

# МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

*Зарубина Елена Юрьевна (EYuZarubina@vniief.ru), Рогожина Марина Анатольевна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, Россия

## Введение

Криогенная мишень непрямого облучения необходима для осуществления и демонстрации зажигания при проведении экспериментов по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС). При сжатии термоядерной мишени вблизи ее порога зажигания может быть достигнута энергия выхода термоядерной реакции синтеза, превышающая энергию, вложенную в лазерный импульс. В общем случае криогенная мишень представляет собой полую сферическую оболочку с расположенным на ее внутренней поверхности сферически симметричным твердым криогенным слоем DT-топлива. Непрямое облучение предполагает конверсию (с применением бокса-конвертора) лазерного излучения в квазиравновесное рентгеновское излучение, которое затем облучает криогенную мишень.

В данной работе приведены результаты разработки методов контроля твердого слоя изотопов водорода в криогенной мишени непрямого облучения. Разработаны и введены в эксплуатацию три программы: программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов для получения твердого криогенного слоя заданной толщины, программа для теневого контроля параметров твердого криогенного слоя в плоскости локализации изображения, программа моделирования рентгеновского изображения криомишени методом трассировки лучей.

## Требования для зажигания криомишени

Криомишени, предоставляемые в лазерный эксперимент по зажиганию, должны соответствовать высоким требованиям. В различных информационных источниках приводятся следующие требования зажигания криомишени: шероховатость внутренней поверхности криослоя должна быть в пределах 1 мкм для всех мод (от  $l = 1$  до  $l = 1000$ , где  $l$  – номер моды, но на практике разрешение измерений обычно ограничивается модой  $l = 100$ ) и не более 0,25 мкм для мод выше  $l = 10$  [1]; однородность, сферичность, концентричность слоев должна быть менее 1–2 % [2]; однородность, сферичность, концентричность должна быть менее 1%, среднеквадратичная шероховатость  $0,1 \div 1$  мкм [3].

В работе [4] приведены требования к шероховатости поверхности DT-слоя в криомишени на установке NIF в трех частях. Форма, выраженная в первых шести модах из Фурье-анализа поверхности, полученного из радиально-угловой зависимости, связана с тепловым окружением и контролируется нагревателями на хольрауме. Для высоких мод  $l = 7 - 128$  должно выполняться условие шероховатости  $r_{ms} < 0,83$  мкм, это контролируется свойствами поверхности, бета-выравниванием, определяется начальным формированием слоя. Требования к локальным дефектам: а) площадь поперечного сечения канавки (плоская трещина на поверхности льда)  $A < 200$  мкм<sup>2</sup>; б) количество и длина дефектов (взвешенная сумма для линейных дефектов) должно быть:  $K < 0,7$  мкм ( $K = \sqrt{\sum((A_i)^2 \cdot L_i)} / V$ , где  $A_i$  и  $L_i$  – площадь и длина  $i$ -го дефекта,  $V$  – объем топлива для нормировки).

В работе [5] описаны требования к пустотам, трещинам: во внешнем полукольце топливного слоя изменения столбцовой плотности из-за множества пустот, трещин, дефектов должны быть менее четырех объемных процентов типичного объема  $0,3$  мкм<sup>3</sup> на дефект.

Неотъемлемой частью создания криогенной мишени является разработка методов контроля параметров слоя изотопов водорода, поскольку топливо в оболочке перераспределяется до тех пор, пока внутренняя поверхность криослоя не выстроится по изотермической поверхности, которая подвержена влиянию множества факторов и является неустойчивой во времени. Существует три метода контроля: оптический теневой и оптический интерферометрический для контроля криослоя в оптически прозрачных оболочках (например, полистирол), рентгеновский метод с фазовым контрастом для контроля криослоя в оптически непрозрачных оболочках (например, высокоплотный углерод) [4].

В настоящее время для отработки технологии создания криомишени используются только оптически прозрачные оболочки, поэтому в основном развивается направление оптической теневой диагностики криослоя. На стенде для исследования мишеней при низких температурах реализована возможность наблюдения криомишени с помощью двух взаимно ортогональных оптических схем. 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 мишени. В качестве источника излучения используются светодиодные источники белого света с коллиматорами для получения квазипараллельного пучка. Для сбора пучка излучения, прошедшего через мишень, используются объективы с увеличением 2X и 3X и рабочими расстояниями 92,0 мм и 77,8 мм соответственно. Для захвата изображения используются камеры с размером матрицы 4912x3684 пикселей. Оптический теневой метод наблюдения за криослоем заключается в следующем. Параллельный пучок видимого излучения падает на оболочку, затем, преломляясь и отражаясь на границах оболочки и криослоя, выходит из оболочки. Далее лучи, попадающие в апертуру наблюдения объектива, попадают на CCD-камеру, образуя теневое изображение. Источник излучения, объектив и камера должны быть строго соосны, образуя оптическую ось наблюдения, на которой располагается оболочка [6].

Построена теоретическая модель прохождения света через оптически прозрачную оболочку с топливом для исследования вклада различных групп лучей (т. е. лучей с одинаковыми отражениями и преломлениями) в теневое изображение. Наиболее точную информацию о внутренней поверхности криослоя несет в себе яркое кольцо, поэтому оно является характеристическим. Объектив фокусируется на экватор (среднюю плоскость) оболочки, поэтому, измеряя положение яркого кольца относительно внешней границы оболочки по теневому изображению, можно вычислить информацию о положении внутренней поверхности криослоя только в плоскости локализации изображения. Параметры оболочки с твердым криослоем, полученной в эксперименте по выравниванию криослоя на установке OMEGA [7], использовались для проверки теоретической модели. Получена зависимость толщины криослоя от положения яркого кольца на теневом изображении и параметров оболочки. Зависимость согласуется с графиками, полученными в работе [3].

Рентгеновский метод с фазовым контрастом основан на отклонении рентгеновских лучей на поверхностях криомишени. На внутренней поверхности льда лучи отклоняются, образуя на изображении область отсутствия сигнала – темное кольцо, которое является характеристическим для данного метода. Для образования такой картины источник рентгеновского излучения с размером фокусного пятна порядка микрон должен располагаться на минимально возможном расстоянии (около 7–10 см) к криомишени, на это расстояние накладываются ограничения размеры криостата, в котором располагается мишень. При этом рентгеновская камера для захвата изображения должна располагаться на расстоянии около 1 м от объекта. Моделирование оптических и рентгеновских изображений требуется для построения теоретических моделей прохождения видимого и рентгеновского излучения через мишень, которые позволяют найти связи между реальными параметрами поверхностей (положение поверхностей относительно внешней границы оболочки) и характеристическими особенностями (например, яркими и темными кольцами), видимыми на изображениях. С помощью теоретических моделей можно выявлять и исследовать различные факторы, влияющие на образование теневого изображения и ошибки измерений (например, несоосность измерительной

системы, смещение объекта исследования относительно фокальной плоскости системы, влияние расходимости и длины волны источника излучения и др.). Важной целью теоретического моделирования является также установление границ применимости методов измерения.

### **Программа для теневого контроля количества напускаемых жидких изотопов водорода**

Для получения твердого криогенного слоя заданной толщины необходимо контролировать количество напускаемых жидких изотопов водорода при наполнении оболочки. Проведен анализ формы поверхности жидкость-газ: получено, что форму поверхности в плоскости локализации изображения можно аппроксимировать эллипсом для вычисления объема жидкости, что подтверждается в работах [8, 9].

Для решения задачи получения криослоя заданной толщины разработана и введена в эксплуатацию программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов. Как показано на рис. 1, 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), диаметр оболочки (пиксели) – измеряется при юстировке оптической схемы наблюдения перед проведением эксперимента. Также выбираются нужные изотопы водорода ( $D_2$  или  $DT$ ), которые отличаются свойствами [10]. Выходной параметр программы – видимая на теновом изображении высота мениска жидкого топлива (пиксели). Программа позволяет контролировать уровень жидких изотопов водорода при наполнении оболочки для получения твердого криогенного слоя топлива требуемой толщины.

### **Программа для теневого контроля параметров твердого криослоя**

В настоящее время проводится работа над программой диагностики твердого слоя изотопов водорода. Далее описаны основные этапы программы на примере теневого изображения криомишени, представленного на рис. 2. В программе необходимо задать диаметр и толщину стенки оболочки в мкм, необходимый шаг по углу в градусах, название изображения для обработки и название файла для записи результата. Входные данные для изображения на рис. 2: диаметр оболочки 1215 мкм, толщина стенки оболочки 17 мкм, угловой шаг  $0,2^\circ$ . Далее все описанные ниже этапы выполняются автоматически.

Сначала цветное изображение преобразуется в полутоновое, применяется метод Канни обнаружения границ на изображении. Результат обработки представлен на рис. 3. Выполняются несколько итераций поиска внешней границы и центра оболочки. По найденным точкам, принадлежащим границе оболочки, проводится аппроксимация границы эллипсом (общий случай, если оболочка не является идеально сферической). Решается система уравнений с четырьмя неизвестными (полуоси и две координаты центра эллипса) – эта последняя итерация поиска центра. Бинарное изображение разворачивается в полярные координаты через последний центр [11]. Размер полярного изображения по горизонтали определяется заданным угловым шагом. Далее выполняется поиск внешней границы оболочки на развернутом изображении: найденные пиксели обозначены на рис. 3. Фильтруются выпадающие точки, которые возникают из-за дефектов изображения, пылинок на оболочке, выделенных границ капилляра и т. д. Интерполяционная функция и будет считаться внешней границей оболочки на развернутом изображении, а среднее значение составляющих ее координат будет полярным радиусом оболочки на развернутом изображении.

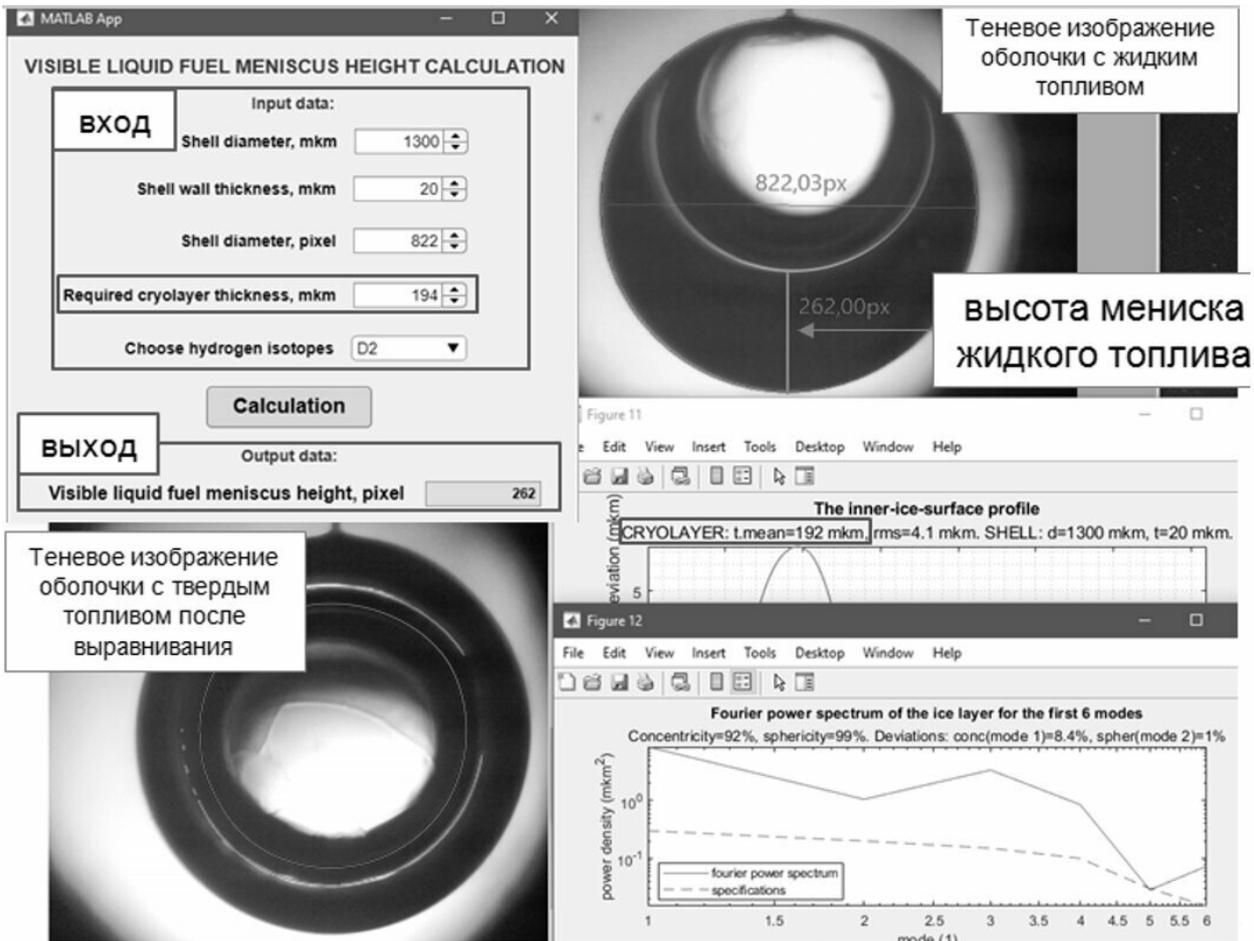


Рис. 1. Программа для контроля количества напускаемых жидких изотопов водорода

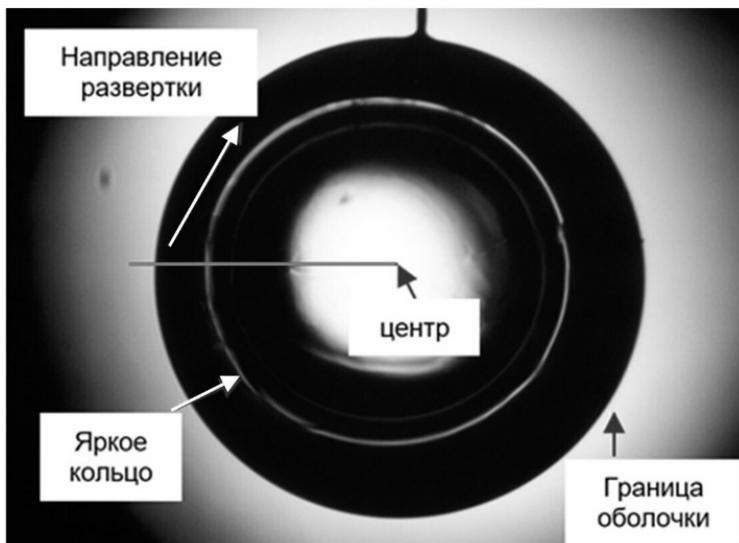


Рис. 2. Теневое изображение криогенной мишени

На следующем этапе проводится идентификация яркого кольца, как показано на рис. 4. В цикле для каждого столбца изображения на установленном вертикальном интервале с отрицательным шагом по вертикали находятся первые пиксели со значением «1» и их вертикальные координаты записываются в матрицу, эти пиксели принадлежат внешнему краю яркого кольца. Затем записанные

координаты нормируются на полярный радиус оболочки. Выполняется фильтрация выпадающих точек, полученных из-за дефектов изображения, разрывов в ярком кольце и т. д. Далее проводится идентификация внутреннего края яркого кольца, координаты внутреннего края нормируются на радиус оболочки. После этого находится среднее значение координаты яркого кольца для каждого столбца развернутого изображения отдельно. Идентифицированный набор координат, описывающий яркое кольцо, показан на рис. 4. Для устранения данных осцилляций, связанных с разрывами в границах яркого кольца, проводится аппроксимация координат яркого кольца и финальный набор координат, нанесенный на развернутое изображение, записывается в pdf-файл с результатами диагностики.

На последнем этапе для каждого значения яркого кольца находится значение толщины криослоя из зависимости, полученной при построении теоретической модели прохождения света через оболочку с топливом. Далее вычисляется среднее значение толщины криослоя и строится профиль внутренней поверхности криослоя (отклонение локальной толщины от средней) в плоскости локализации изображения, вычисляется спектр мощности Фурье до моды 6 (мода 1 – концентричность внешней сферической поверхности оболочки и внутренней поверхности криослоя, мода 2 – эллиптичность [12, 13]). Результат представлен на рис. 5. Для теневого изображения криогенной мишени, представленного на рис. 2, средняя толщина криослоя составляет 201 мкм; параметры внутренней поверхности криослоя: среднеквадратичная шероховатость 23 мкм, отклонение от концентричности 4 %, отклонение от сферичности 2 %.

Информация о профиле, спектре мощности Фурье, концентричности, сферичности и шероховатости внутренней поверхности криослоя, средней толщине криослоя, параметрах оболочки записывается в файл. Спектр мощности нужен для моделирования процесса имплозии мишени в эксперименте по зажиганию.

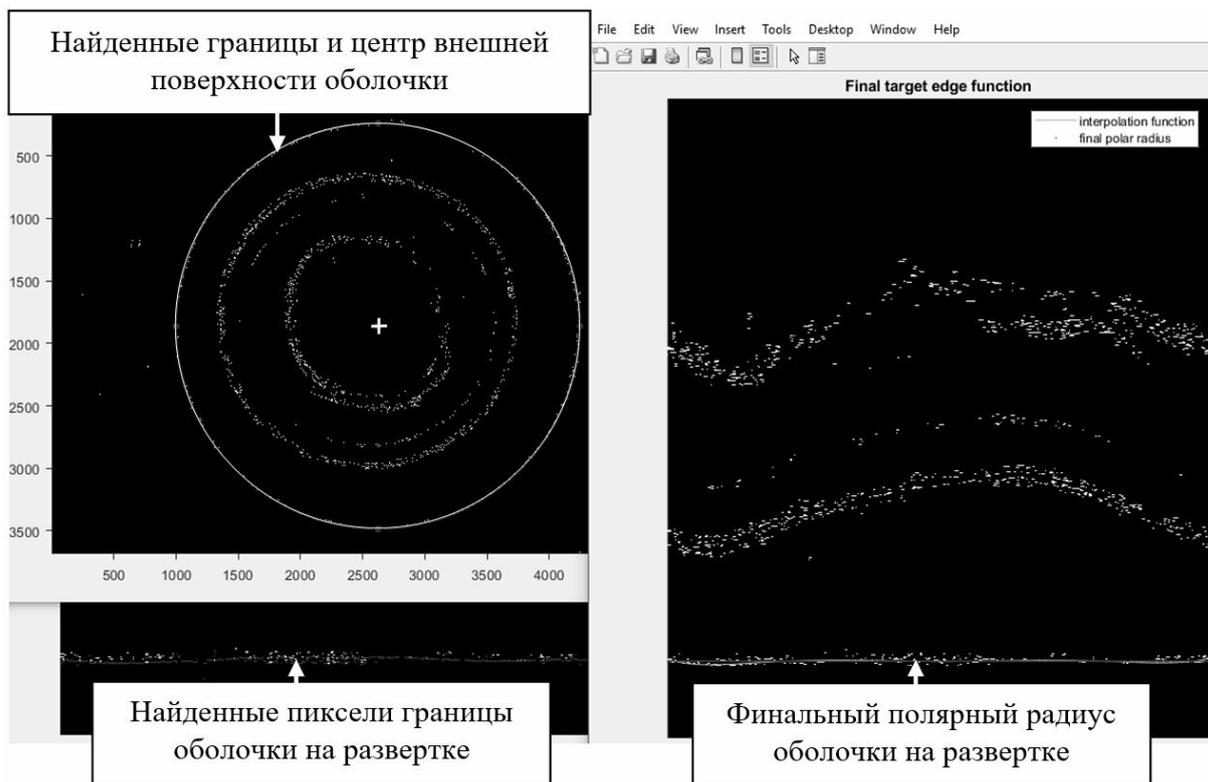


Рис. 3. Идентификация внешнего края оболочки

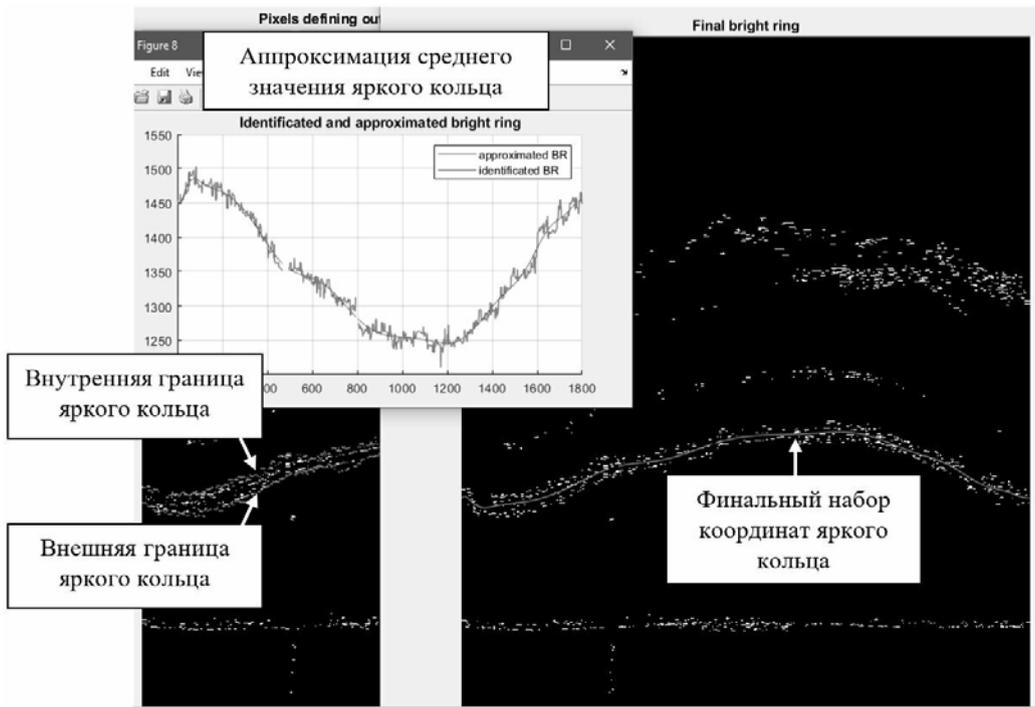


Рис. 4. Идентификация яркого кольца на развернутом изображении

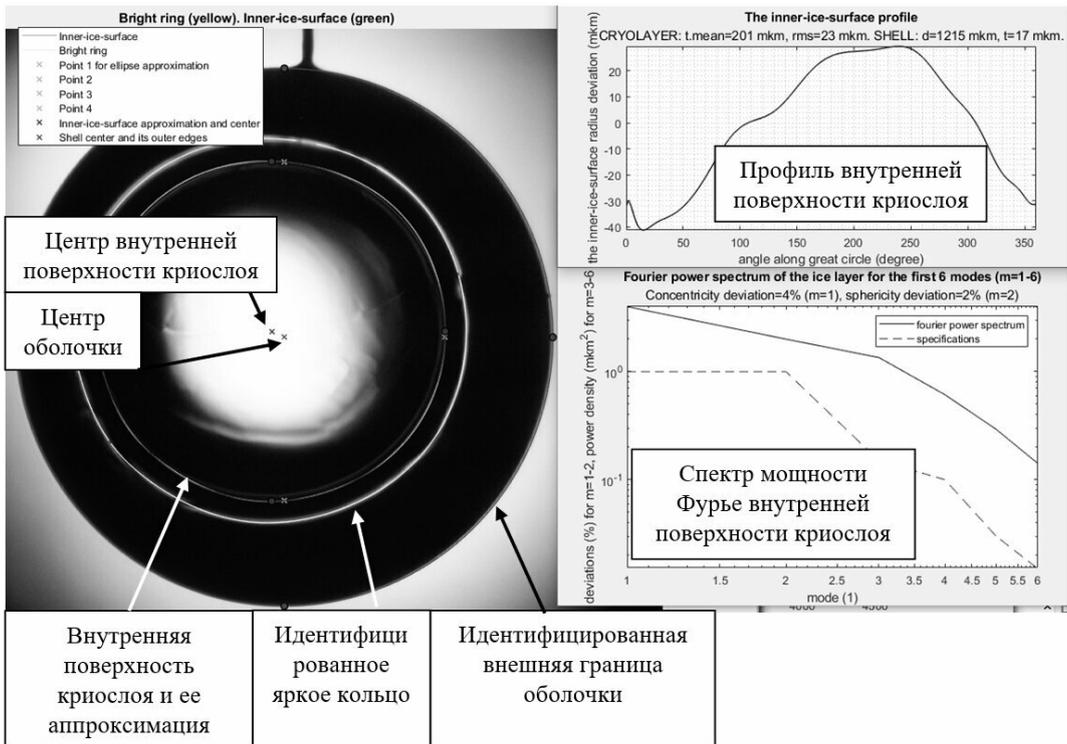


Рис. 5. Выходные данные программы

### Программа моделирования рентгеновского изображения криогенной мишени

Построена теоретическая модель прохождения параллельного пучка рентгеновского излучения через криогенную мишень. Разработана программа, в которой по заданным параметрам (диаметр и толщина стенки оболочки, толщина твердого слоя изотопов водорода, расстояние от крио-

мишени до детектора, материалы оболочки и топлива) моделируется рентгеновское изображение методом трассировки лучей. На рис. 6 представлено смоделированное рентгеновское изображение криомишени с входными параметрами, взятыми из работы [14]: диаметр бериллиевой оболочки 1077 мкм, толщина стенки оболочки 105 мкм, толщина криослоя DT-топлива 150 мкм, расстояние от криомишени до детектора 490 мм. Положение и ширина характеристических темных колец на смоделированном изображении согласуются с положением и шириной темных зон на расчетном профиле интенсивности, представленном в работе [14], подтверждая теоретическую модель.

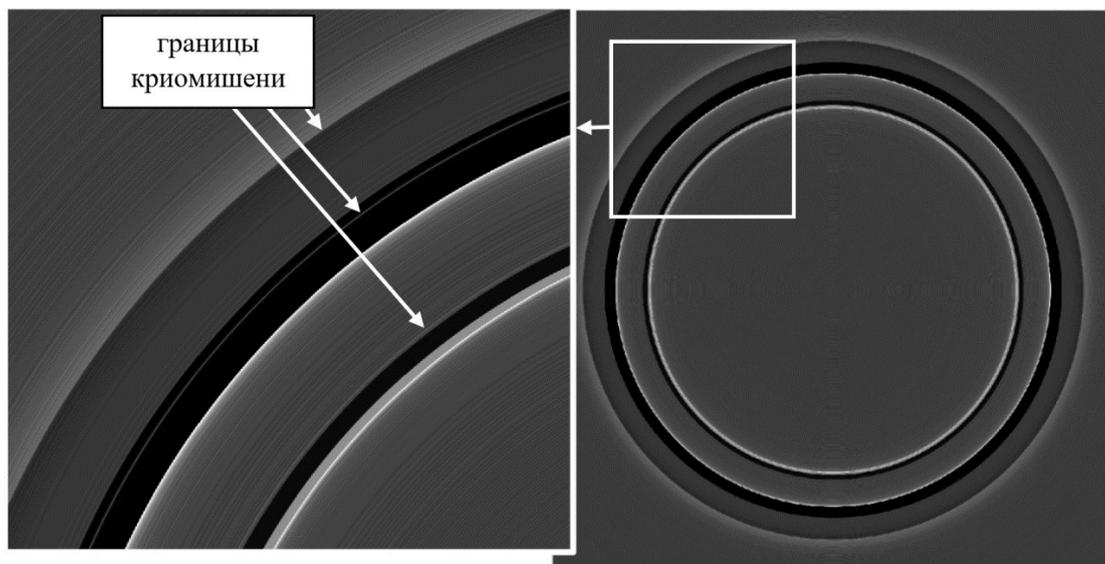


Рис. 6. Смоделированное рентгеновское изображение криомишени

В работах, проводимых на различных лазерных установках, до сих пор активно развиваются все методы диагностики криослоя, исследуются границы применимости методов. В эксперименте по зажиганию криомишени на NIF будет только рентгеновская диагностика по трем взаимно перпендикулярным осям, но такая диагностика не дает полную информацию о поверхности DT-слоя [4]. С помощью трех осей может быть определено не более одной канавки, при этом для достоверного определения канавки должны быть минимум 200 мкм в средней плоскости, примерно 2000 мкм длиной, ориентированы под углом менее  $45^\circ$  к оси наблюдения. Но все же рентгеновский метод обеспечивает более количественные измерения шероховатости, чем оптический. Рентгеновский метод дает возможность наблюдать только канавки, которые появляются возле края мишени, и можно количественно характеризовать только площадь поперечного сечения канавки, если она пересекает сегмент возле края мишени, при этом рентгеновская диагностика будет пропускать много канавок [15]. Стандартный теневой метод, основанный на зависимости между ярким кольцом и поверхностью льда при фокусировке на экваторе оболочки, может быть применен с приемлемой точностью только для усредненного положения двух ярких колец, полученных для одной плоскости наблюдения, при угле  $180^\circ$  между оптическими осями [7]. Корректны будут только самые низкие моды: до шестой. Дефект яркого кольца может напрямую коррелировать с дефектом внешней поверхности капсулы, что затрудняет диагностику криослоя.

Максимально полную диагностику параметров криослоя обеспечивает комбинация трех методов: теневой метод подходит для характеристики начального механизма образования кристалла и его ориентации (если это единичный кристалл), формирования и развития границ кристаллов, перемещения жидких изотопов водорода в процессе выравнивания; рентгеновский метод — для вычисления шероховатости низких и высоких мод; интерферометрический метод — для детального наблюдения локальных дефектов, изучения морфологии поверхности пар-лед [4]. Для оценки объема канавки используются глубина и ширина из рентгеновского изображения и длина из оптического изображения, это вероятностный подход.

## Заключение

Разработаны и введены в эксплуатацию три программы: программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов для получения твердого криогенного слоя заданной толщины, программа для контроля параметров твердого криогенного слоя в плоскости локализации изображения (профиль, спектр мощности Фурье, concentricity, сферичность и шероховатость внутренней поверхности криослоя, средняя толщина криослоя), программа моделирования рентгеновского изображения криомишени методом трассировки лучей. Работа по разработке методов контроля параметров твердого криогенного слоя продолжается. Проведены патентные исследования по данной теме. Анализ информационных источников показал, что впереди предстоит большой объем работы по разработке методов диагностики топлива в криомишени, поскольку в ведущих лабораториях мира до сих пор проводится активная работа по развитию методов диагностики, исследованию границ их применимости, усовершенствованию сложных алгоритмов анализа изображений и т. д.

## Список литературы

1. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S., et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // *PHYSICS OF PLASMAS* 14, 058101, 2007.
2. Tianliang Yan, et al. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology* 134 (2021) 106595.
3. Koresheva E. R., Nikitenko A. I., Aleksandrova I. V. Possible approaches to fast quality control of IFE targets // *Nuclear Fusion*, September 2006. C. 891.
4. Koziowski B. J., Mapoles E. R., Sater J. D., et al. Deuterium-Tritium Fuel Layer Formation for the National Ignition Facility // *Fusion Science and Technology*, 59:1, 14–25, 2011.
5. Haan S. W., et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // *PHYSICS OF PLASMAS* 18, 051001 (2011).
6. Зарубина Е. Ю., Соломатина Е. Ю. и др. Диагностика криослоя изотопов водорода в сферической оболочке по теневым изображениям. // *Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии. Труды международной конференции «XX Харитоновские тематические научные чтения»: сборник докладов.* – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – 531 с., ил. С. 114.
7. Three-Dimensional Characterization of Spherical Cryogenic Targets Using Ray-Trace Analysis of Multiple Shadowgraph Views // *LLE Review*, Volume 109. C. 4.
8. Harding D. R., Wittman M. D. & Edgell D. H. Considerations and Requirements for Providing Cryogenic Targets for Direct-Drive Inertial Fusion Implosions at the National Ignition Facility // *Fusion Science and Technology*, 63:2, 95-105, 2013.
9. Wittman M. D., Bredesen D. Modeling for Direct Drive Fusion Implosions: Cryogenic Target Filling at Arbitrary Viewing Angles and Yield Prediction // SimonNarang, SutherlandHighSchool, Pittsford, NewYork, November 2019.
10. Souers P. C. Hydrogen properties for fusion energy. 1986.
11. Three-dimensional characterization of cryogenic target ice layers using multiple shadowgraph views // *LLE Review*, Volume 104.
12. Three-Dimensional Characterization of Spherical Cryogenic Targets Using Ray-Trace Analysis of Multiple Shadowgraph Views // *LLE Review*, Volume 109. C. 4.
13. Lamy F., Voisin Y. Fusion Science and Technology, A Model to Characterize the D-T Layer of ICF Targets by Backlit Optical Shadowgraphy // *Fusion Science and Technology*, 2005.
14. Bernard Koziowski. Determining correct location of interfaces in x-ray images // UCRL-TR-207165, October 12, 2004. C. 4.
15. Koch J. A., Koziowski B. J., Salmonson J., et al. Optical and X-ray Characterization of Groove Profiles in DT Ice Layers // *Target Fabrication Conference*, 2008.