$ и $\rho_{crBR}(\varphi)$ преобразуются в декартову систему координат $((x_{BR}, y_{BR})$ и (x_{crBR}, y_{crBR}) соответственно) и наносятся на исходное ОТ изображение, как показано на рисунке 3.44, в для оценки корректности всех выполненных действий. По (x_{crBR}, y_{crBR}) вычисляется уравнение внутренней поверхности ТСТ в виде эллипса в плоскости фокусировки объектива, показанное желтой пунктирной кривой на рисунке 3.44, в, для оценки направления смещений центра поверхности от центра капсулы.

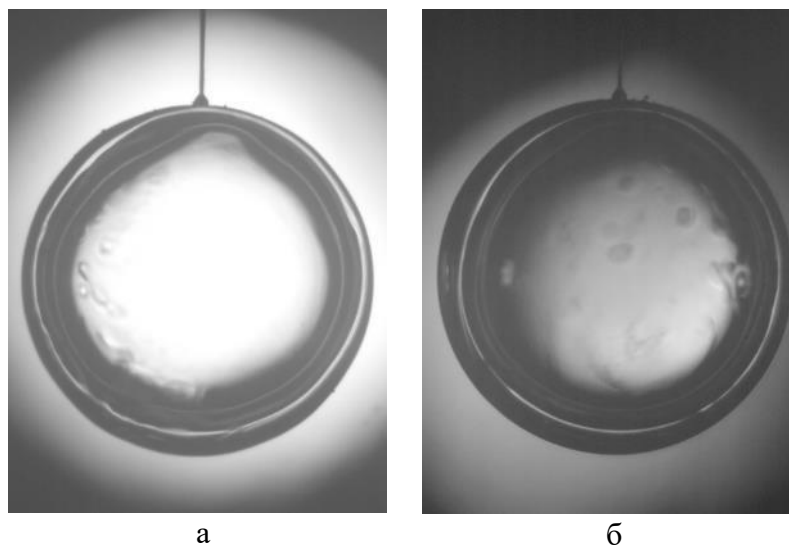


Рисунок 3.43 – ОТ изображения 1 (а) и 2 (б) капсулы с ТСТ (D_2), полученные в один момент времени в двух взаимно перпендикулярных плоскостях фокусировки объективов

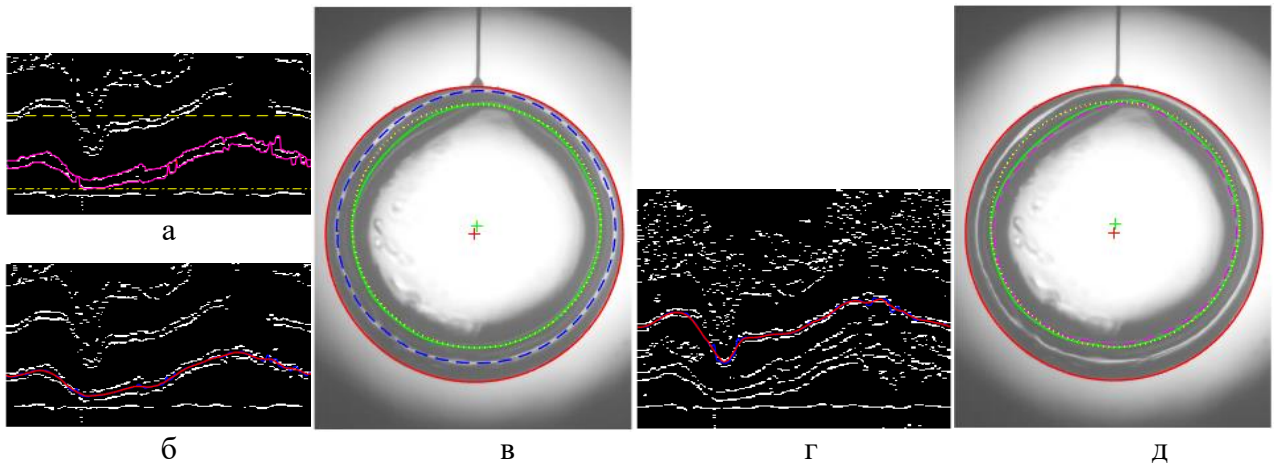


Рисунок 3.44 – Идентификация ЯК и БК на развернутом изображении 1. а)-в) ЯК: а) розовая нижняя кривая – внешний край ЯК, розовая верхняя – внутренний край ЯК, желтый цвет – интервалы поиска границ ЯК, б) финальные координаты ЯК, в) исходное ОТ изображение 1 с нанесенными ЯК (синяя штриховая линия), положением внутренней поверхности ТСТ в плоскости фокусировки объектива (зеленая сплошная линия), аппроксимация эллипсом (желтая пунктирная линия). г)-д) БК: г) финальные координаты БК, д) исходное изображение 1 с нанесенными БК (розовая штриховая линия), положением внутренней поверхности ТСТ в плоскости фокусировки объектива (зеленая сплошная линия), аппроксимация эллипсом (желтая пунктирная линия)

Второй блок программы – определение параметров внутренней поверхности ТСТ по БК на изображении 1. К полутоновому изображению применяется фильтр Канни по более низкому уровню интенсивности, чем при анализе ЯК, для того чтобы на бинарном изображении присутствовали внешний и внутренний края БК. Выполняются такие же действия, как и при анализе ЯК. Поскольку при развертке изображения с оптимальным для БК порогом интенсивности на бинарном изображении добавляется еще близко расположенное к нему кольцо, образованное группой лучей с двумя ПВО от внутренней поверхности ТСТ, а также близко расположенный край светлого пятна, которые значительно затрудняют идентификацию БК на развернутом изображении, может использоваться дополнительный блок поиска элементов БК в проблемных областях, в том числе и с разверткой по другому уровню интенсивности. Финальное положение БК $R_{TR}(\varphi)$ показано на рисунке 3.44, а и используется для вычисления толщины $\tau_{crTR}(\varphi)$ и радиуса $\rho_{crTR}(\varphi)$ (где φ изменяется от 0 до 360°) ТСТ с использованием зависимостей (3.8)–(3.9), полученных при решении обратной задачи для БК. Затем определенная по БК поверхность анализируется так же, как и поверхность, определенная по ЯК. Третий и четвертый блок программы – такие же, как первый и второй, но для изображения 2, результаты по которому представлены на рисунке 3.45.

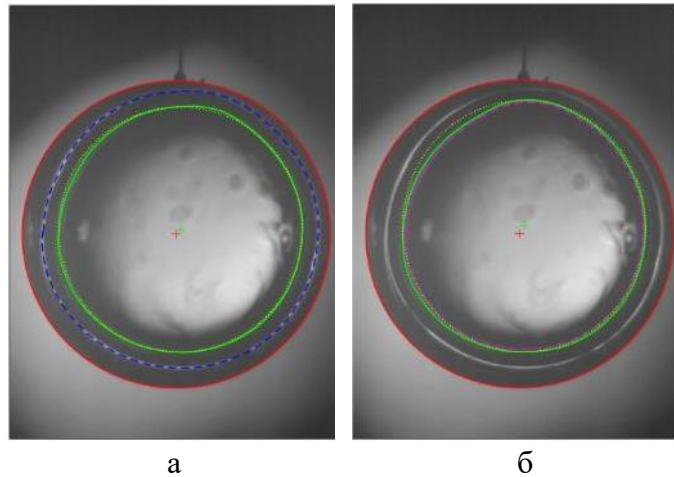


Рисунок 3.45 – Исходное изображение 2 с нанесенным положением внутренней поверхности ТСТ в плоскости фокусировки объектива (зеленая сплошная линия) с аппроксимацией эллипсом (желтая пунктирная линия), вычисленным: а) по ЯК (синяя штриховая линия), б) по БК (розовая штриховая линия)

В результате после выполнения четырех блоков получают четыре зависимости толщины ТСТ от угла, $\tau_{cr}(\varphi)$, – две по изображению 1 (ЯК и БК) и две по изображению 2 (ЯК и БК), представленные на рисунке 3.46, а. В положениях 90° и 270° (отмечены зеленой пунктирной линией на рисунке 3.47, а) все четыре толщины должны совпадать между собой, поскольку 90° – это одна и та же точка на северном полюсе поверхности, а 270° – на южном. Как видно, это не выполняется вследствие того, что анализируемая КМ не является сферически симметричной и искажается ход характеристических групп лучей, используемых для восстановления внутренней поверхности ТСТ, в результате чего расхождение толщины в одной и той же точке достигает более 0,050 (в единицах радиуса капсулы). В этом случае можно использовать предложенный в пункте 3.2.1.7 метод введения поправок при диагностике параметров ТСТ ОТ методом с учетом потенциальных ошибок, результат которого представлен на рисунке 3.46, б. В положении 90° разность толщин (вычисленная по двум изображениям) составляет 0,003, а в положении 270° – 0,014. Для такого неоднородного по толщине ТСТ это удовлетворительный результат. Средняя толщина слоя топлива составляет $\bar{\tau} = 166$ мкм, разнотолщинность $\Delta\tau = 68\%$ (толщина находится в диапазоне от (101 ± 7) мкм до (213 ± 7) мкм).

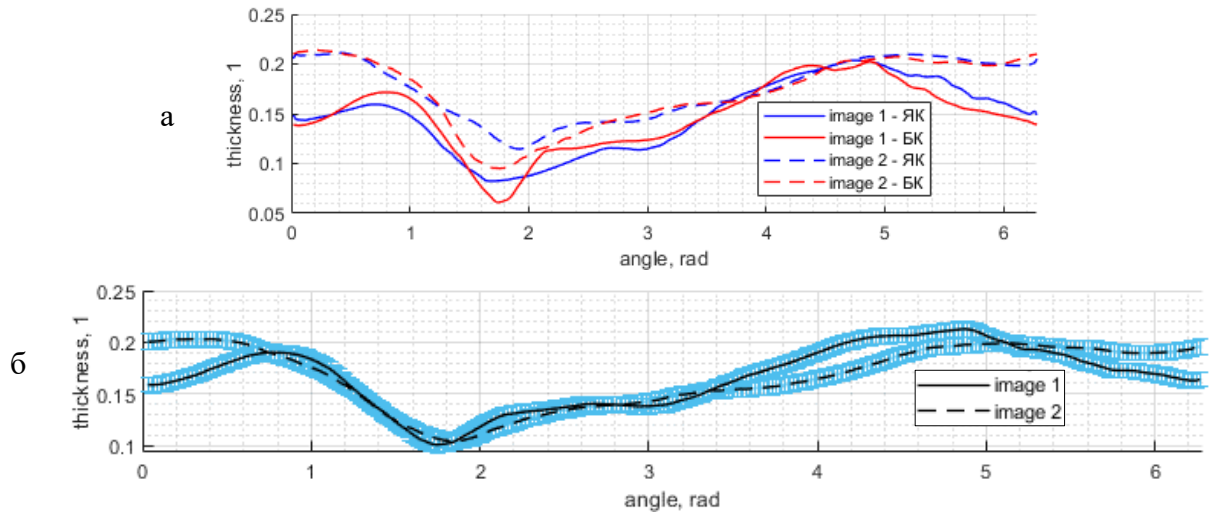


Рисунок 3.46 – Введение поправок к вычисленным по ЯК и БК толщинам ТСТ в двух перпендикулярных плоскостях 1 и 2 фокусировки объективов: а) толщина, вычисленная напрямую по полученным зависимостям, б) финальная скорректированная толщина.

Сплошная линия – результаты в плоскости 1, штриховая – в плоскости 2

Для понимания распределения температуры в капсуле и ТСТ выполняется трехмерное восстановление внутренней поверхности ТСТ в приближении двух первых мод относительно составляющих КМУ. Для данного примера восстановленная поверхность описывается уравнением (3.39):

$$\frac{(x+0,027)^2}{0,796^2} + \frac{(y-0,010)^2}{0,821^2} + \frac{(z-0,044)^2}{0,812^2} = 1 \quad (3.39)$$

и представлена на рисунке 3.47. Для поверхности определяются отклонения от концентричности и сферичности, которые составляют в данном случае 3,3% и 3,1% соответственно. Очевидны две области: с более толстым ТСТ (желтый цвет) и с более тонким (голубой цвет). Далее с использованием данной информации выполняется анализ результатов эксперимента по формированию ТСТ в капсуле.

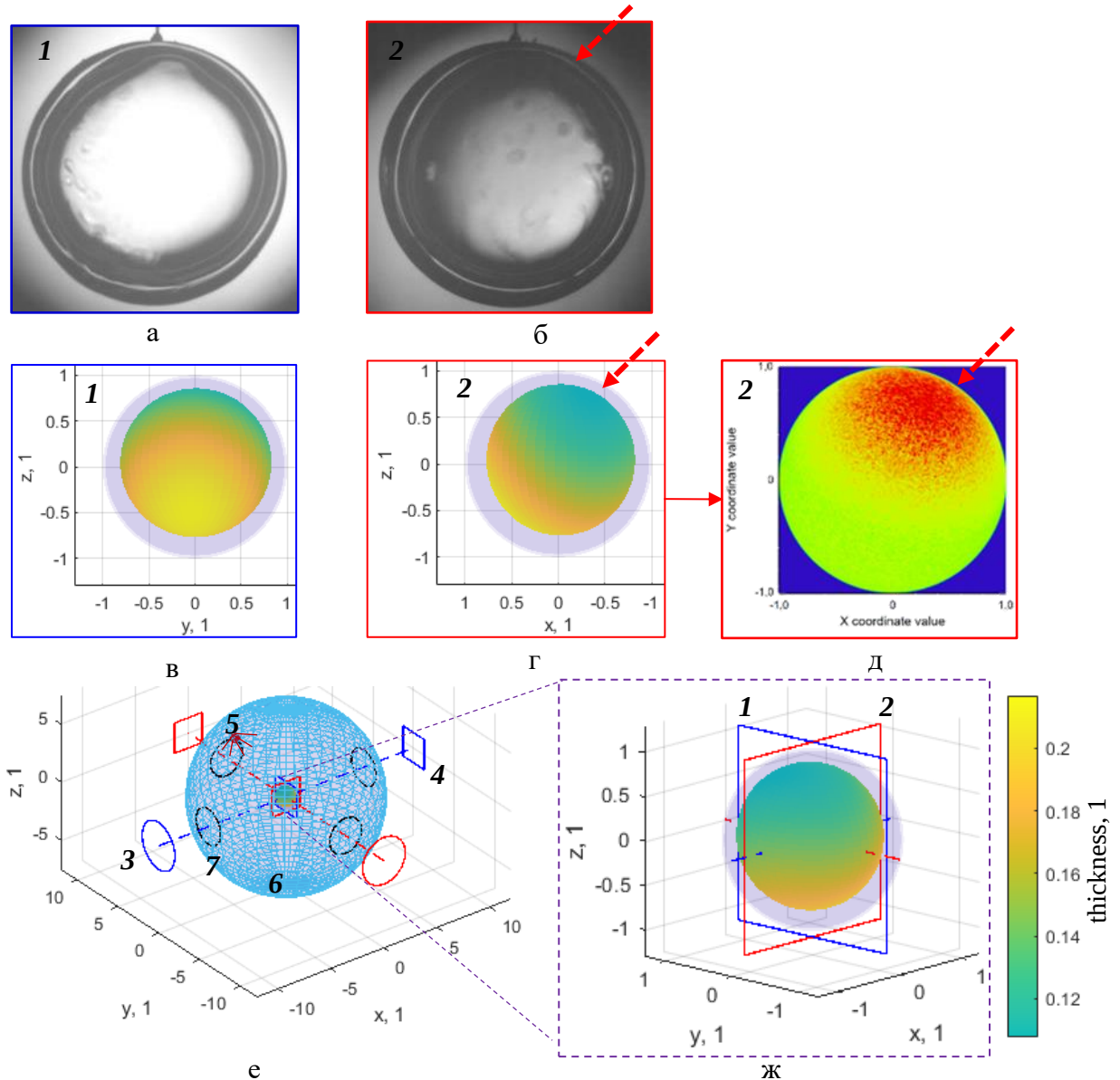


Рисунок 3.47 – Наблюдение КМ с двух взаимно ортогональных осей.

(а), (б) - ОТ изображения 1 и 2 соответственно.

(в), (г) – Вид восстановленной внутренней поверхности ТСТ, соответствующий изображениям (а) и (б). д) Интенсивность падающего на поверхность капсулы ИК-излучения. е) Трехмерная схема взаимного расположения капсулы с ТСТ, источников освещения 3, детекторов 4, диффузного источника ИК-излучения 5 на внутренней поверхности 6 бокса с четырьмя диагностическими окнами 7, и плоскостей 1 и 2 фокусировки объективов. ж) Увеличенный вид поверхностей капсулы и ТСТ (линейные размеры отображают радиус поверхностей, цветная шкала – толщина ТСТ). Штриховая стрелка показывает области более тонкого ТСТ

В случае DT-топлива выравнивание ТСТ происходит за счет тепловыделения в результате бета-распада трития: в объеме более толстой области ТСТ тепловыделение больше, чем в объеме более тонкой области, поэтому из более нагретой толстой области лед (твердое топливо) испаряется и конденсируется в более холодной тонкой области, что в конечном итоге приводит к тому, что внутренняя поверхность ТСТ выравнивается по изотермической

поверхности. Для имитации данного процесса в слое D_2 используется ИК-излучение с центральной длиной волны 3,16 мкм (максимум поглощения D_2). Для максимально равномерного облучения капсулы с ТСТ коллимированный пучок ИК-излучения диаметром 0,6 мм заходит в бокс через дополнительное отверстие, попадает на шероховатую золотую поверхность сферы выравнивания и рассеивается. Выполнено моделирование распространения ИК-излучения в для разных схем заведения пучка: наиболее высокая интенсивность ИК-излучения на поверхности капсулы получается в области, находящейся по нормали, построенной от центра капсулы к диффузному источнику, образующемуся при первом попадании коллимированного пучка на рассеивающую поверхность, как видно на рисунке 3.47, д. В этой области капсула и ТСТ греются больше, и топливо перестраивается из нее в более холодные области, в результате чего ТСТ в этом месте становится тоньше. После восстановления полной схемы эксперимента, представленной на рисунке 3.47, е, понятно, что такая форма внутренней поверхности ТСТ вызвана неравномерным облучением капсулы с ТСТ от диффузного источника ИК-излучения, который в данном случае является определяющим фактором для распределения температуры в капсуле и ТСТ. Таким образом, визуализация в пространстве внутренней поверхности ТСТ относительно составляющих КМУ помогает анализировать результаты эксперимента, тепловое окружение капсулы, выявлять недостатки КМУ и постановки эксперимента, и, соответственно, ставить задачи на следующие эксперименты.

На рисунке 3.48 приведены амплитуды одномерных мод внутренней поверхности ТСТ в анализируемых плоскостях, одномерные СПМ $P_{1D}(n)$ в сравнении с требованиями NIF к поверхности и двумерный СПМ $P_{2D}(l)$. Разрешимы только самые низкие моды от $n=1$ до $n=11$, амплитуда которых превышает разрешение экспериментального изображения (0,6 мкм). На рисунке 3.48, г визуализирована поверхность, построенная по вычисленным амплитудам двумерных мод l , возмущения распределены по поверхности со случайной начальной фазой φ_0 .

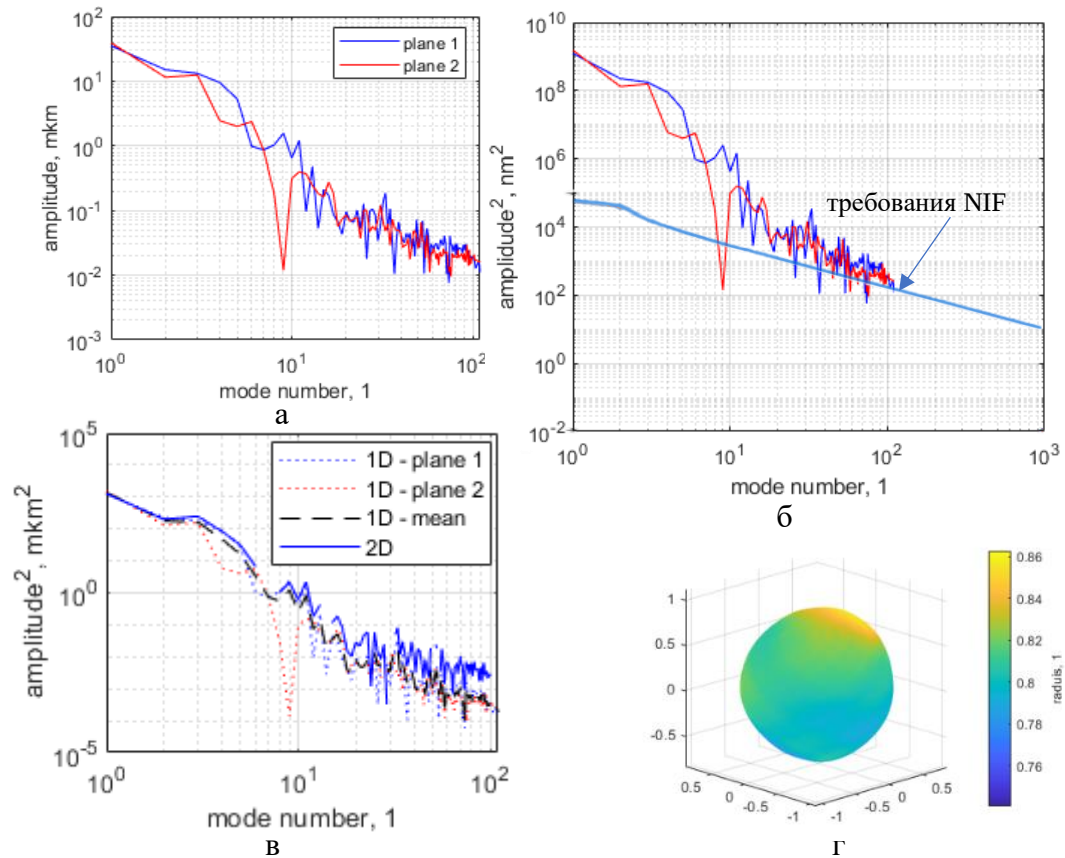


Рисунок 3.48 – Модовый анализ внутренней поверхности ТСТ: а) амплитуды одномерных мод n в двух анализируемых плоскостях. б) $P_{1D}(n)$ в двух плоскостях относительно требований NIF. в) $P_{2D}(l)$. Синий цвет - $P_{2D}(l)$, черный цвет - усредненный по k анализируемым экваторам $\overline{P_{1D}(n)}$, точечные линии - $P_{1D}(n)$ в плоскостях. г) Поверхность, построенная по $P_{2D}(l)$

3.3.3 Сравнение рентгеновского фазоконтрастного метода и оптического теневого метода

В случае дозирования жидкого топлива по РФК изображению видимая по внешнему краю внутреннего ТК высота мениска жидкости будет почти совпадать с фактической в плоскости экватора капсулы: как видно из рисунка 3.35, поправка к видимому положению внутренней поверхности слоя топлива (как твердого, так и жидкого) для определения фактического положения мениска, находится в пределах 2,5 мкм для капсулы Ø2 мм, и зависимость (3.35) - (3.36) используется для пересчета фактической высоты мениска жидкости в видимую на РФК изображении высоту. В разработанной программе по известным параметрам капсулы и требуемой толщине ТСТ вычисляется видимая по характеристическому кольцу на РФК изображении высота мениска жидкого топлива с учетом формы свободной поверхности жидкости. Однако, при условии, что съемка РФК изображения может производиться раз в несколько минут при выключенном компрессоре криостата (вибрации

компрессора передаются на криостат, и соответственно, на капсулу с топливом, и во время относительно длительной экспозиции при съемке размывают изображение), нужны дополнительные методы контроля напуска топлива. В частности, пробными напусками можно определять время наполнения до нужной высоты мениска жидкого топлива в конкретном КМУ (на время наполнения влияет диаметр проходного сечения капилляра), а также можно использовать газовые расходомеры массы напускаемого топлива. Для определения толщины стенки капсулы (оптически прозрачной/непрозрачной) и толщины ТСТ (D_2/DT) по РФК изображениям разработана программа. Принцип анализа изображения такой же, как ОТ изображения КМ и РФК изображения полой капсулы. Для определения положения поверхностей КМ по характеристическим ТК используются решения обратных задач (2.23), (3.35) - (3.36).

В криостате с возможностью работы с радиоактивным изотопом водорода и с РФК системой диагностики до настоящего времени еще не было экспериментов с наполнением капсулы топливом, поэтому в качестве примера на рисунке 3.49 представлено одновременное наблюдение по двум осям полой ПАМС капсулы диаметром (1952 ± 1) мкм, установленной в криостате для проведения эксперимента: по одной оси – наблюдение с помощью РФК системы, по второй, ортогональной, с помощью ОТ системы.

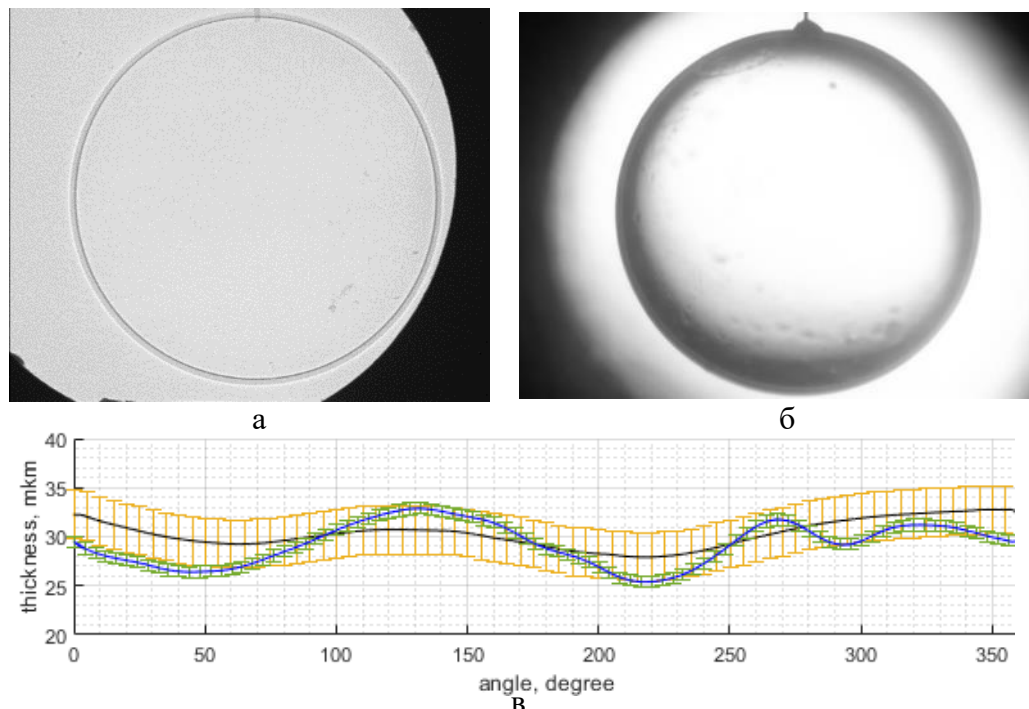


Рисунок 3.49 – Одновременное наблюдение по двум ортогональным осям полой ПАМС капсулы диаметром (1952 ± 1) мкм, установленной в криостате: а) с помощью РФК системы, б) с помощью ОТ системы. в) Толщина стенки, вычисленная по РФК изображению (черный цвет) и по ОТ изображению (синий цвет)

Параметры съемки РФК изображения: расстояние источник-капсула 11 см, расстояние капсула-детектор 51 см, параметры работы рентгеновской трубки: 60 кВ, 450 мкА, время кадра – 14,56 с, результат – среднее по 50 кадрам. Положение характеристического ТК измеряется с разрешением до 2,5 мкм. Средняя толщина стенки, вычисленная по РФК изображению (плоскость 1), составляет $\bar{\tau} = 30,3$ мкм с разнотолщинностью $\Delta\tau = 16\%$, толщина лежит в диапазоне от $(27,9 \pm 2,5)$ мкм до $(32,8 \pm 2,5)$ мкм. Амплитуда всех выделенных мод n внешней и внутренней поверхности меньше размера пикселя, поэтому все моды не разрешимы. Средняя толщина стенки, вычисленная по ОТ изображению (плоскость 2), составляет $\bar{\tau} = 29,3$ мкм с разнотолщинностью $\Delta\tau = 26\%$, толщина лежит в диапазоне от $(25,4 \pm 0,6)$ мкм до $(32,9 \pm 0,6)$ мкм. Амплитуды мод $n=2$ и $n=3$ равны 2,7 мкм и 0,8 мкм соответственно, амплитуды остальных мод меньше размера пикселя (0,6 мкм), и они неразрешимы. Результаты измерений двумя методами согласуются между собой в пределах погрешностей.

Оптический теневой метод, безусловно, обладает рядом преимуществ над РФК методом (имеет более высокое разрешение; позволяет выполнять непрерывное наблюдение и контроль за наполнением капсулы жидким топливом, начало и весь процесс кристаллизации топлива, формирование ТСТ; позволяет наблюдать гораздо большее количество различных дефектов капсулы и ТСТ), но применим только для оптически прозрачных капсул. При этом отработка технологии формирования монокристаллического ТСТ без дефектов может производиться только при непрерывном наблюдении за процессом формирования ТСТ, поскольку для обеспечения медленного роста монокристалла топлива требуется поддержание температуры возле тройной точки топлива, которая изменяется со временем и не является повторяемой величиной даже в пределах одного эксперимента. Оптическая теневая система наблюдения, благодаря возможности смещения плоскостей фокусировки объективов с экваторов мишени на ее поверхности, позволяет следить за ростом кристалла и видеть дефекты на всей внутренней поверхности топлива.

Поликристаллический слой топлива, не требующий тонкого баланса температуры, имеет много дефектов: трещины и бороздки на внутренней поверхности, канавки на стыке границ кристаллов, которые не сглаживаются в процессе выравнивания топлива и такой слой не может удовлетворять предъявляемым требованиям.

Разрешение ОТ метода может быть повышено путем использования объектива с большей числовой апертурой, но на выбор объективов накладывают ограничения габариты криостата: рабочее расстояние должно быть более 50 мм, а числовые апертуры таких объективов малы (в настоящее время используются лучшие из доступных объективов). Также для устранения влияния дисперсии, в результате которой размываются характеристические

кольца, можно использовать монохроматический источник света с малой длиной волны ≈ 400 нм. При этом оптимальная длина волны источника лежит в области 620 нм, что соответствует минимуму поглощения топлива для полного исключения влияния зондирующего излучения на качество ТСТ при его формировании при температуре около тройной точки.

Для непрозрачных капсул РФК метод контроля остается единственно возможным, даже несмотря на то, что позволяет осуществлять контроль за процессом формирования ТСТ только раз в несколько минут при выключенном компрессоре криостата. Тем не менее, РФК метод обладает важным преимуществом над оптическим тeneвым: возмущения поверхностей мишени не вносят ошибок при диагностике вследствие искажения хода характеристических групп лучей. Разрешение РФК метода с может быть повышено путем использования рентгеновской камеры с большим размером матрицы.

3.4 Заключение по главе

1. С помощью двумерного численного моделирования показано, что по характеристическим ЯК и БК на экспериментальном ОТ изображении КМ можно определять положение внутренней поверхности ТСТ с использованием полученных при решении обратных задач взаимосвязей положений колец и положения поверхности. Выявлены факторы, влияющие на точность диагностики параметров ТСТ.

2. Показано, что параметры ТСТ ($\bar{\tau}$, $\Delta\tau$, $P_{1D}(n)$ и $P_{2D}(l)$) в случае однородной по толщине стенки оптически прозрачной капсулы и однородного по толщине ТСТ вычисляются по оптическому теневому изображению с разрешением до 0,6 мкм для капсулы Ø2 мм.

3. С помощью трехмерного численного моделирования показано, что для ОТ метода возмущения внутренней поверхности ТСТ искажают ход характеристических групп лучей, при этом определяющее влияние оказывают возмущения в модах $l=1$ и $l=2$. Это вносит неопределенность при вычислении параметров ТСТ, поскольку обратная задача имеет решение только для сферически симметричной поверхности. Конструкция бокса-конвертера ограничивает число анализируемых плоскостей до двух взаимно перпендикулярных, что не позволяет определить поворот поверхности относительно вертикальной оси. В данных условиях предложенный метод учета влияния возмущений поверхности на формирование характеристических колец позволяет снизить ошибку в вычислении толщины слоя на $\approx 80\%$ при отсутствии поворота и на $\approx 40\%$ при его наличии.

4. С помощью двумерного и трехмерного численного моделирования показано, что для получения требуемой толщины ТСТ оптимальный способ определения количества

напускаемого в капсулу жидкого топлива по ОТ изображению заключается в контроле высоты мениска жидкого топлива по характеристическому бледному кольцу с учетом параметров капсулы и формы поверхности жидкости.

5. Разработанный метод определения параметров ТСТ по изображениям, полученным в двух плоскостях в один момент времени, позволяет определять параметры ТСТ в анализируемых плоскостях, в том числе для неоднородного по толщине ТСТ, выполнять трехмерное восстановление внутренней поверхности ТСТ в приближении двух первых мод относительно КМУ и с применением температурных расчетов узла анализировать результаты эксперимента и выявлять недостатки КМУ.

6. С помощью двумерного численного моделирования показано, что по характеристическим ТК на РФК изображении КМ можно определять положение как внутренней поверхности капсулы, так и внутренней поверхности ТСТ с использованием полученных при решении обратных задач взаимосвязей положений колец и положений поверхностей.

7. С помощью трехмерного численного моделирования показано, что для РФК метода возмущения поверхностей не вносят ошибки при диагностике параметров поверхностей, точность метода определяется разрешением экспериментального изображения, и метод можно применять для неразрушающего контроля экваториальных толщин стенки капсулы и толщины ТСТ с разрешением до 2,5 мкм для капсулы Ø2 мм для реализованной конфигурации рентгеновской системы диагностики.

8. Показано, что точность вычисления $P_{2D}(l)$ внутренней поверхности ТСТ с гармоническими возмущениями зависит от ограниченной конструкцией КМ числа плоскостей наблюдения, ориентации возмущений относительно плоскостей наблюдения и амплитуды возмущений.

9. Показано, что результаты измерений ОТ и РФК методами согласуются между собой в пределах погрешностей.

Результаты исследований, представленных в данной главе, опубликованы в [А1-А6].

Заключение

1. Разработан и реализован стенд измерений параметров капсул методом конфокальной микроскопии, оптическая теневая (ОТ) система наблюдения капсулы с жидким и твердым топливом, система получения рентгеновских фазоконтрастных (РФК) изображений полых капсул и капсул с топливом.

2. Показано, что метод конфокальной микроскопии можно применять для анализа внешней поверхности капсул (ПАМС, ПС, СН, Ве и др.), включая:

- вычисление одномерного СПМ $P_{1D}(n)$ экваториальных профилей поверхностей капсул с разрешением до 3 нм для выявления соответствия капсулы требованиям,
- вычисление двумерного СПМ $P_{2D}(l)$ полной поверхности для моделирования роста неустойчивостей при имплозии мишени,
- получение трехмерной карты дефектов поверхности для анализа результатов эксперимента по формированию твердого слоя топлива в капсуле и для исследования влияния развития неустойчивостей на локальных дефектах капсулы при имплозии мишени,
- а также может быть использован для неразрушающего контроля оптически прозрачных капсул (ПАМС, ПС, СН и др.): определения экваториальных толщин стенки капсулы с точностью 0,5%, средней толщины стенки $\bar{t}$, разнотолщинности Δt и для анализа внутренней поверхности капсулы при отсутствии дефектов в объеме и на внешней поверхности.

3. С помощью прямого 2D моделирования распространения видимого и рентгеновского излучения через полую капсулу и капсулу с топливом определены механизмы формирования ОТ и РФК изображений, выявлены характеристические группы лучей, для которых решены обратные задачи и получены зависимости, используемые для вычисления толщин стенки капсулы и слоя топлива по ОТ и РФК изображениям.

4. Получено, что параметры твердого слоя топлива ($\bar{t}$, Δt , $P_{1D}(n)$ и $P_{2D}(l)$) в оптически прозрачной капсуле определяются по характеристическим кольцам (ЯК и БК) на ОТ изображении с разрешением до 0,6 мкм для капсулы Ø2 мм при нулевой разнотолщинности слоя топлива.

5. С помощью численного 3D моделирования показано, что для ОТ метода возмущения внутренней поверхности ТСТ искажают ход характеристических групп лучей, при этом определяющее влияние оказывают возмущения в модах $l=1$ и $l=2$. Это вносит неопределенность при вычислении параметров ТСТ, поскольку обратная задача имеет решение только для сферически симметричной поверхности. Конструкция бокса-конвертера ограничивает число анализируемых плоскостей до двух взаимно перпендикулярных, что не

позволяет определить поворот поверхности относительно вертикальной оси. В данных условиях предложенный метод учета влияния данных возмущений при диагностике позволяет снизить ошибку в вычислении толщины слоя на $\approx 80\%$ при отсутствии поворота и на $\approx 40\%$ при его наличии.

6. С помощью двумерного и трехмерного численного моделирования показано, что для получения требуемой толщины ТСТ оптимальный способ определения количества напускаемого в капсулу жидкого топлива по ОТ изображении заключается в контроле высоты мениска жидкого топлива по характеристическому бледному кольцу с учетом параметров капсулы и формы поверхности жидкости.

7. Получено, что параметры как полый оптически прозрачной/непрозрачной капсулы, так и капсулы с топливом, в том числе с возмущениями поверхностей, по характеристическим темным кольцам на РФК изображении определяются с разрешением до 2,5 мкм для капсулы Ø2 мм. При этом разрешение может быть повышено использованием камеры с большим размером матрицы.

8. С использованием 3D модели капсулы с твердым топливом, внутренняя поверхность которого имеет гармонические возмущения, показано, что точность вычисления $P_{2D}(l)$ внутренней поверхности ТСТ зависит от ограниченного конструкцией бокса-конвертера числа плоскостей наблюдения и ориентации двумерных мод возмущений относительно плоскостей наблюдения.

9. Показано, что диагностика параметров неоднородного по толщине ТСТ по двум осям наблюдения с трехмерным восстановлением внутренней поверхности ТСТ относительно мишенного узла с применением температурных расчетов позволяет в процессе отработки технологии получения ТСТ с требуемыми характеристиками анализировать результаты эксперимента и выявлять недостатки мишенного узла.

10. Созданная в процессе работы по теме диссертационного исследования экспериментальная база и разработанный комплекс диагностических методов могут использоваться не только для измерения элементов КМ прямого и непрямого сжатия для ЛТС, но и для измерения параметров широкой номенклатуры лазерных мишеней: простых и сложносоставных, однослойных и многослойных, оптически прозрачных и непрозрачных мишеней сферической и цилиндрической формы в экспериментах по лазерному нагружению материалов и отработке диагностических методик на моделирующих лазерных установках.

Благодарности

Автор выражает искреннюю и безграничную благодарность научному руководителю, начальнику научно-исследовательской лаборатории ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, к.ф.-м.н. Ивану Александровичу Чугрову за предоставление темы диссертации, всестороннюю помощь, организацию работы коллектива, товарищескую поддержку; научному руководителю, д.ф.-м.н., профессору Андрею Борисовичу Савельеву-Трофимову за внимательное отношение к выполнению работы и всестороннюю помощь; рецензентам: д.ф.-м.н. Сергею Аркадьевичу Белькову, д.ф.-м.н. Владимиру Григорьевичу Рогачеву, к.ф.-м.н. Сергею Викторовичу Бондаренко за конструктивную критику работы; коллегам: Анне Витальевне Царевой и Сергею Михайловичу Прохорову за предоставление капсул; Елене Юрьевне Соломатиной за помощь в разработке программы автоматической сшивки экваториальных поверхностей капсул; Вячеславу Викторовичу Шишлову за помощь на стенде рентгеновских измерений; Сергею Юрьевичу Батукову и Алексею Валерьевичу Золотовскому за предоставление полусфер боксов-конвертеров; Алесе Андреевне Кострикиной за сборку мишенных узлов криогенной мишени; Марине Анатольевне Рогожиной за совместное проведение экспериментов по формированию твердого слоя топлива в криогенной мишени и курирование работ по получению криогенной мишени. Также автор выражает благодарность всему коллективу научно-исследовательской лаборатории, начальнику научно-исследовательской группы Антону Павловичу Пепеляеву, заместителю начальника научно-исследовательского отдела - начальнику научно-исследовательской лаборатории Сергею Павловичу Баринову и начальнику научно-исследовательского отдела Анатолию Григорьевичу Голубинскому.

Список сокращений и терминов

- EDS – энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия
- GA – General Atomics, США
- LANL — Los Alamos National Laboratory, Национальная лаборатория Лос-Аламоса, США
- LDC – лазерный дифференциальный конфокальный (метод)
- LED – светодиод
- LEN – отверстие для ввода лазерного излучения
- LMJ – Laser MegaJoule, Франция
- LLE — Laboratory for Laser Energetics, Лаборатория лазерной энергетики, США
- LLNL – Lawrence Livermore National Laboratory, Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, США
- NA – числовая апертура
- NIF – National Ignition Facility, Национальная установка по зажиганию, США
- NIM – нуль-интерферометрическая микроскопия
- PSDI – дифракционная интерферометрия фазового сдвига
- PSI – интерферометрия фазового сдвига
- TMP – термомеханический кожух
- VSI – вертикальная сканирующая интерферометрия белого света
- АСМ – атомно-силовой микроскоп (AFM)
- СПМ – спектр пространственных мод
- БК – бледное кольцо
- ИТС – инерциальный термоядерный синтез (ICF)
- КМ – криогенная мишень
- ЛИ – лазерное излучение
- ЛТС – лазерный термоядерный синтез
- КМУ – криогенный мишенный узел
- ОИ – оптический интерферометрический
- ОТ – оптический теневой
- ПАМС – поли-альфа-метилстирол
- ПВО – полное внутреннее отражение
- ПО – программное обеспечение
- ПС – полистирол
- РИ – рентгеновское излучение

РФК – рентгеновский фазоконтрастный

СИП – сфокусированный ионный пучок (FIB)

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия

ТК – темное кольцо

ТСТ – твердый слой топлива

ЦГМ – цифровая голографическая микроскопия (DHМ)

ЯК – яркое кольцо

Криогенная мишень (КМ) – полая сферическая капсула со сферически симметричным твердым слоем топлива на ее внутренней поверхности

Криогенная мишень непрямого сжатия – полая сферическая капсула со сферически симметричным твердым слоем топлива на ее внутренней поверхности, располагающаяся в боксе-конвертере

Криогенный мишенный узел (КМУ), мишенный узел - конструкция, необходимая для получения КМ, которая помимо капсулы с топливом включает в себя: капилляр для наполнения капсулы топливом, поддерживающие капсулу тенты, бокс-конвертер, окна бокса-конвертера для ввода ЛИ, капилляр для наполнения бокса-конвертера гелием, держатель бокса-конвертера с отверстиями для ввода ЛИ в верхнее окно бокса-конвертера, датчики температур, нагреватели и т.д.

Список публикаций автора по материалам диссертации

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях в научных журналах, рекомендованных для защиты в диссертационных советах МГУ по специальности и отрасли наук:

А1. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А. Получение криогенной мишени непрямого облучения с твердым слоем дейтерия // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2024. - № 79. - С. 2410401. EDN: DMVBPI. Импакт-фактор 0.651 (РИНЦ). **Авт. вклад 1.2 из 1.7 п.л.**

Zarubina E.Yu. , Rogozhina M.A., Chugrov I.A. Creation of the Indirect-Drive Cryogenic Target with the Solid Deuterium Layer // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – Vol.79, № 1. – pp. 25–38. EDN: HZULKT. Импакт-фактор 0.4 (JIF). **Авт. вклад 1.2 из 1.7 п.л.**

А2. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Соломатина Е.Ю., Чугров И.А. Разработка методов аттестации оболочки и слоя топлива криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза // Дефектоскопия. - 2025. - № 3. – С. 47-58. EDN: QIONPY. Импакт-фактор 1.21 (РИНЦ). **Авт. вклад 1.2 из 1.4 п.л.**

Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., Solomatina E.Yu., Chugrov I.A. Development of Methods for Shell and Fuel Layer Characterization of Indirect-Drive Cryogenic Target for Laser Thermonuclear Fusion // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2025. - Vol.61, № 3. - pp. 343–352. EDN: SBYPMV. Импакт-фактор 0.9 (JIF). **Авт. вклад 1.0 из 1.2 п.л.**

А3. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А. Трехмерное моделирование распространения видимого излучения через криогенную мишень с гармоническими возмущениями поверхностей оболочки и твердого слоя топлива // Дефектоскопия. - 2025. - № 11. – С. 44-53. EDN: RSFXHX. Импакт-фактор 1.21 (РИНЦ). **Авт. вклад 1.1 из 1.2 п.л.**

Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A., Chugrov I.A. Three-Dimensional Modelling of Visible Radiation Propagation Through Cryogenic Target with Harmonic Perturbations of Shell and Solid Fuel Layer // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2025. - Vol. 61, № 11. - pp. 1341–1348. EDN: BSVDUU. Импакт-фактор 0.9 (JIF). **Авт. вклад 0.9 из 1.0 п.л.**

А4. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А. Теневой метод диагностики криогенного слоя изотопов водорода в мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза // Ядерная физика и инжиниринг. – 2023. – Т. 14, № 4. - С. 335–338. EDN: XFRWET. Импакт-фактор 0.124 (РИНЦ). **Авт. вклад 0.4 из 0.5 п.л.**

Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A. Shadowgraphic Characterization Method of a Cryogenic Hydrogen Isotope Layer in an Indirect-Drive Target for Inertial Confinement Fusion // Physics of Atomic

Nuclei. – 2022. - Vol. 85, № 10. - pp. 1638–1641. EDN: SKIGZF. Импакт-фактор 0.4 (JIF). **Авт. вклад 0.4 из 0.5 п.л.**

А5. Рогожина М.А., Зарубина Е.Ю. Формирование однородного по толщине криогенного слоя дейтерия в сферической оболочке как этап создания криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза // Ядерная физика и инжиниринг. – 2023. – Т. 14, № 5. - С. 441–445. EDN: JXYMPN. Импакт-фактор 0.124 (РИНЦ). **Авт. вклад 0.3 из 0.5 п.л.**

Rogozhina M.A., Zarubina E.Yu. Formation of a Cryogenic Deuterium Uniform-Thickness Layer in a Spherical Shell as a Step in Making a Cryogenic Target for Laser Fusion // Physics of Atomic Nuclei. – 2022. -Vol. 85, № 10. - pp. 1642–1645. EDN: HHQNNE. Импакт-фактор 0.4 (JIF). **Авт. вклад 0.3 из 0.5 п.л.**

А также в других научных журналах:

А6. Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А., Чугров И.А. Диагностика параметров слоя изотопов водорода в криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза // Физмат. – 2024. – Т.2, № 2. - С.134-154. EDN: KZEFJA. Импакт-фактор 0.462 (РИНЦ). **Авт. вклад 2.2 из 2.3 п.л.**

Список литературы

1. В. Ильгисонис. Термоядерные исследования как существенная составляющая технологической платформы энергетической безопасности // Энергетическая политика, 2023, №2(180), С. 12-31. DOI 10.46920/2409-5516_2023_2180_12.
2. В. И. Ильгисонис, К. И. Ильин, С. Г. Новиков, Ю. А. Оленин. О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий // Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, С. 963–969. DOI: 10.31857/S0367292121110172.
3. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора // ЖЭТФ, 1964. Т.46. С.171-175.
4. С.Ю. Гуськов. Лазерный термоядерный синтез и физика высоких плотностей энергии // Квантовая электроника, 2022, Т. 52, № 12. С. 1070-1078.
5. Mary L. Spaeth, Kenneth R. Manes, M. Bowers, et al. National Ignition Facility Laser System Performance // Fusion Science and Technology, 2016, V.69, No. 1, P. 366-394. <http://dx.doi.org/10.13182/FST15-136>.
6. H. Abu-Shawareb et al. (The Indirect Drive ICF Collaboration). Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment // PHYSICAL REVIEW LETTERS, 2024, V. 132, P. 065102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.065102>.
7. J-L Miquel, C Lion, P Vivini. The Laser Mega-Joule : LMJ & PETAL status and Program Overview // Journal of Physics: Conference Series, 2016, V. 688, P. 012067. DOI:10.1088/1742-6596/688/1/012067.
8. Гаранин С.Г., Гарнов С.В., Сергеев А.М., Хазанов Е.А. Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии // Вестник Российской академии наук, 2021, Т. 91, №. 5. С. 435-445. DOI: 10.31857/S0869587321050108.
9. T. C. Sangster, R. Betti, R. S. Craxton, et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // Physics of Plasmas, 2007, V. 14, P.058101. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2671844>.
10. D.S. Clark, S.W. Haan, B.A. Hammel, J.D. Salmonson, D.A. Callahan, R.P. Town. Plastic ablator ignition capsule design for the National Ignition Facility // Phys. Plasmas, 2010. V. 17, P. 052703. <https://doi.org/10.1063/1.3403293>.
11. H. Huang, R. B. Stephens, A. Nikroo, S. A. Eddinger, et al. Quantitative radiography: Film Model Calibration and Dopant/Impurity Measurement in ICF Ablators // Fusion Science and Technology, 2007, V. 51, No. 4, P. 530-538. <https://doi.org/10.13182/FST51-530>.

12. J. Biener, D.D. Ho, C. Wild, E. Woerner, et al. Diamond spheres for inertial confinement fusion // Nucl. Fusion, 2009, V. 49, P. 112001. <http://iopscience.iop.org/0029-5515/49/11/112001>.
13. <https://lasers.llnl.gov/science/achieving-fusion-ignition>.
14. S. W. Haan, J. D. Lindl, D. A. Callahan, D. S. Clark. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // Physics of Plasmas, 2011, V. 18, P. 051001. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3592169>.
15. M. D. Wittman, D. Bredesen. Modeling for Direct Drive Fusion Implosions: Cryogenic Target Filling at Arbitrary Viewing Angles and Yield Prediction // Simon Narang, Sutherland High School, Pittsford, New York, November 2019, P. 1-23.
16. T. C. Sangster, R. Betti, R. S. Craxton, et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // Physics of Plasmas, 2007, V. 14, P.058101. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2671844>.
17. S. O. Kucheyev, and A. V. Hamza. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // Journal of Applied Physics, 2010, V. 108, P. 091101. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3489943>.
18. T. Parham, B. Kozioziemski, D. Atkinson, et al. Cryogenic Target System for Hydrogen Layering // LLNL-JRNL, 2016, P. 696377.
19. B. J. Kozioziemski, E. R. Mapoles, J. D. Sater, et al. Deuterium-Tritium Fuel Layer Formation for the National Ignition Facility // Fusion Science and Technology, 2011, V. 59, No. 1, P. 14-25. <http://dx.doi.org/10.13182/FST10-3697>.
20. B. J. Kozioziemski, R. A. London, R. L. McEachern, and D. N. Bittner. Demonstration of symmetry control of infrared heated deuterium layers in holraums // UCRL-JC, 2003, P. 154640.
21. D. R. Harding, M. D. Wittman & D. H. Edgell. Considerations and Requirements for Providing Cryogenic Targets for Direct-Drive Inertial Fusion Implosions at the National Ignition Facility // Fusion Science and Technology, 2013, V. 63, No. 2, 95-105. <https://doi.org/10.13182/FST13-A16326>.
22. Modeling the temperature and ice-thickness profiles within OMEGA cryogenic targets // LLE Review, V. 81. P. 12 - 20.
23. Cryogenic Targets: Current Status and Future Development // LLE Review, V. 114. P. 57-72.
24. Formation of Deuterium-Ice Layers in Omega Targets // LLE Review, V. 99. P.160-182.
25. A. A. Chernov, B. J. Kozioziemski, J. A. Koch, L. J. Atherton, et al. Single Crystal Growth and Formation of Defects in Deuterium-Tritium Ice Layers for Inertial Confinement Fusion // UCRL-JRNL, 2008, P. 407256.
26. Characterization Station // Cryogenic Target Handling System Operation Manual, 2004, V. 4, P. 1-19.

27. Jeffrey A. Koch, Thomas P. Bernat, Gilbert W. Collins, et al. Numerical Raytrace Verification of Optical Diagnostics of Ice Surface Roughness for Inertial Confinement Fusion Experiments // Fusion Science and Technology, 2003, V. 43, No. 1, P. 55-66. <https://doi.org/10.13182/FST03-A249>.
28. Numerical Investigation of Characterization of Thick Cryogenic-Fuel Layers Using Convergent Beam Interferometry // LLE Review, V. 79, P. 131-138.
29. D. R. Harding, M. D. Wittman, N. P. Redden, et al. Comparison of Shadowgraphy and X-Ray Phase Contrast Methods for Characterizing a DT Ice Layer in an Inertial Confinement Fusion Target // Fusion Science and Technology, 2020, P. 1-18, <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1812990>.
30. A. V. Hamza, A. Nikroo, E. Alger, et al. Target development for the National Ignition Campaign // Fusion science and technology, 2016, V. 69, No. 1, P. 395–406. <http://dx.doi.org/10.13182/FST15-163>.
31. D. T. Casey, V. A. Smalyuk, R. E. Tipton, et al. Development of the CD Symcap platform to study gas-shell mix in implosions at the National Ignition Facility // Phys. Plasmas, 2014, V. 21, P. 056318. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4894215>.
32. R. S. Craxton, K. S. Anderson, T. R. Boehly, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: A review // Phys. Plasmas, 2015, V. 22, P. 110501. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4934714>.
33. D. S. Montgomery, W. S. Daughton, B. J. Albright, et al. Design considerations for indirectly driven double shell capsules // Phys. Plasmas, 2018, V. 25, P. 092706. <https://doi.org/10.1063/1.5042478>.
34. E. C. Merritt, J. P. Sauppe, E. N. Loomis, et al. Experimental study of energy transfer in double shell implosions // Phys. Plasmas, 2019, V. 26, P. 052702. <https://doi.org/10.1063/1.5086674>.
35. Е.Ю. Зарубина, М.А. Рогожина, Е.Ю. Соломатина, И.А. Чугров. Разработка методов аттестации оболочки и слоя топлива криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза // Дефектоскопия, 2025, №3. DOI: 10.31857/S0130308225030042.
36. М.А. Рогожина, Е.Ю. Зарубина, И.А. Чугров. Криогенная мишень непрямого облучения для ЛТС // Труды 8-й Международной конференции и 17-й Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами, IHISM'24», г. Саров, 1-5 июля. - 2024. С. 279-292.
37. Аверин М.С. Термоядерное зажигание мишеней непрямого облучения в условиях сферического ввода лазерного излучения со второй гармоникой // Труды XXVII Международной конференции «Забабахинские научные чтения ЗНЧ-2025», г. Снежинск, 19-23 мая. - 2025.

38. С.А. Бельков, С.В. Бондаренко, Г.А. Вергунова, С.Г. Гаранин, С.Ю. Гуськов, Н.Н. Демченко, И.Я. Доскоч, П.А. Кучугов, Н.В. Змитренко, В.Б. Розанов, Р.В. Степанов, Р.А. Яхин. Термоядерные мишени прямого облучения лазерным импульсом мегаджоульного уровня // ЖЭТФ, 2015, Т. 148, № 4 (10), стр. 784-798. DOI: 10.7868/S0044451015100168.
39. S. I. Glazyrin, P. P. Zakharov, K. E. Gorodnichev, and S. E. Kuratov. On the effect of initial internal roughness in ICF targets on their compression // Phys. Plasmas, 2024, V. 31, P. 062708. <https://doi.org/10.1063/5.0203387>.
40. С. А. Бельков, С. В. Бондаренко, С. Г. Гаранин, С. Ю. Гуськов и др. Особенности зажигания мишени лазерного термоядерного синтеза сходящейся ударной волной // ЖЭТФ, 2020, Т. 158, №4(10), С. 728–737. DOI: 10.31857/S0044451020100156.
41. A. I. Nikitenko & S. M. Tolokonnikov. Optimal ‘Tomography’ of 2-Layered Targets: 3D Parameters Reconstruction from Shadow Images // Fusion Science and Technology, 2007, V. 51, No. 4, P. 705-716. <https://doi.org/10.13182/FST07-A1468>.
42. S. A. Eddinger, H. Huang, and M. E. Schoff. Three-Dimensional Wallmapping Using Xradia with Distortion Correction // Fusion Science and Technology, 2009, V. 55, No. 4, P. 411–416. <https://doi.org/10.13182/FST55-411>.
43. H. Huang, B. J. Kozioziemski, R. B. Stephens, A. Nikroo, et al. Quantitative Radiography: Submicron Dimension Calibration for ICF Ablator Shell Characterization // Fusion Science and Technology, 2007, V. 51, No. 4, P. 519-524. <https://doi.org/10.13182/FST07-3>.
44. H. Huang, R. B. Stephens, S. A. Eddinger, J. Gunther, et al. Nondestructive Quantitative Dopant Profiling Technique by Contact Radiography // Fusion Science and Technology, 2026, V. 49, No. 4, P. 650-656. <https://doi.org/10.13182/FST49-650>.
45. H. Huang, A. Nikroo, R. B. Stephens, S. A. Eddinger, D. R. Wall, K. A. Moreno, and H. W. Xu. Element-Specific Profiling for ICF Ablator Capsules with Mixed Dopant and Impurities // Fusion Science and Technology, 2009, V. 55, No. 4, P. 356-366. <https://doi.org/10.13182/FST55-356>.
46. Jie Meng, Xuesen Zhao, Xing Tang, Yihao Xia, Xiaojun Ma, and Dangzhong Gao. Surface characterization of ICF capsule by ACM-based profilometer // High Power Laser Science and Engineering, 2017, V. 5, P. 21. DOI:10.1017/hpl.2017.20.
47. R. B. Stephens, D. Olson, H. Huang, and J. B. Gibson. Complete Surface Mapping of ICF Shells // Fusion Science and Technology, 2004, V. 45, No. 2, P. 210-213, <https://doi.org/10.13182/FST45-210>.
48. Xianxian Ma, He Ni, Mengshuang Lu, Zihao Liu, et al. A measurement method for three-dimensional inner and outer surface profiles and spatial shell uniformity of laser fusion capsule //

Optics and Laser Technology, 2021, V. 134, P. 106601.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106601>.

49. Longxiao Wang, Yun Wang, Xianxian Ma, and Weiqian Zhao. Measurement of laser differential confocal geometrical parameters for ICF capsule // Matter Radiat. Extremes, 2019, V. 4, P. 025401. <https://doi.org/10.1063/1.5085863>.

50. Weiqian Zhao, Junjie Guo, Lirong Qiu, and Yun Wang. Low transmittance ICF capsule geometric parameters measurement using laser differential confocal technique // Optics Communications, 2013, V. 292, P. 62–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2012.11.070>.

51. Longxiao Wang, Weiqian Zhao, Lirong Qiu, Yun Wang. Laser differential confocal measurement of the outer surface profile of a laser inertial confinement fusion capsule // Measurement, 2019, V. 135. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.037>.

52. Weiqian Zhao, Ruoduan Sun, Lirong Qiu, and Dingguo Sha. Laser differential confocal radius measurement // OPTICS EXPRESS, 2010, V. 18, No. 3, P. 2345. DOI: 10.1364/OE.18.002345.

53. N. A. Antipa, S. H. Baxamusa, E. S. Buice, A. D. Conder, et. al. Automated ICF Capsule Characterization Using Confocal Surface Profilometry // Fusion Sci. Technol., 2013, V. 63, No. 2, P. 151–159. <http://dx.doi.org/10.13182/FST13-TFM20-38>.

54. H. Huang, L. C. Carlson, W. Requieron, N. Rice, et. al. Quantitative Defect Analysis of Ablator Capsule Surfaces Using a Leica Confocal Microscope and a High-Density Atomic Force Microscope // Fusion Sci. Technol., 2016, V. 70, No. 2, P.376–386. <https://doi.org/10.13182/FST15-220>.

55. A. Chobriat, O. Raphaël, C. Hermerel, E. Busvelle, et. al. Developments in Shell Surface Characterizations Using Holography // Fusion Sci. Technol., 2018, V. 73, No. 2, P. 132–138. <https://doi.org/10.1080/15361055.2017.1374813>.

56. Y. T. Lee, A. Q. L. Nguyen, H. Huang, K. A. Moreno, et. al. Increasing the Throughput of Phase-Shifting Diffraction Interferometer for Quantitative Characterization of ICF Ablator Capsule Surfaces // Fusion Sci. Technol., 2009, V. 55, No. 4, P. 405–410. <https://doi.org/10.13182/FST09-28>.

57. C. Wei, J. Ma, L. Chen, J. Li, et. al. Null interferometric microscope for ICF-capsule surface-defect detection // Opt. Lett., 2018, V. 43, No. 21, P. 5174–5177. DOI: 10.1364/OL.43.005174.

58. C. Wei, J. Li, J. Ma, M. Duan, et. al. High-efficiency full-surface defects detection for an ICF capsule based on a null interferometric microscope // Appl. Opt., 2021, V. 60, No. 4, P. 62–72. DOI: 10.1364/AO.404174.

59. RENHUI GUO, ZHIYAO YIN, HANG FU, And CONG WEI. Surface defect measurement of ICF capsules under a limited depth of field // Optics Express, 2021, V. 29, No. 19, P. 30783. <https://doi.org/10.1364/OE.433811>.
60. A. Q. L. Nguyen, S. A. Eddinger, H. Huang, M. A. Johnson, et al. Characterization of Isolated Defects for NIF Targets Using PSDI with an Analysis of Shell Flipping Capability // Fusion Science and Technology, 2009, V. 55, No. 4, P. 399-404. <https://doi.org/10.13182/FST09-18>.
61. R. Su, M. Thomas, R. Leach, and J. Coupland. Effects of defocus on the transfer function of coherence scanning interferometry // Opt. Lett., 2018, V. 43, No. 1, P. 82–85. <https://doi.org/10.1364/OL.43.000082>.
62. Shuai Yang, Zihao Liu, Xianxian Ma, Qi Wang, et al. Interferometric microscope with a confocal focusing for inner surface defect detection of ICF capsule // Optics Express, 2021, V. 29, No. 23, P. 38924. <https://doi.org/10.1364/OE.444117>.
63. E. T. Alger, J. Kroll, E. G. Dzenitis, R. Montesanti, et al. NIF Target Assembly Metrology Methodology and Results // Fusion Sci. Technol., 2009, V. 55, P. 77-86. <https://doi.org/10.13182/FST10-3708>.
64. E. T. Alger et al. Experimental D-T Ice-Layering Target Assembly // Fusion Sci. Technol., 2009, V. 55, P. 269-275. DOI: 10.13182/FST08-3506.
65. H. Huang, And S. A. Eddinger. Quantitative Dimension Measurement of ICF Components Using Xradia MicroXCT Microscope // Fusion Sci. Technol., 2009, V. 55, P. 372-379. <https://doi.org/10.13182/FST55-373>.
66. J. A. Koch, J. D. Sater, T. P. Bernat, et al. Validating DT Ice-Surface Roughness Diagnostics for NIF Inertial Confinement Fusion // UCRL-LR-105821-00-1, V. 1, No. 1, P. 13-24.
67. J. A. Koch, T. P. Bernat, G. W. Collins, B. A. Hammel, B. J. Kozioziemski. Quantitative Analysis of Backlit Shadowgraphy as a Diagnostic of Hydrogen Ice Surface Quality in ICF Capsules // Fusion Technology, 2000, V. 38, No. 1, P. 123-131, <http://dx.doi.org/10.13182/FST00-A36128>.
68. Sharon Jin. A Ray-Tracing Model for Cryogenic Target Uniformity Characterization // Summer High School Research Program, 2002, P. 1-15.
69. D. H. Edgell, R. S. Craxton, L. M. Elasky, et al. Three-Dimensional Characterization of Cryogenic Target Ice Layers Using Multiple Shadowgraph Views // Fusion Sci. Technol., 2006, V. 49, No. 4, P. 615-625. <https://doi.org/10.13182/FST49-616>.
70. D. H. Edgell, R. S. Craxton, L. M. Elasky, et al. Three-Dimensional Characterization of Spherical Cryogenic Targets Using Ray-Trace Analysis of Multiple Shadowgraph Views // Fusion Sci. Technol., 2007, V. 51, No. 4, P. 716-726. <https://doi.org/10.13182/FST07-A1469>.

71. F. Lamy, Y. Voisin, A. Diou, et al. A Model to Characterize the D-T Layer of ICF Targets by Backlit Optical Shadowgraphy // *Fusion Science and Technology*, 2005, V. 48, No. 3, P. 1307-1319. <https://doi.org/10.13182/FST05-A1080>.
72. E. R. Koresheva, I. E. Osipov, I. V. Aleksandrova, et al. Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets using the tomography method with probing irradiation in the visible spectrum // *Journal of Russian Laser Research*, 2007, V. 28, No. 2, P. 162-206. DOI: 10.1007/s10946-007-0010-y.
73. B. J. Kozioziemski, J. A. Koch, A. Barty, et al. Quantitative characterization of inertial confinement fusion capsules using phase contrast enhanced x-ray imaging // UCRL-JRNL-205025, P. 1-10.
74. Bernard Kozioziemski. Determining correct location of interfaces in x-ray images // UCRL-TR-207165, 2004, P. 1-7.
75. D.S. Montgomery, A. Nobile, P.J. Walsh. Characterization of NIF Cryogenic Beryllium Capsules Using X-ray Phase Contrast Imaging // *Conference Proceedings - High temperature Plasma Diagnostics*, April 19-22, 2004, San Diego, CA.
76. B. J. Kozioziemski, J. D. Sater, J. D. Moody. X-ray imaging of cryogenic deuterium-tritium layers in a beryllium shell // *Journal of Applied Physics*, 2005, UCRL-JRNL-212893, DOI: 10.1063/1.2133903.
77. B. J. Kozioziemski, J. D. Sater, J. D. Moody. Solid deuterium-tritium surface roughness in a beryllium inertial confinement fusion shell // *Journal of Applied Physics*, 2006, UCRL-JRNL-220790. DOI: 10.1088/0029-5515/47/1/001.
78. N. Izumi, E. Dewald, B. Kozioziemski, et al. Development of A Laser-Produced Plasma X-Ray Source for Phase-Contrast Radiography Of D-T Ice Layers // *Fusion Science and Technology*, 2009, V. 55, P. 253-259. DOI: 10.13182/FST08-3500.
79. Trevor Lu. X-Ray Phase-Contrast Characterization of Cryogenic Targets // Webster Thomas High School, Webster, NY, P. 1-12.
80. Kai Wang, Haile Lei, Jun Li, Wei Lin, et al. Characterization of inertial confinement fusion targets using X-ray phase contrast imaging // *Optics Communications*, 2014, V. 332, P. 9–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2014.06.066>.
81. Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, et al. Refractive index distribution of the ice-layer in ICF target from the interference method // *Optics and Laser Technology*, 2021, V. 138, P. 106860. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106860>.
82. Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, et al. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology*, 2021, V. 134, P. 106595. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106595>.

83. J. A. Koch, B. J. Kozioziemski, J. Salmonson, et al. Optical and X-ray Characterization of Groove Profiles in DT Ice Layers // Target Fabrication Conference, 2008.
84. D. R. Harding, J. Ulreich, M. D. Wittman, et al. Requirements and Capabilities for Fielding Cryogenic DT-Containing Fill-Tube Targets for Direct-Drive Experiments on OMEGA // Fusion Science and Technology, 2017. <https://doi.org/10.1080/15361055.2017.1374812>.
85. A. Choux, L. Jeannot, F. Gillot, et.al. Roughness spatial reconstruction algorithm of DT layer in cryogenic targets using optical technics, P. 1-37.
86. A. Choux, E. Busvelle, J. P. Gauthier, G. Pascal. Observer for thick layer of solid Deuterium-Tritium using backlit optical shadowgraphy and interferometry // Applied Optics, V. 46, No. 33, P. 8193-8201.
87. F. Gillot, A. Choux, L. Jeannot, G. Pascal, and P. Baclet. Characterization of the DT Layer of ICF Targets by Optical Techniques // Fusion Science and Technology, 2006, V. 49, No. 4. <https://doi.org/10.13182/FST06-A1176>.
88. Tianliang Yan, Dong Liu, Xue Shen, et al. ICF target DT-layer refractive index and thickness from iterative analysis // Optics Express, 2018, V. 26, No. 14, P. 17781. <https://doi.org/10.1364/OE.26.017781>.
89. Keisuke Iwano, Jiaqi Zhang, Akifumi Iwamoto, Yuki Iwasa, et al. Refractive index measurements of solid deuterium–tritium // Scientific Reports, 2022, V. 12, P. 2223. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06298-1>.
90. Prod'homme, L. A new approach to the thermal change in the refractive index of glasses // Phys. Chem. Glasses, V. 1, P. 119–122.
91. Задорожный А.Г. Введение в трехмерную компьютерную графику с использованием библиотеки OpenGL: учебное пособие / А.Г. Задорожный, М.Г. Персова, Ю.И. Кошкина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 100 с.
92. Ксендзенко Л.С., Бойко Л.А., Шишкин А.В. Элементы теории корреляции: учебное пособие для вузов / Политехнический институт ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2025. – 71 с.
93. ГОСТ Р 8.7002010: Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа.
94. Jin Li, Jack Lindley-Start, Adrian Porch, David Barrow. Continuous and scalable polymer capsule processing for inertial fusion energy target shell fabrication using droplet microfluidics // Scientific Reports, 2017, V. 7. DOI: 10.1038/s41598-017-06746-3.
95. S. Pollaine and S. Hatchett. Characterizing spherical harmonic coefficients on an ICF capsule // Nucl. Fusion, 2004, V. 44, P. 117–123. <http://iopscience.iop.org/0029-5515/44/1/014>.

96. D. S. Clark, A. Allen, S. H. Baxamusa, et al. Modeling ablator defects as a source of mix in high-performance implosions at the National Ignition Facility // *Phys. Plasmas*, 2024, V. 31, P. 062706. <https://doi.org/10.1063/5.0200730>.
97. Y.X. Liu¹, Z.Y. Li, Z. Yan, et al. Three dimensional effects of nonlinear jets induced by capsule interior isolated defects // *Nucl. Fusion*, 2026, V. 66, P. 016019. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ae1989>.
98. Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов. Рентгеновская оптика: современное состояние и области применения: учеб. пособие /– Пенза: ПГУАС, 2014. – 88 с.
99. Рогожина М.А., Зарубина Е.Ю., Чугров И.А. Криогенная мишень для экспериментов на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии // 53 Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 16 – 20 марта 2026 г.
100. Гнутов А. С., Бельков С. А. Мощные лазеры для исследований в области физики высокой плотности энергии // Труды XVI Международной конференции «Забабахинские научные чтения – 2023», г. Снежинск, 22-26 мая, 2023.
101. Рогожина М.А., Чугров И.А., Зарубина Е.Ю., Батуков С.Ю. // Пат. 2778245 Рос. Федерации: МПК G21B 1/11 (2006.01).
102. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / изд. 2-е. Перевод с английского, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.
103. Ландсберг Г.С. Оптика. М. 2003.
104. Методы математической физики. Ч. II. Специальные функции. Полиномы Лежандра: учеб.-метод. пособие / А.А. Алабужев, Т.С. Белозерова, В.К. Хеннер; Перм. ун-т. – Пермь, 2009. – 76 с.
105. Аналитическая геометрия. Курс лекций с задачами / Ю.В. Садовничий, В.В. Федорчук. – М.: Издательство «Экзамен», 2009. – 350 [2] с. (Серия «Учебник для вузов»).
106. Веселова Е.А., Дерюгин Ю.Н., Изгородин В.М. Соломатина Е.Ю. Методика расчета формирования криогенного слоя D-T смеси в сферическом контейнере // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XVII международного семинара. Саров, 2019.