

Получение криогенной мишени непрямого облучения с твердым слоем дейтерия

Е. Ю. Зарубина,^{1,2,*} М. А. Рогожина,^{1,†} И. А. Чугров^{1,‡}

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Россия, 607188, г. Саров, пр-т Мира, д. 37

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, филиал в г. Сарове, физический факультет
Россия, 607328, г. Саров, ул. Парковая, д. 8

(Поступила в редакцию 21.11.2023; после доработки 18.12.2023; подписана в печать 21.12.2023)

Криогенная мишень непрямого облучения необходима для проведения исследований в области лазерного термоядерного синтеза на установке мегаджоульного уровня энергии. К твердому слою топлива в мишени предъявляются высокие требования: шероховатость внутренней поверхности криослоя должна быть в пределах 1 мкм, отклонения от сферичности и концентричности — менее 1%. В настоящей работе описаны результаты исследований, направленных на выполнение данных требований, а именно формирование криослоя и диагностика его параметров. Благодаря методу медленной кристаллизации криослоя с одновременным нагревом ИК-излучением удается получать повторяемые результаты: отклонения от концентричности и сферичности внутренней поверхности криослоя в пределах 2%, шероховатость — в пределах 20 мкм. Выполнено сравнение теоретических тепловых расчетов конструкции мишени с экспериментом. Разработан комплекс программ на основе оптического теневого метода, позволяющий дозировать жидкое топливо при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов, выполнять диагностику параметров твердого криогенного слоя, оценивать корректность результатов диагностики.

PACS: 28.52.Cx. УДК: 621.039.63.

Ключевые слова: криогенная мишень, дейтерий, ИК-выравнивание, монокристалл, оптическая диагностика.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.79.2410401

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) необходимо создать криогенную мишень, представляющую собой сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности гладким и однородным по толщине слоем твердого водородного топлива. Оболочка, в свою очередь, помещена в центр бокса-конвертора, который обеспечивает равномерное тепловое окружение оболочки с топливом на этапе формирования криослоя и конвертацию лазерного излучения в рентгеновское излучение на этапе проведения экспериментов по зажиганию (см. рис. 1, а). Аттестация криослоя и заведение лазерного излучения выполняется через отверстия в боксе-конверторе, которые герметично закрыты пленками. Макет криогенной мишени непрямого облучения показан на рис. 1, б, в [1]. К конструкции мишени предъявляются высокие требования к геометрии и размеру элементов, точности их изготовления и сборки, герметичности, качеству криогенного слоя и т.д. Эти

требования направлены на достижение максимальной температуры и плотности топлива в области зажигания. В 2021 г. на лазерной установке NIF получен рекордный нейтронный выход в эксперименте — 4.4×10^{17} , что подтвердило принципиальную возможность обеспечения зажигания мишени на лазерных установках мегаджоульного класса.

К криогенному слою топлива также предъявляются высокие требования: шероховатость внутренней поверхности криослоя (льда) должна быть в пределах 1 мкм, отклонения от однородности, сферичности, концентричности должны быть менее 1% [2, 3].

Создание криогенной мишени непрямого облучения — сложная и многоуровневая задача, включающая следующие этапы: разработка концепции криомишени; разработка и производство составных элементов криомишени, их аттестация; прецизионная сборка криомишени (расположение элементов с субмикронной точностью относительно друг друга) и ее аттестация; создание криослоя требуемого качества; аттестация криослоя; постановка криомишени в лазерный эксперимент по зажиганию без потери качества слоя. Данные подзадачи решаются параллельно друг другу и, по мере получения значимых результатов в одной из них, могут вноситься корректировки в методы решения остальных. В статье рассмотрены этапы, на которых сконцен-

* E-mail: zarubinaelena2@yandex.ru

† E-mail: rogozhina.marina.a@gmail.com

‡ E-mail: cahbi4var@mail.ru

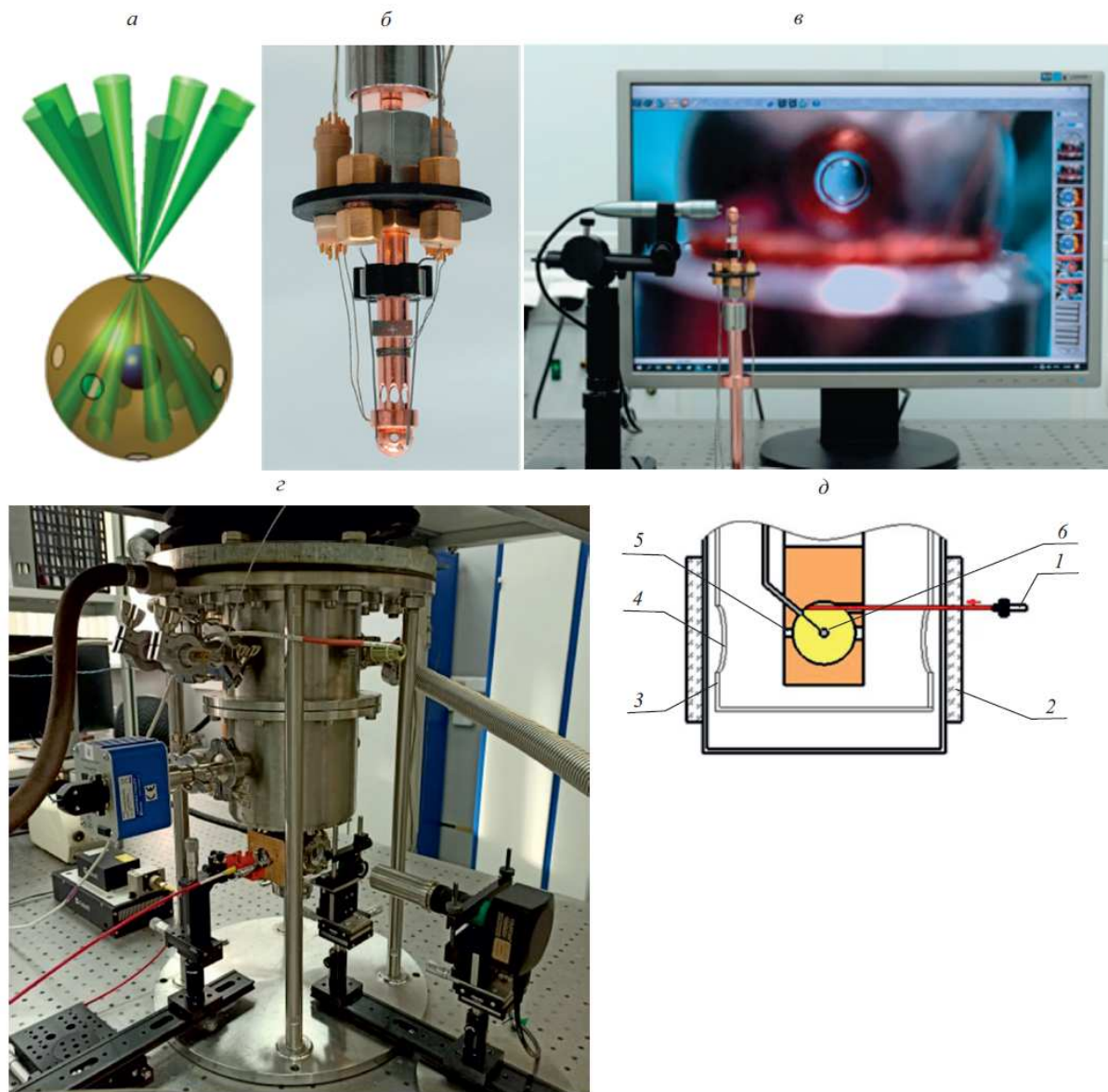


Рис. 1. Криогенная мишень непрямого облучения: *a* — схема ввода лазерного излучения в бокс-конвертор; *b* — макет криогенной мишени непрямого облучения; *в* — вид оптически прозрачной оболочки внутри бокса-конвертора; *г* — фото стенда для исследования мишеней при низких температурах; *д* — схема расположения мишенного узла в криостате: 1 — источник ИК-излучения, 2 — смотровые окна криостата, 3 — криогенный экран, 4 — окна криогенного экрана, 5 — окна бокса, 6 — сферическая оболочка с водородным топливом

трированы усилия в настоящий момент, а именно формирование криогенного слоя внутри оболочки и его диагностика.

В общем случае для симметризации слоя в криомишени используется метод радиальных температурных градиентов [2]. В простом случае одномерной передачи тепла в радиальном направлении водородный слой имеет объемный источник тепла и теплоотвод на стенке сферической оболочки. Соответственно в слое будет развиваться радиальный температурный градиент с максимальной температурой на поверхности лед — пар и уменьшающейся температурой по направлению к стенке оболочки.

При работе с содержащими радиоактивный элемент изотопами водорода (DT) применяется метод

бета-выравнивания [4]. В качестве механизма выравнивания по толщине твердого DT-слоя используется тепло, выделяющееся в процессе бета-распада трития. Реализация метода предполагает выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях при температуре ниже температуры замерзания топлива. В этом случае из-за большего выделения тепла в объеме толстой области DT-слоя её поверхность будет более нагрета, чем поверхность тонкой области. Вещество слоя будет испаряться с более нагретой области и конденсироваться в менее нагретой области на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его

поверхности снижается. Метод применим только для содержащих тритий мишеней.

При работе с нерадиоактивными изотопами водорода (D2, H2) и их смесью (HD) энергия для объемного прогрева может быть подведена за счет внешнего ИК-облучения криогенного слоя [5]. При пропуске инфракрасного излучения через вещество происходит возбуждение колебательных движений молекул. Поглощение происходит лишь при тех длинах волн, энергия которых соответствует энергиям возбуждения колебаний в молекулах данного вещества. Применение метода ИК-выравнивания выглядит следующим образом. Оболочка с криогенным слоем помещается в изотермическую камеру (в центр внутренней сферической полости бокса), ИК-излучение заводится в эту полость, в результате чего криогенный слой поглощает излучение и нагревается. При этом длина волны должна быть выбрана для конкретного изотопа или смеси (2.57 мкм — пик поглощения HD-смеси, 3.16 мкм — D2). При этом так же, как и в методе бета-выравнивания, толстая область становится более нагретой, а тонкая — менее нагретой, в результате чего происходит перераспределение вещества и выравнивание слоя по толщине. Аналогично бета-выравниванию процесс ИК-выравнивания имеет экспоненциальный характер.

При использовании бета- и ИК-выравнивания предъявляются высокие требования к изотермичности экспериментального бокса, в котором располагается оболочка с топливом. Дополнительным требованием для метода ИК-выравнивания является использование оболочек, прозрачных для инфракрасного излучения. То есть данный метод не может использоваться для получения криогенных мишеней непосредственно для экспериментов по ЛТС, но может быть полезен для получения базовых знаний о физическом механизме образования криослоя изотопов водорода, о необходимой конструкции криомишени, алгоритмах проведения экспериментов по формированию криослоя и т.д., тем самым снижая риски, возникающие при работе с радиоактивными веществами.

В настоящее время для формирования криослоя используется метод ИК-выравнивания с использованием запатентованной конструкции экспериментального бокса криомишени и возможностью реализации различных вариантов заведения ИК-излучения в полость бокса [6].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по формированию слоя дейтерия в сферической полистирольной оболочке проводятся на стенде для исследования мишеней при низких температурах [7]. Стенд состоит из исследовательского криостата со сменяемым узлом мишени, системы одновременной откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и дейтерия, оптической

системы визуального контроля, системы контроля температуры, ИК-лазера. Фотография стенда представлена на рис. 1, а.

На этапе отработки технологии формирования криогенного слоя дейтерия используется сборка мишени, отличающаяся от сборки криогенной мишени непрямого облучения, представленной на рис. 1, б. Бокс для проведения экспериментов по инфракрасному нагреву криогенного слоя дейтерия в сферической оболочке [6] представляет собой металлическую конструкцию со сферической, покрытой слоем золота, полостью внутри, в центре которой расположена сферическая оптически прозрачная оболочка диаметром около 2 мм, наполняемая дейтерием через капилляр. В бокс заводится капилляр для напуска теплообменного газа гелия в сферическую полость. В корпусе бокса выполнены четыре окна для наблюдения за процессом образования слоя в оболочке и дополнительные отверстия для заведения ИК-излучения в полость бокса. Схема размещения узла мишени внутри криостата представлена на рис. 1, в [8].

ИК-излучение в сферическую полость бокса заводится по схеме «внешнего» облучения [7] (см. рис. 1, в). Оптоволоконный кабель закреплен на пятикоординатном столике для ориентации пучка излучения в пространстве и заведения его в специальное отверстие бокса через окна криостата и криогенного экрана. Ключевой задачей является реализация нагрева рассеянным на сферической поверхности бокса ИК-излучением только криогенного топлива, избегая прямого попадания на оболочку. Кроме того, необходимо подобрать материалы окон так, чтобы потери при прохождении ИК-излучения через них были минимальны.

В качестве источника ИК-излучения был выбран твердотельный лазер с диодной накачкой среднего инфракрасного диапазона с центральной длиной волны 3.16 мкм и выходом под одномодовое оптоволокно. Средняя выходная мощность излучения составляет 80 мВт. В качестве проводника излучения был выбран одномодовый оптоволоконный кабель с рабочим диапазоном в области длин волн 2.3–4.1 мкм.

Для наблюдения за процессом эволюции слоя применяется оптический теневой метод, который позволяет наблюдать образование зародыша кристалла, его рост, перенос жидкого дейтерия за счет образования новых границ раздела твердое тело–жидкость во время кристаллизации, а также образования и рост границ зерен.

Эксперименты по получению криогенного слоя дейтерия производятся в несколько этапов [9]: установка узла мишени в криостат; откачка рабочего объема криостата и систем напуска газов (гелий, дейтерий) до 10^{-4} мбар; охлаждение экспериментальной сборки до 19 К; напуск теплообменного газа гелия в полость бокса (до 10^{-2} мбар); напуск дейтерия в сферическую оболочку, дозирование количества жидкости в оболочке до расчетного уровня; понижение температуры для кристаллизации дей-

терия; формирование сферического слоя дейтерия.

В общем случае для симметризации слоя в криомишени используется метод радиальных температурных градиентов [2]: бета-выравнивание при работе с радиоактивными изотопами водорода (DT) [8], ИК-выравнивание при работе с нерадиоактивными изотопами водорода (D2, H2) и их смесью (HD) [9]. При использовании бета- и ИК-выравнивания предъявляются высокие требования к изотермичности экспериментального бокса, в котором располагается оболочка с топливом. Дополнительным требованием для метода ИК-выравнивания является использование оболочек, прозрачных для инфракрасного излучения. То есть данный метод не может использоваться для получения криогенных мишеней непосредственно для экспериментов по ЛТС, но может быть полезен для получения базовых знаний о физическом механизме образования криослоя изотопов водорода, о необходимой конструкции криомишени, алгоритмах проведения экспериментов по формированию криослоя и т.д., тем самым снижая риски, возникающие при работе с радиоактивными веществами. В настоящее время для формирования криослоя используется метод ИК-выравнивания.

2. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ключевым условием получения однородного по толщине криогенного слоя водородного топлива по методу радиальных температурных градиентов является выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях, то есть градиенты температур на поверхности сферической полости бокса и на поверхности оболочки должны отсутствовать (в идеальном случае). С целью проверки выполнения условия изотермичности сферической полости бокса был проведен тепловой анализ конструкции. Особый интерес вызвали результаты теплового расчета при включении источника ИК-излучения. Известно, что на длине волны 3.16 мкм коэффициент поглощения кварцевого стекла, из которого сделан капилляр, вклеенный в оболочку, близок к 1. Поэтому на капилляр добавлена нагрузка, моделирующая поглощение рассеянного ИК-излучения капилляром. В расчетах начальная разность температур на поверхности оболочки была нулевой, а после включения источника в месте вклейки капилляра оболочка стала теплее на 10 мК (рис. 2, а). При проведении эксперимента по формированию криослоя на конструкции бокса, приближенной к расчетной модели, были получены результаты, подтверждающие расчеты. На рис. 2, б отчетливо видно влияние капилляра: оболочка в месте вклейки капилляра теплее, соответственно, слой в той области тоньше. Для увеличения отражательной способности капилляра нужно покрывать его золотом, что позволит снизить по-

глощение ИК-излучения со 100% до 4%.

Далее был проведен нестационарный расчет для капилляра с золотым напылением. На капилляр добавлена нагрузка, моделирующая поглощение 4% рассеянного ИК-излучения стеклянным капилляром с золотым напылением. На рис. 2, в представлены результаты расчета: использование капилляра с золотым напылением позволило исключить локальный нагрев в месте вклейки капилляра в оболочку от ИК-излучения, но теперь оболочка охлаждается в основном через капилляр и лишь немного через теплообменный газ — гелий. Это объясняется тем, что металлическая часть составного капилляра подает дейтерия на большом участке контактирует с холодной стенкой бокса. Также наблюдается влияние теплопритоков от окон бокса. На рис. 2, г представлено теневое изображение мишени, полученное в эксперименте на сборке, аналогичной расчетной модели. Отчетливо видно влияние капилляра сверху: оболочка в месте вклейки капилляра холоднее, соответственно, дейтерий перераспределяется туда из более теплых областей, слой там становится толще. Кроме того, теплопритоки от окон греют области оболочки со стороны окон, дейтерий оттуда перераспределяется в более холодные области, слой становится тоньше. Такое перераспределение происходит до выстраивания внутренней поверхности криослоя по изотермической поверхности.

Следующим этапом в достижении изотермичности оболочки является минимизация теплопритоков через окна криостата и бокса. Излучение подсветки уменьшает толщину слоя вдоль оси наблюдения из-за поглощения части попадающего излучения в криослой, следствием чего является его переобразование в более холодные области мишени. Поэтому длина волны сканирующего излучения должна быть близкой к 625 нм (определяется минимумом поглощения дейтерия). Кроме того, присутствие окон в боксе для наблюдения за криослоем оптическим теневым методом также нарушает равномерное тепловое окружение мишени. Проведен нестационарный расчет с двумя закрытыми алюминиевой фольгой окнами бокса. На рис. 2, д видно, что теплопритоки через закрытые окна прекратились, что положительно сказывается на тепловом окружении оболочки. На рис. 2, е представлено теневое изображение той же оболочки, что и на рис. 2, г, но полученное в другом эксперименте, после закрытия окон фольгой. Очевидно, что влияние окон устранено, по сравнению с рис. 2, г, а влияние капилляра осталось.

Для подтверждения возможности исключения влияния холодного стального капилляра на положение изотермической поверхности в следующем расчете стальной капилляр изолирован от стенки бокса полимерной трубкой. На рис. 2, ж показано, что большой тепловой поток от оболочки через капилляр прекратился, оболочка охлаждается через теплообменный газ. При этом поверхность оболочки является изотермичной (рис. 2, з). Это означает,

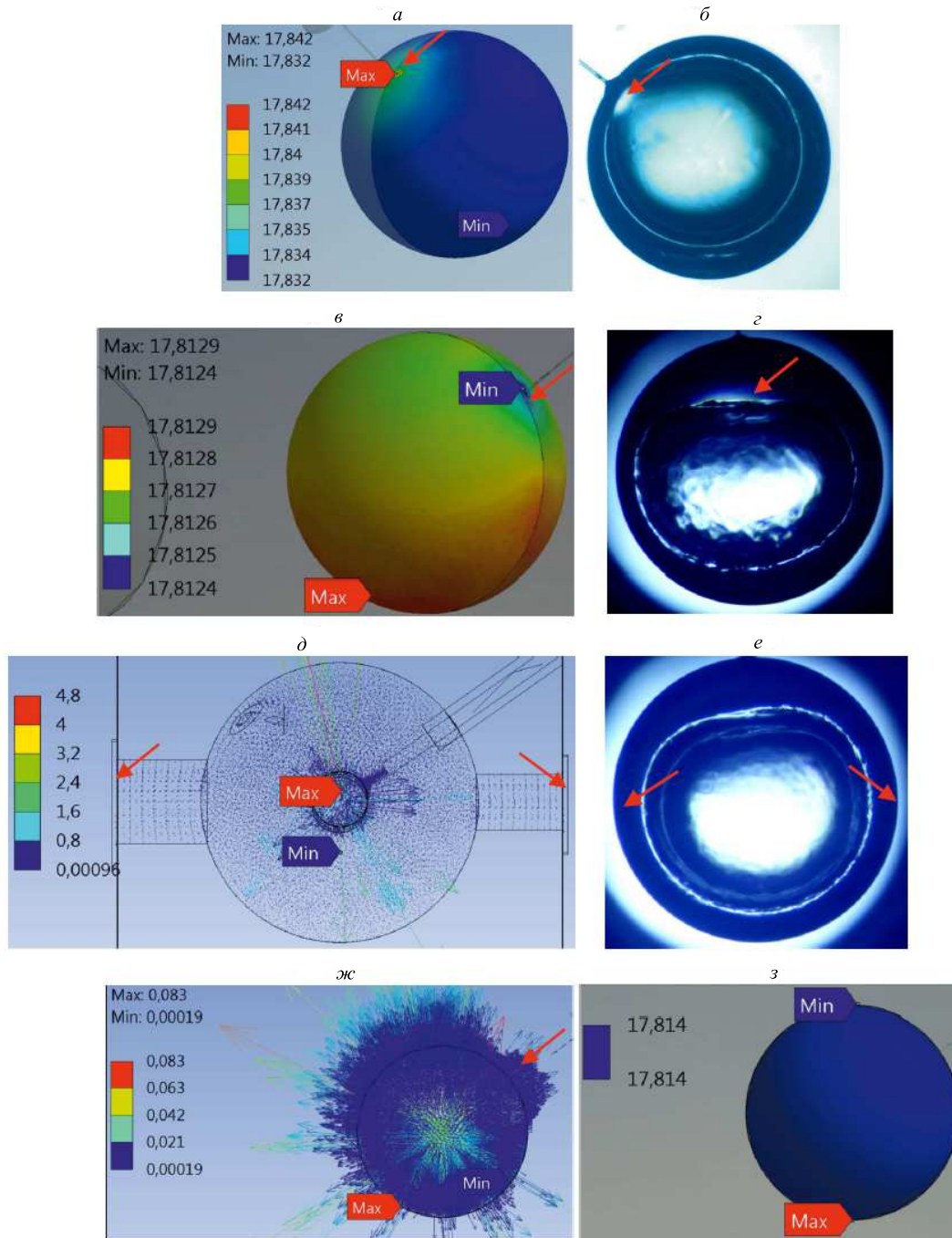


Рис. 2. Тепловые расчеты конструкции и сравнение с экспериментом (теневые изображения). *а, б* — Оболочка со стеклянным капилляром: *а* — расчет распределения температур, *б* — эксперимент. *в, з* — Оболочка со стеклянным капилляром с золотым напылением: *в* — расчет распределения температур, *з* — эксперимент. *д, е* — Минимизация теплопритоков через окна бокса: *д* — расчетные тепловые потоки в гелии в плоскости соединения половин бокса, *е* — эксперимент. *ж, з* — Расчет изоляции капилляра от стенки бокса: *ж* — тепловые потоки через оболочку, *з* — изотермическая поверхность оболочки

что при данной конфигурации экспериментальной сборки (стеклянный капилляр с золотым напылением, изоляция капилляра от стенки бокса, минимизация теплопритоков от окон) может быть выполнено условие равномерного теплового окружения оболочки для получения криогенного слоя с требуемыми параметрами. Соответствующие изменения были внесены в конструкцию бокса, после чего про-

ведена серия экспериментов по формированию однородного по толщине слоя дейтерия в оболочке.

3. ФОРМИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА

Если бы условие равномерного теплового окружения оболочки было единственным фактором,

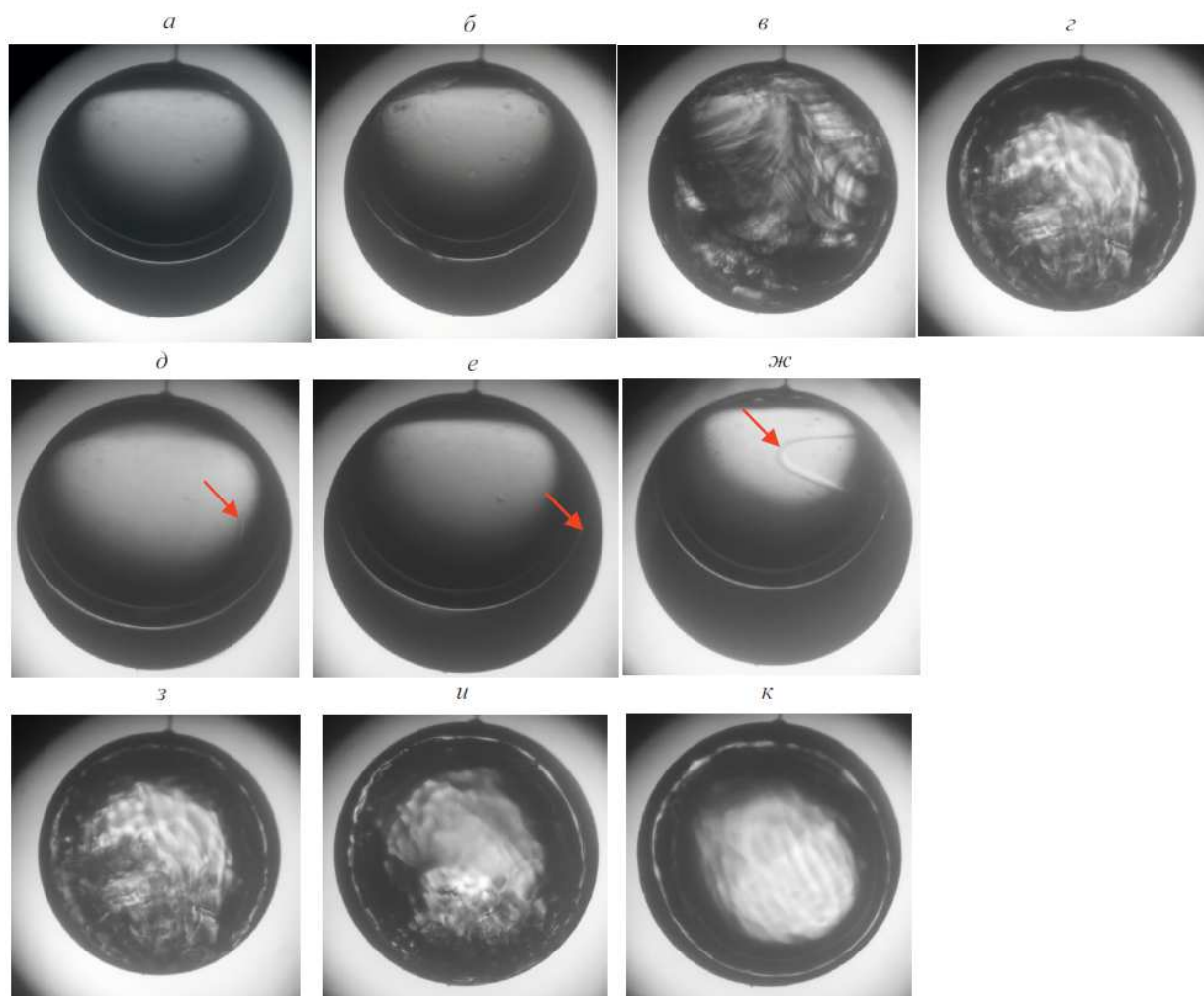


Рис. 3. Сравнение результатов экспериментов с различными методиками формирования криослоя дейтерия в оболочке. *a–г* — Метод быстрой кристаллизации с последующим нагревом ИК-излучением. *д–жс* — Формирования затравочного кристалла для последующего выращивания монокристалла: *д* — на поверхности оболочки, *е* — на границе жидкости, *жс* — начальная стадия роста монокристалла дейтерия. *з–к* — Сравнение результатов экспериментов: *з* — метод быстрой кристаллизации, *и, к* — метод медленной кристаллизации с одновременным нагревом ИК-излучением с различной динамикой охлаждения слоя (*и* — время жизни слоя 60 мин, *к* — время жизни слоя 210 мин)

определяющим положение внутренней поверхности слоя, вещество сформировалось бы в однородный сферически симметричный слой внутри изотермической сферической капсулы. Однако качество кристалла также влияет на окончательную форму слоя. Слои, выращенные методом быстрого охлаждения, обычно приводят к образованию шероховатого поликристаллического слоя. Для снижения шероховатости льда необходимо исключить или хотя бы снизить количество кристаллографических дислокаций (внешние грани, границы зерен) внутри льда и трещин на его внутренней поверхности, которые могут развиваться во время фазы роста кристалла [10].

Один из способов формирования слоя состоит в том, чтобы сначала заморозить дейтерий до анизотропного поликристаллического твердого вещества внутри капсулы, а затем позволить объемно-

му выделению тепла при ИК-нагреве симметризовать слой. Однако жесткость поверхности кристалла влияет на окончательную форму слоя. Поверхность сглаживается до тех пор, пока тепловая энергия, связанная с перераспределением вещества, сравнима с поверхностной энергией, получаемой при необходимости формирования внутренней поверхности с более высокой энергией. Структура поверхности поликристаллической пленки является функцией скорости объемного нагрева и распределения размеров и ориентаций мелких кристаллов, которые определяются начальным зарождением и ростом.

Слои, выращенные методом быстрого охлаждения, обычно приводят к образованию шероховатых поликристаллических поверхностей. На рис. 3, *a–г* показана эволюция одного из таких слоев. Процесс начинается с контролируемого заполнения жидко-

стью оболочки диаметром 1.95 мм при температуре 18.8 К (датчик температуры расположен выше сборки с оболочкой, поэтому приведенные температуры будут несколько отличаться от истинных значений температур на оболочке). После дозирования количества жидкости в оболочке (рис. 3, а) температура быстро снижается до 17 К с целью кристаллизации топлива. В начале процесса наблюдаются множественные центры кристаллизации (рис. 3, б). Затем на случайно выращенное твердое вещество (рис. 3, б) воздействует ИК-излучение и регистрируется перераспределение твердого вещества во времени (рис. 3, в). Получившийся слой показан на рис. 3, г, он имеет шероховатую поверхность с множественными кристаллографическими дислокациями (внешние грани, границы зерен), которые не сглаживаются со временем.

Для улучшения качества внутренней поверхности слоя льда используется следующий метод формирования слоя [11]. Это метод формирования твердого слоя из единичного затравочного кристалла, с плавным понижением температуры при постоянном нагреве ИК-излучением. Это должно привести к образованию монокристаллического сферического слоя, в котором будут отсутствовать дефекты, а шероховатость слоя будет составлять менее 1 мкм. В настоящее время этот метод выполняется путем ручного ввода температуры в программу контроллера при наблюдении изменений в слое на мониторе. Для выращивания слоев более высокого качества использовалась следующая процедура: после напуска дейтерия в оболочку при температуре $T = 18.8$ К и его ожигения температура сборки быстро понижалась до кристаллизации вещества ($T = 18.3$ К) при включенном ИК-нагреве, а затем плавно повышалась с небольшим приращением (от 0.001 до 0.01 К/мин) для того, чтобы расплавить основную массу льда за исключением небольшого кристалла. Как только затравочный кристалл был получен ($T = 18.533$ К), температуру снижали с небольшой скоростью от 0.001 до 0.005 К за 5–20 мин в зависимости от динамики роста кристалла. Когда процесс кристаллизации останавливался, температура снижалась дополнительно на 0.001 К до тех пор, пока процесс не возобновлялся. На рис. 3, д–е показан сформированный затравочный кристалл: на поверхности оболочки (рис. 3, д) и на границе жидкости (рис. 3, е) в двух различных экспериментах. На рис. 3, ж показана начальная стадия роста монокристалла дейтерия.

На рис. 3, з–к показаны результаты формирования криогенного слоя дейтерия в одной и той же оболочке методом быстрой кристаллизации (рис. 3, з) и медленной кристаллизации с одновременным нагревом ИК-излучением с различной динамикой охлаждения слоя (рис. 3, и, к). Диагностика параметров слоя осуществляется по яркому и бледному кольцам на теневом изображении, которые при выполнении требования по шероховатости внутренней поверхности льда < 1 мкм примут вид идеально гладких линий без дефектов [12].

В результате анализа экспериментов выявлено влияние скорости охлаждения при формировании льда на качество его внутренней поверхности. При одинаковых условиях начального формирования монокристалла дейтерия из затравки в одном эксперименте динамика снижения температуры была выше и общее время формирования составило 60 мин (рис. 3, и), в другом эксперименте скорость снижения была ниже и общее время формирования слоя составило 210 мин (рис. 3, к). Очевидно, что во втором случае при более низкой скорости формирования кристалла, слой получился более гладкий, количество кристаллографических дислокаций снизилось. Однако на качество слоя также большое влияние оказывает размер затравочного кристалла, качество поверхности оболочки, поддержание температуры с точностью 1 мК в процессе формирования, стабильность ИК-излучения. Совокупность факторов, присутствующих в данной сборке мишени, не позволила получить слой с требуемыми значениями шероховатости. Также в данной сборке мишени не было выполнено требование по однородности температуры на поверхности оболочки. Из-за того, что температура капилляра ниже, чем температура поверхности оболочки, в образованном по изотерме слое присутствует неконцентричность внутренней поверхности криослоя и поверхностей оболочки (около 4%), и такое положение слоя повторяется из эксперимента в эксперимент.

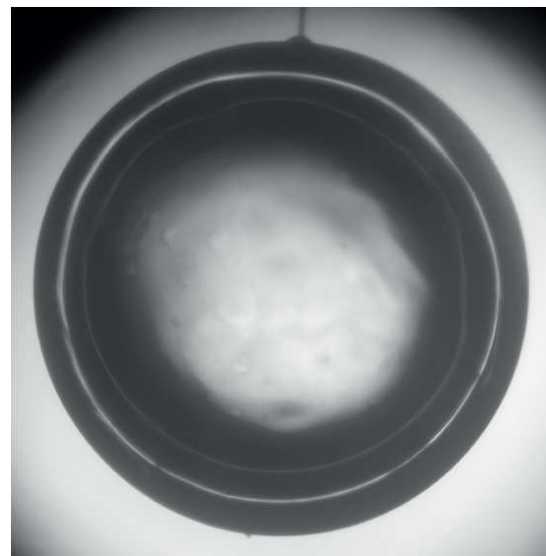


Рис. 4. Криогенная мишень с твердым слоем топлива, полученная методом медленной кристаллизации с одновременным нагревом ИК-излучением. Параметры оболочки (полистирол): диаметр 1952 мкм, толщина стенки 25 мкм. Параметры криослоя (дейтерий) в плоскости локализации изображения: средняя толщина 192–199 мкм, шероховатость внутренней поверхности 12–18 мкм, отклонение от концентричности 0–2%, отклонение от сферичности 2%

На рис. 4 показан слой, сформированный методом медленной кристаллизации с одновременным нагревом ИК-излучением в другой сборке мише-

ни. Параметры оболочки (полистирол): диаметр 1952 мкм, толщина стенки 25 мкм. Характеристическое яркое кольцо более однородное с небольшим количеством дефектов, в центральной области оболочки также не наблюдаются явные поверхностные дефекты, границы зерен и др. Параметры криослоя (дейтерий) в плоскости локализации изображения (вычислены по яркому и бледному характеристическим кольцам): средняя толщина 192–199 мкм, шероховатость внутренней поверхности 12–18 мкм, отклонение от concentричности 0–2% (мода $l = 1$), отклонение от сферичности 2% (мода $l = 2$). То есть параметры слоя по concentричности и сферичности близки к требуемым [2, 3], а шероховатость всё еще сильно превышает требуемые значения. Для формирования криогенного слоя изотопов водорода заданных параметров необходимо продолжать исследования по подбору оптимальных температурных и временных параметров, анализу дефектов и неоднородностей в объеме льда, времени жизни слоя и другим факторам. Это является задачами для дальнейших исследований в области создания криогенных мишеней.

4. ОПТИЧЕСКИЙ ТЕНЕВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КРИОСЛОЯ

В настоящее время для отработки технологии создания криомишени используются оптически прозрачные оболочки. На стенде для исследования мишеней при низких температурах реализована возможность наблюдения криомишени с помощью двух взаимно ортогональных оптических систем. Концепция мишени не предусматривает ее вращения для трехмерного восстановления внутренней поверхности криослоя, поэтому измерение параметров криослоя по яркому кольцу на теневых изображениях возможно только в двух ортогональных друг другу плоскостях при фокусировке на экваторах оболочки, также есть возможность наблюдения неоднородностей при фокусировке на поверхностях криомишени.

Оптический теневой метод наблюдения за криослоем заключается в следующем. Квазипараллельный пучок видимого излучения падает на криомишень, затем, преломляясь и отражаясь на поверхностях оболочки и криослоя, выходит из криомишени. Далее лучи, попадающие в апертуру наблюдения, попадают на камеру, образуя оптическое теневое изображение. Апертура наблюдения определяется числовой апертурой объектива и угловой апертурой окон бокса. Источник излучения, объектив и камера должны быть строго соосны, образуя оптическую ось наблюдения, на которой располагается криомишень.

Проведено двумерное моделирование прохождения пучка видимого излучения через криогенную мишень методом трассировки лучей в приближении геометрической оптики, где переменными параметрами являются неконцентричность и несфе-

ричность поверхностей криомишени, расходимость и наклон пучка относительно оптической оси наблюдения, смещение плоскости локализации изображения относительно экватора мишени, апертура наблюдения, показатели преломления слоев, число лучей и т.д. Разработана программа моделирования, необходимая для исследования влияния вышеречисленных факторов на формирование теневого изображения криомишени и, соответственно, на вычисление параметров криогенного слоя, для нахождения связей положения характеристических особенностей на теневом изображении с параметрами реальных поверхностей криомишени. В основе моделирования лежит нахождение пересечения лучей, заданных параметрическими уравнениями (1), с поверхностями криомишени (2) с момента входа лучей в оболочку и до выхода из нее:

$$\begin{cases} x_i = x_1 + a_x \lambda \\ y_i = y_1 + a_y \lambda, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{(x_i - x_{0i})^2}{a_i^2} + \frac{(y_i - y_{0i})^2}{b_i^2} = 1, \quad (2)$$

где (x_i, y_i) — координаты точки пересечения луча с i -й поверхностью криомишени, (x_1, y_1) — известные координаты точки, через которую проходит прямая, $\mathbf{a}(a_x, a_y)$ — направляющий вектор прямой, λ — параметр, (x_{0i}, y_{0i}) — центр i -й поверхности криомишени в системе отсчета с началом в центре внешней поверхности оболочки, a_i и b_i — полуоси эллипса i -й поверхности криомишени. Все линейные величины в расчетах нормированы на внешний радиус оболочки. Лучи, попавшие в апертуру наблюдения, образуют теневое изображение.

Ход преломленного и отраженного от каждой из границ лучей можно рассчитать на основании закона Снеллиуса по формуле (3)

$$n_i \sin \alpha_i = n_t \sin \alpha_t, \quad (3)$$

где n_i и n_t — показатели преломления первой и второй среды, а α_i и α_t — углы падения и преломления на границе сред. Интенсивность I_t прошедшего через границу раздела луча вычисляется по формуле Френеля (4)

$$I_t = I_i \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2(\alpha_i - \alpha_t)}{\tan^2(\alpha_i + \alpha_t)} + \frac{\sin^2(\alpha_i - \alpha_t)}{\sin^2(\alpha_i + \alpha_t)} \right) \right), \quad (4)$$

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

Определена характеристическая (первая) группа лучей с одним полным внутренним отражением (ПВО) от внутренней поверхности криослоя, ответственная за формирование яркого кольца на теневом изображении (рис. 5, а). Объектив фокусируется на экватор (среднюю плоскость) оболочки, поэтому, измеряя положение яркого кольца относительно внешней границы оболочки по теневому

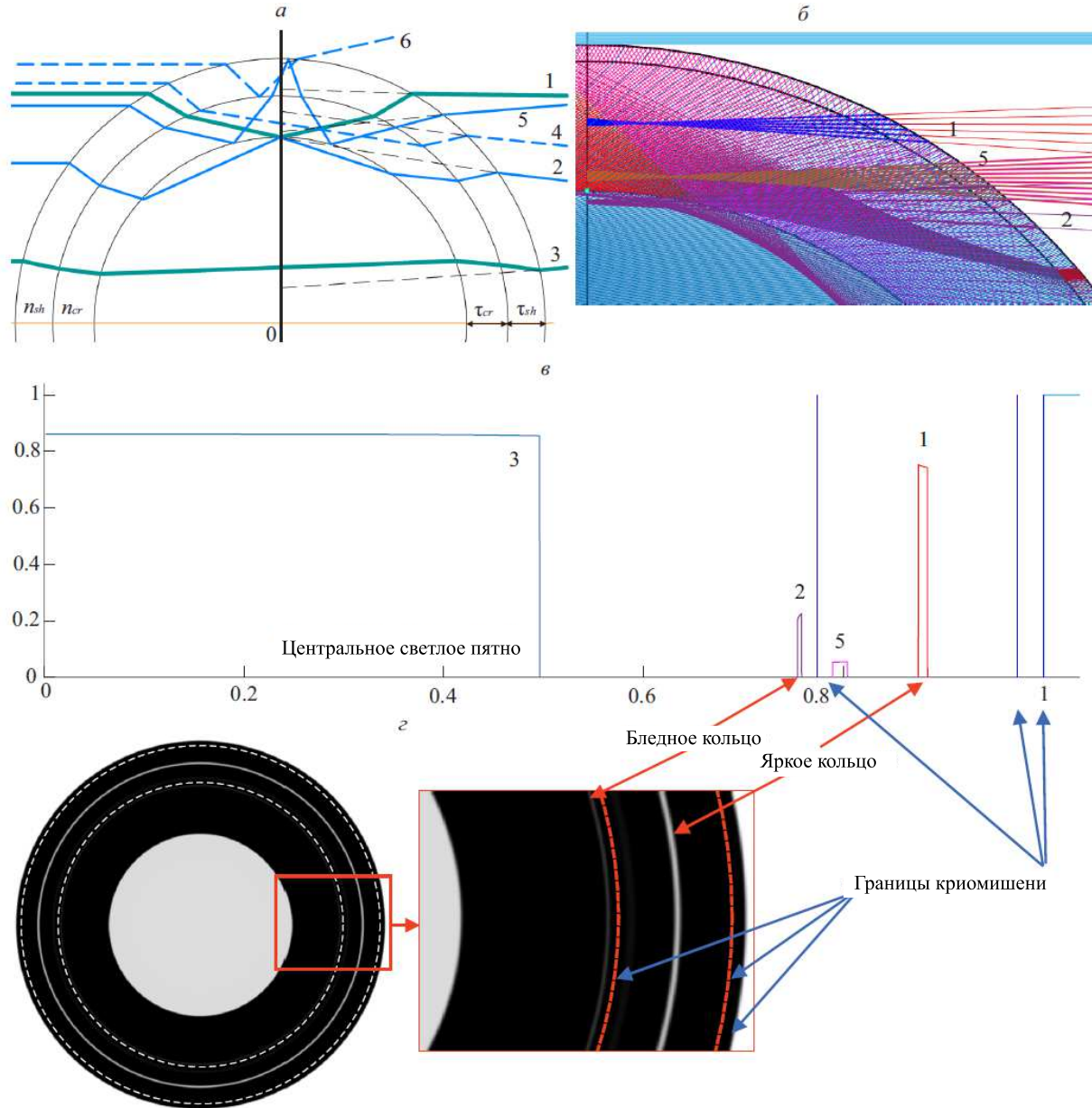


Рис. 5. Теоретическая модель прохождения видимого излучения через криомишень. *a* — Ход основных групп лучей: n_{sh} и n_{cr} показатели преломления оболочки и криослоя соответственно, τ_{sh} и τ_{cr} — толщина оболочки и криослоя соответственно, 1–6 — группы лучей с разными путями. *б–г* — Моделирование. Входные данные: оболочка — диаметр 1952 мкм, толщина стенки 25 мкм; криослой — толщина 196 мкм, апертура наблюдения 0.12, число лучей 10^4 ; *б* — трассировка лучей; *в* — профиль интенсивности на оси локализации изображения; *г* — смоделированное теневое изображение

изображению, можно вычислить информацию о положении внутренней поверхности криослоя только в плоскости локализации изображения [13]. Из решения обратной задачи отслеживания лучей от теневого изображения до ПВО от внутренней поверхности криослоя получена зависимость положения внутренней поверхности криослоя от положения яркого кольца (5):

$$\tau_{cr} = 1 - \tau_{sh} - \frac{R_{br}}{n_{cr} \cos(\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3)}, \quad (5)$$

где τ_{cr} — толщина криослоя, τ_{sh} — толщи-

на оболочки, R_{br} — радиус яркого кольца, n_{cr} — показатель преломления криослоя, $\alpha_0 = \arcsin R_{br}$, $\alpha_1 = \arcsin \frac{R_{br}}{n_{sh}}$, $\alpha_2 = \arcsin \frac{R_{br}}{n_{sh}(1-\tau_{sh})}$, $\alpha_3 = \arcsin \frac{R_{br}}{n_{cr}(1-\tau_{sh})}$, n_{sh} — показатель преломления оболочки.

На экспериментальном изображении также присутствует бледное кольцо, которое образовано группой лучей с частичным отражением от внутренней поверхности криослоя (вторая группа), но со стороны насыщенного пара (рис. 5, *a*). При этом эта группа лучей исследует ту же область, что и лучи пер-

вой группы, меньше подвержена влиянию капилляра благодаря другому пути лучей и может быть использована как характеристическая [14]. Для данной группы лучей также решена обратная задача и получена зависимость положения внутренней поверхности криослоя от положения бледного кольца в неявном виде (6):

$$\alpha_0 - \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4 - 2\alpha_0 + \frac{\pi}{2} = 0, \quad (6)$$

где

$$\alpha_0 = \arcsin R_{tr}, \quad \alpha_1 = \arcsin \frac{R_{tr}}{n_{sh}}, \quad \alpha_2 = \arcsin \frac{R_{tr}}{n_{sh}(1-\tau_{sh})},$$

$$\alpha_3 = \arcsin \frac{R_{tr}}{n_{cr}(1-\tau_{sh})}, \quad \alpha_4 = \arcsin \frac{R_{tr}}{n_{cr}(1-\tau_{sh}-\tau_{cr})},$$

R_{tr} — радиус бледного кольца.

Определены еще несколько основных групп лучей, вносящий вклад в теневое изображение (рис. 5, а). Третья группа — центральная группа лучей, последовательно проходящая через все поверхности криомишени и образующая большое светлое пятно по центру криомишени. Четвертая группа, преломляющаяся на поверхностях оболочки и проходящая через криослой, не попадая на его внутреннюю поверхность, появляется при большой апертуре наблюдения. Пятая группа — группа лучей с двумя ПВО на внутренней поверхности криослоя — образует кольцо очень малой интенсивности и слабо заметна на теневом изображении. Шестая группа, с ПВО на внутренней поверхности оболочки, образует яркое кольцо на внешней поверхности оболочки и наблюдается в толстых оболочках.

Параметры криомишени, представленной на рис. 4, использовались при трассировке пучка видимого излучения через криомишень в приближении, что криомишень центрально-симметричная (оболочка — диаметр 1952 мкм, толщина стенки 25 мкм; криослой — толщина 196 мкм, апертура наблюдения 0.28, число лучей 2000). Трассировка лучей через такую криомишень показана на рис. 5, б. Различные группы лучей с разными путями прохождения через криомишень обозначены разными цветами. На выходе из криомишени показаны только лучи, попадающие в апертуру наблюдения. По вычисленным координатам пересечения продолжений этих лучей с осью локализации изображения с учетом интенсивности лучей строится профиль интенсивности на оси локализации изображения (рис. 5, в), который в случае центрально-симметричной мишени разворачивается в теневое изображение, как показано на рис. 5, г.

С помощью описанной программы моделирования прохождения пучка видимого излучения через криогенную мишень исследованы границы применимости оптического теневого метода. Ход исследования состоит в следующем. При решении обратной двумерной задачи прохождения излучения от изображения до попадания на внутреннюю поверхность криослоя центрально-симметричной криомишени были получены зависимости положения внутренней поверхности криослоя от положений яркого кольца и бледного кольца (5) и (6). Эти две группы лучей исследуют одну и ту же область внутренней поверхности криослоя, но с разных сторон, и лучи

проходят разными путями через криомишень, поэтому получаются два независимых измерения.

Константы, используемые при исследовании: диаметр оболочки 2000 мкм, толщина оболочки 30 мкм, толщина криослоя 200 мкм, числовая апертура объектива 0.06, угловая апертура окон используемого бокса 0.31, количество лучей 2000. На каждом этапе варьируется в определенных пределах один параметр при неизменных остальных. При заданных параметрах криомишени и оптической системы наблюдения в программе моделируется профиль интенсивности на оси локализации изображения, который в случае центрально-симметричной криомишени разворачивается в теневое изображение. На профиле интенсивности получаются смоделированные положения яркого кольца и бледного кольца, R_{br} и R_{tr} (на оси локализации изображения относительно положения границ криомишени на этой же оси).

По этим расчетным образом полученным положениям яркого и бледного колец (R_{br} и R_{tr}) выполняется обратное вычисление: с помощью зависимостей (5) и (6) $\tau_{cr}(R_{br})$ и $\tau_{cr}(R_{tr})$, полученных при решении обратной задачи, вычисляется толщина криослоя на данной оси локализации изображения, будто она известна. То есть получаются два независимых вычисления толщины криослоя по двум разным кольцам: τ_{cr}^{br} и τ_{cr}^{tr} . При варьировании одного из переменных параметров получается влияние этого параметра на корректность вычисления толщины криослоя τ_{cr}^{br} и τ_{cr}^{tr} . При сравнении вычисленной по яркому кольцу толщины криослоя τ_{cr}^{br} с изначально заданной толщиной τ_{cr} получается ошибка вычисления толщины по яркому кольцу, $\Delta\tau_{cr}^{br}$. Аналогично при сравнении этой вычисленной по бледному кольцу толщины криослоя τ_{cr}^{tr} с изначально заданной толщиной τ_{cr} получается ошибка вычисления толщины слоя по бледному кольцу, $\Delta\tau_{cr}^{tr}$. Приемлемой считается ошибка не более 1–2 мкм, поэтому, если ошибка превышает эту величину, результат вычисления может быть некорректным. Это и накладывает ограничения на границы применимости оптического теневого метода.

Основные выводы по границам применимости метода следующие. Вычисление толщины криослоя в плоскости локализации изображения при наличии неоднородности его внутренней поверхности в моде $l = 1$ (неконцентричность) вдоль оптической оси будет некорректным по обоим кольцам, а при неоднородности в плоскости локализации изображения некорректно вычисление толщины по бледному кольцу (но при этом по яркому кольцу — ошибка менее 1 мкм). При наличии неоднородности внутренней поверхности криослоя в моде $l = 2$ (несферичность) вычисление толщины по бледному кольцу некорректно, по яркому кольцу ошибка менее 1 мкм. Неоднородность поверхностей оболочки в моде $l = 1$ дает ошибку до 10 мкм, в моде $l = 2$ — ошибка менее 1 мкм. Относительные толщины слоев не влияют на ошибку. При имеющейся угловой апертуре наблюдения 0.12–0.28 рад, огра-

ниченной объективами и угловой апертурой окон бокса, ошибка до 1–2 мкм при увеличении апертуры, но чем меньше числовая апертура, тем ниже разрешающая способность объектива. Требования к источнику освещения предъявляются следующие: угол расходимости желателен до 0.5° , несоосность с оптической осью — до 0.1° , длина волны должна быть близкой к 625 мкм (определяется минимумом поглощения дейтерия). По критерию Релея минимальное разрешимое расстояние для используемых объективов [15]: для объектива с увеличением $2X$ и $NA=0.06$ составляет 5.0 мкм в видимом свете, 6.4 мкм для 625 нм; для объектива с увеличением $3X$ с $NA=0.14$ составляет 2.2 мкм в видимом свете, 2.7 мкм для 625 нм, где 625 нм — рабочая длина волны светодиода, которая находится вблизи минимума поглощения дейтерия (поскольку криослой становится тоньше вдоль оптической оси из-за нагрева от источника освещения) [3, 14, 16, 17].

Для получения твердого криогенного слоя заданной толщины необходимо контролировать количество напускаемого жидкого водородного топлива при наполнении оболочки. Проанализированы формы поверхности жидкость–газ в сферической оболочке для разных степеней заполнения оболочки жидкими изотопами водорода. Получено, что форму поверхности в плоскости локализации изображения можно аппроксимировать эллипсом для вычисления объема жидкости [17]. Задача сводится к осесимметричной относительно вертикальной оси, проходящей через центр оболочки. Проведена оценка зависимостей полуосей и смещения центра эллипса, аппроксимирующего внутреннюю поверхность жидкости, относительно центра оболочки от объема жидкости и внутреннего объема оболочки.

Для решения задачи получения криослоя заданной толщины разработана программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов. В качестве входных данных в программе используются известные параметры: диаметр и толщина стенки оболочки (мкм, измеряются перед постановкой в криогенный эксперимент), требуемая толщина криослоя после выравнивания (мкм). Также выбираются нужные изотопы водорода, которые отличаются свойствами (плотности, показатели преломления).

По входным данным в программе вычисляются объем жидкости, параметры формы поверхности жидкости, высота мениска жидкости на оси локализации изображения. С помощью зависимости положения яркого кольца от положения внутренней поверхности криослоя на оси локализации изображения, полученной при решении обратной задачи, вычисляется видимая высота мениска жидкого топлива на вертикальной оси симметрии на теновом изображении.

Таким образом, выходной параметр программы — видимая на теновом изображении высота мениска жидкого топлива (мкм), которая отличается

от реальной. При проведении эксперимента ведется трансляция процесса наполнения оболочки жидким топливом в реальном времени, при достижении нужной видимой высоты мениска, с учетом дозаполнения остаточным топливом из магистралей, прекращается подача газа. Описанная программа проверена с помощью программы трассировки лучей через криомишень.

Разработана программа для оптического теневого контроля параметров твердого криослоя [18]. В программе необходимо задать диаметр и толщину стенки оболочки в микрометрах, необходимый угловой шаг в градусах, название изображения для обработки и название файла для записи результата.

Основные этапы программы: выделение границ на изображении, поиск внешней границы и центра оболочки, развертка изображения в полярные координаты, поиск пикселей границы на развертке, фильтрация выпадающих точек, вычисление радиуса оболочки на развертке [19]. Далее выполняется идентификация внешнего и внутреннего краев яркого кольца, аппроксимация координат яркого кольца. Для каждого значения яркого кольца находится значение толщины криослоя из зависимости (5), полученной при решении обратной задачи для яркого кольца. Затем выполняется выделение границ на исходном изображении по меньшему уровню интенсивности, развертка в полярные координаты и идентификация бледного кольца. Для каждого значения бледного кольца находится значение толщины криослоя из зависимости (6), полученной при решении обратной задачи для бледного кольца. Для проверки найденные координаты яркого и бледного колец, внутренней поверхности криослоя преобразуются обратно в декартовы и наносятся на исходное теновое изображение.

Далее для каждого измерения отдельно (по яркому и бледному кольцам) вычисляется среднее значение толщины криослоя, профиль, среднеквадратичная шероховатость (*rms*), спектр мощности Фурье (нужен для моделирования процесса имплюзии мишени в эксперименте по зажиганию), отклонения от concentричности и сферичности внутренней поверхности криослоя в плоскости локализации изображения. Все этапы выполняются автоматически. Вычисленная информация записывается в файл. Время диагностики определяется размером исходного изображения, для изображения размером около 1000×1000 пикселей — менее 1 мин, 4912×3684 пикселей — около 3 мин на стандартном персональном компьютере. Программа многократно проверена на смоделированных оптических теновых изображениях центрально-симметричных криомишеней с различными входными параметрами (диаметрами, толщинами слоев, апертурами наблюдения и т.д.).

На рис. 6 представлен результат вычисления параметров твердого криослоя по экспериментальному оптическому теновому изображению, представленному на рис. 4. Входные данные: диаметр обо-

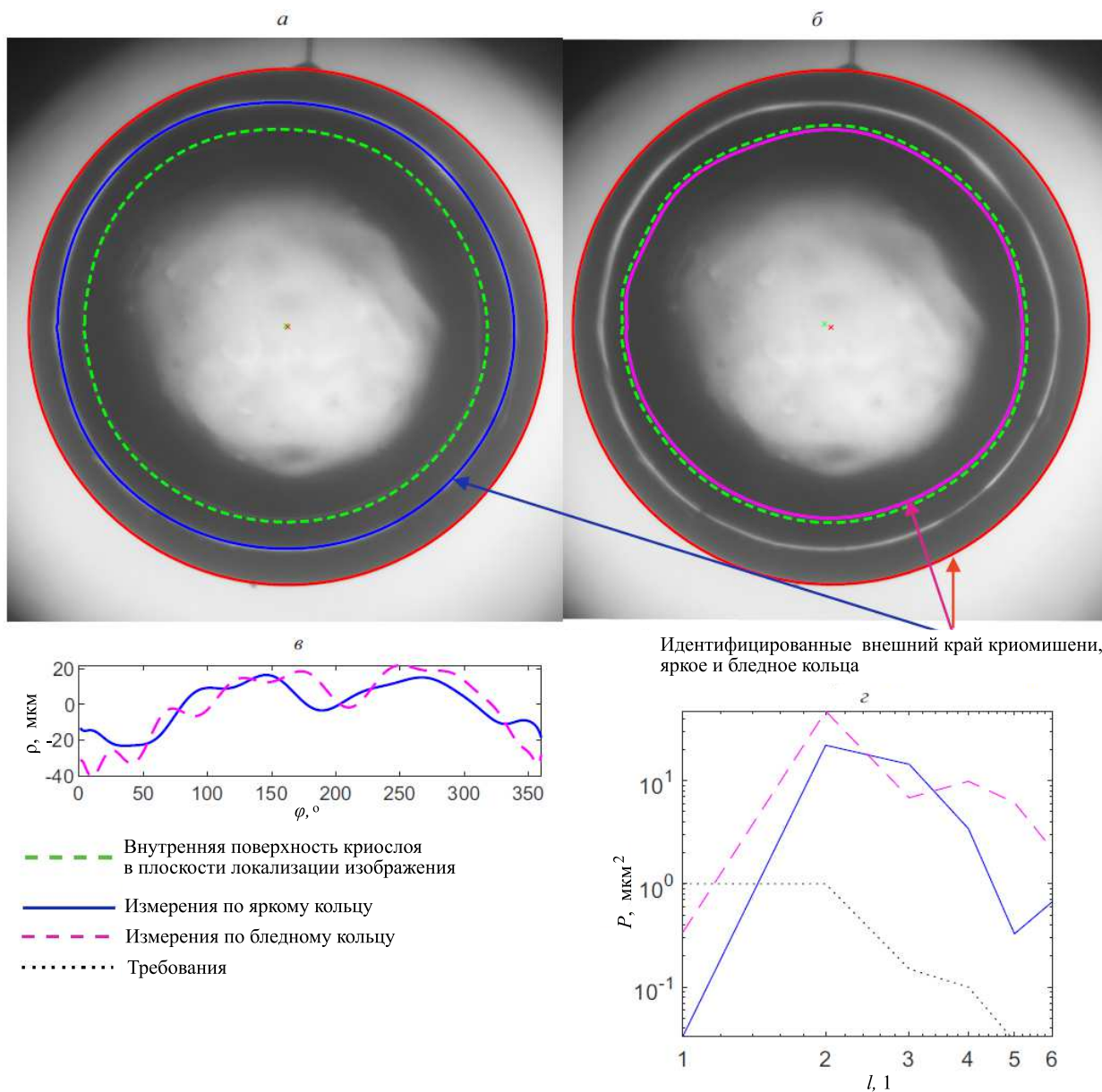


Рис. 6. Выходные данные программы для оптического теневого контроля параметров твердого криослоя дейтерия. Внутренняя поверхность криослоя в плоскости локализации изображения, вычисленная по яркому кольцу (а) и бледному кольцу (б), профиль $\rho(\phi)$ (в) и спектр плотности мощности $P(l)$ (г). Измерения по яркому кольцу: средняя толщина криослоя 199 мкм; параметры внутренней поверхности криослоя: $rms = 12$ мкм, отклонения от концентричности 0% и сферичности 0% и 2% соответственно. Измерения по бледному кольцу: средняя толщина криослоя 192 мкм; параметры внутренней поверхности криослоя — $rms = 18$ мкм, отклонения от концентричности и сферичности 2% и 2% соответственно

лочки 1952 мкм, толщина стенки оболочки 25 мкм, угловой шаг 1° . Выходные данные следующие. Измерения по яркому кольцу: средняя толщина криогенного слоя дейтерия составляет 199 мкм; параметры внутренней поверхности криослоя — среднеквадратичная шероховатость 12 мкм, отклонение от концентричности 0%, отклонение от сферичности 2%. Измерения по бледному кольцу: средняя толщина криогенного слоя дейтерия составляет 192 мкм; параметры внутренней поверхности криослоя — среднеквадратичная шероховатость 18 мкм, отклонение от концентричности 2%, отклонение от

сферичности 2%. Для неоднородного слоя, как видно на рис. 6, присутствует разница между толщинами, вычисленными по яркому и бледному кольцу, что объясняется неоднородностью слоя. Отклонения от концентричности d_{conc} и сферичности d_{sph} вычислены по формулам (7) и (8) [20]:

$$d_{conc} = \frac{d_{offset}}{d_{avg}} 100\%, \quad (7)$$

$$d_{sph} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{avg}} 100\%, \quad (8)$$

где d_{offset} — расстояние между центром внешней поверхности оболочки и центром внутренней поверхности криослоя, d_{avg} , d_{max} и d_{min} — средний, максимальный и минимальный диаметры внутренней поверхности криослоя соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание криомишеней для ЛТС — сложная и многоуровневая задача с высокими требованиями к геометрии и размеру элементов, точности их изготовления и сборки, герметичности, качеству криогенного слоя и методам его аттестации. На данном этапе отрабатывается способ формирования слоя дейтерия при нагреве ИК-излучением, чтобы снизить трудозатраты и исключить риски, которые возникают при работе с радиоактивными изотопами водорода.

Разработан комплекс программ для контроля параметров жидкого топлива для его дозирования при наполнении оболочки, для контроля параметров твердого криослоя, а также для исследования границ применимости оптического теневого метода и исследования влияния различных факторов на формирование теневого изображения и, соответственно, на корректность вычисления параметров криослоя.

Проведен тепловой анализ конструкции бокса, подобрана конфигурация сборки, при которой может быть выполнено условие равномерного теплового окружения оболочки для получения криогенного слоя с требуемой разнотолщиной. Соот-

ветствующие изменения были внесены в экспериментальную конструкцию бокса, после чего проведена серия экспериментов по формированию однородного по толщине слоя дейтерия в оболочке.

Анализ зарубежного опыта и проведенные исследования показали, что на качество получаемого криогенного слоя существенное влияние оказывает динамика кристаллизации и формирования слоя. Быстрая кристаллизация дейтерия в оболочке и последующий нагрев ИК-излучением приводит к образованию шероховатого поликристаллического слоя дейтерия. Для удовлетворения требований к качеству слоя необходимо вырастить монокристалл дейтерия с одновременным формированием его на внутренней поверхности сферической оболочки.

В настоящее время благодаря такому методу удалось достигнуть отклонения от концентричности и сферичности внутренней поверхности криослоя в пределах 2%, шероховатости — в пределах 20 мкм при средней толщине криослоя 192–199 мкм (в полистирольной оболочке диаметром 1952 мкм и толщиной стенки 25 мкм). Результаты являются повторяемыми. Проведены эксперименты по получению как поликристаллического, так и монокристаллического слоя льда в одной и той же сферической оболочке. Для формирования криогенного слоя изотопов водорода требуемых параметров необходимо продолжать исследования по подбору оптимальных температурных и временных параметров, анализу дефектов и неоднородностей в объеме льда, времени жизни слоя и других факторов.

- [1] Гаранин С.Г., Гарнов С.В., Сергеев А.М., Хазанов Е.А. // Вестник Российской академии наук. **9**, №. 5. 435 (2021).
- [2] Sangster T.C., Betti R., Craxton R.S., Delettrez J.A. et al. // *Physics of Plasmas*. **14**, 058101 (2007).
- [3] Tianliang Yan, Kai Wang, Zhongming Zang, An Lu et al. // *Optics and Laser Technology*. **134**, 106595. (2021).
- [4] Martin A J., Simms R.J., Jacobs R.B. // *J. Vac. Sci. Technol.* **6**. 1885. (1988).
- [5] London R.A., Koziowski B.J., Marinak M.M., Kerbel G.D. // *Fusion Sci. Technol.* **49**, 608. (2006).
- [6] Рогожина М.А., Чугров И.А., Зарубина Е.Ю., Батюков С.Ю. // Пат. 2778245 Рос. Федерации: МПК G21B 1/11 (2006.01).
- [7] Рогожина М.А., Зарубина Е.Ю. // *Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM22 Junior*. (2023).
- [8] Rogozhina M.A., Zarubina E.Yu. // *Physics of Atomic Nuclei*. **85**, N 10. 1642 (2022).
- [9] Izgorodin V.M., Solomatina E.Yu., Pepelyaev A.P., Rogozhina M.A. et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. **747**. (2016).
- [10] Cryogenic Targets. Current Status and Future Development // *LLE Review*. **114**. 57 (2009).
- [11] Bittner D.N., Koziowski B., Pipes J., Bernat T.P. et al. // *Inertial confinement fusion*. **8**, 4. 131 (1998).
- [12] Zarubina E.Yu., Rogozhina M.A. // *Physics of Atomic Nuclei*. **85**, 10. 1638 (2022).
- [13] Three-Dimensional Characterization of Spherical Cryogenic Targets Using Ray-Trace Analysis of Multiple Shadowgraph Views // *LLE Review*. **109**. 46.
- [14] Harding D.R., Wittman M.D., Redden N.P., Edgel D.H. et al. // *Fusion Science and Technology*. **00**. (2020).
- [15] Ландсберг Г.С. // *Оптика*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [16] Formation of Deuterium-Ice Layers in OMEGA Targets // *LLE Review*. **99**.
- [17] Harding D.R., Wittman M.D., Edgel D.H. // *Fusion Science and Technology*. **63**. 95 (2013).
- [18] Зарубина Е.Ю., Рогожина М.А. // *Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM22 Junior*. (2023).
- [19] Three-dimensional characterization of cryogenic target ice layers using multiple shadowgraph views // *LLE Review*. **104**.
- [20] Li J., Lindley-Start J., Porch A., Barrow D. // *Scientific Reports*. **7**. (2017).

Creation of the indirect-drive cryogenic target with the solid deuterium layer

E. Yu. Zarubina^{1,2,a}, M. A. Rogozhina^{1,b}, I. A. Chugrov^{1,c}¹ *The Russian Federal Nuclear Center–All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF), Sarov 607188, Russia*² *Lomonosov Moscow State University Branch in Sarov. Sarov 607328, Russia*E-mail: ^a zarubinaelena2@yandex.ru, ^b rogozhina.marina.a@gmail.com, ^c cahbi4var@mail.ru

An indirect-drive cryogenic target is necessary for research in the field of laser thermonuclear fusion at a megajoule energy level facility. Solid fuel layer in the target must meet high requirements: a roughness of the inner cryolayer surface must be less than $1\ \mu\text{m}$, deviations from the sphericity and the concentricity must be less than 1%. This paper describes the results of the research on meeting these requirements, notably, cryolayer formation and its characterization. Due to the slow crystallization method of the deuterium layer with its simultaneous heating by IR radiation it is possible to obtain deviations from the sphericity and the concentricity of the inner cryolayer surface within limits of 2%, the roughness — within limits of 20 mkm. Theoretical thermal calculations of the target construction are compared with experiment. The program system was developed using the optical shadow method which makes it possible to measure liquid fuel when filling the shell during the performance of the experiment, to perform the characterization of the solid cryogenic layer parameters, to evaluate characterization results robustness.

PACS: 28.52.Cx

Keywords: cryogenic target, deuterium, IR-layering, single crystal, optical characterization.*Received 21 November 2023.*English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 1. Pp. 25–38.**Сведения об авторах**

1. Зарубина Елена Юрьевна — мл. науч. сотрудник ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», аспирант; тел.: (831) 302-27-81, e-mail: zarubinaelena2@yandex.ru.
2. Рогожина Марина Анатольевна — ст. науч. сотрудник ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ»; тел.: (831) 302-27-81, e-mail: rogozhina.marina.a@gmail.com.
3. Чугров Иван Александрович — канд. физ.-мат. наук, нач. НИЛ ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ»; тел.: (831) 302-28-85, e-mail: cahbi4var@mail.ru.