

## ДИАГНОСТИКА КРИОСЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ПО ТЕНЕВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

### DIAGNOSTICS OF HYDROGEN ISOTOPES CRYOLAYER IN SPHERICAL CAPSULE ACCORDING TO SHADOW IMAGES

*Е. Ю. Зарубина, Е. Ю. Соломатина, В. М. Изгородин, Е. И. Осетров, А. П. Пепеляев*

*E. Y. Zarubina, E. Y. Solomatina, V. M. Izgorodin, E. I. Osetrov, A. P. Pepelyaev*

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

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В настоящей работе представлены результаты разработки оптического теневого метода контроля геометрических параметров мишеней, необходимых для исследований лазерного термоядерного синтеза на установке мегаджоульного уровня энергии. Созданы средства диагностики криогенного топлива внутри сферических оптически прозрачных оболочек по их теневому изображению. Разработанный метод анализа изображения позволяет до начала процесса отвердевания определять ожидаемую толщину криослоя на внутренней поверхности оболочки после выравнивания в твердой фазе.

Optical shadow methods of geometrical parameters diagnostics of the targets necessary for laser thermonuclear fusion researches on a facility of megajoule level of energy are developed. Also technique of diagnostics of cryogenic fuel in a spherical visually transparent capsule according to the shadow image is created. The developed image analysis method prior to cryolayer hardening process allow to predict cryolayer thickness value after alignment on an internal surface of the capsule in a solid phase.

В настоящее время в отделении ИЛФИ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется работа по созданию новой лазерной установки мегаджоульного уровня энергии. На этой установке предполагается проводить эксперименты по сжатию термоядерной мишени вблизи порога ее зажигания с целью достижения энергии выхода термоядерной реакции синтеза на уровне энергии, вложенной в лазерный импульс. Для демонстрации зажигания предложена модель мишени со сферическим боксом-конвертором [1], в центре которого размещена сферическая капсула с дейтерий-тритиевым топливом внутри в виде сферического однородного по толщине твердого слоя. Это криогенная мишень непрямого облучения. Создание такой мишени, ее аттестация и постановка в лазерный эксперимент является достаточно сложной задачей [2]. В данной работе приведены результаты разработки средств диагностики криогенного топлива внутри оболочек по теневому изображению.

Стенд для исследования мишеней при низких температурах состоит из исследовательского оптического криостата, системы откачки газовых магистралей, систем напуска гелия и изотопов водорода, оборудования для измерения и кон-

троля температуры, экспериментального бокс-конвертора и оптической системы визуального контроля. Оптическая схема наблюдения показана на рис. 1.

Квазипараллельный пучок света от оптоволоконного источника направленного освещения проходит через отверстие в экспериментальном боксе, падает на сферическую оболочку (капсулу). Частично отражаясь и преломляясь на границах оболочки и криогенного топлива, свет выходит через следующее отверстие в боксе, попадает в объектив микроскопа, который перестраивает изображение капсулы на матрицу цифровой камеры, образуя теневую картину. Изображение регистрируется камерой с размером пикселя  $3,4 \text{ мкм} \times 3,4 \text{ мкм}$  и максимальным размером кадра  $2576 \text{ пикселя} \times 1932 \text{ пикселя}$  и передается на ПК. Наблюдение оболочки с криотопливом, размещенной в центре бокса, ограничивается апертурой используемого объектива  $3X$ , которая равна  $0,14$  (апертура окон бокса равна  $0,2$ , апертура окон криостата –  $0,25$ ). Применить объектив с большей числовой апертурой нельзя из-за ограниченного рабочего расстояния при наблюдениях через окна оптического криостата.

Измерение толщины криослоя по тенево-му изображению основано на определении положения яркого кольца относительно края оболочки. Пусть «группа лучей» – лучи из падающего параллельного пучка, испытывающие одинаковые отражения и преломления. Было проведено исследование

вклада различных групп лучей в тенево-е изображение в приближении, что оболочка идеально сферическая, однородная по толщине, а криослой имеет сферическую внутреннюю поверхность. На рис. 2 показаны важные группы лучей, образующие тенево-е изображение.

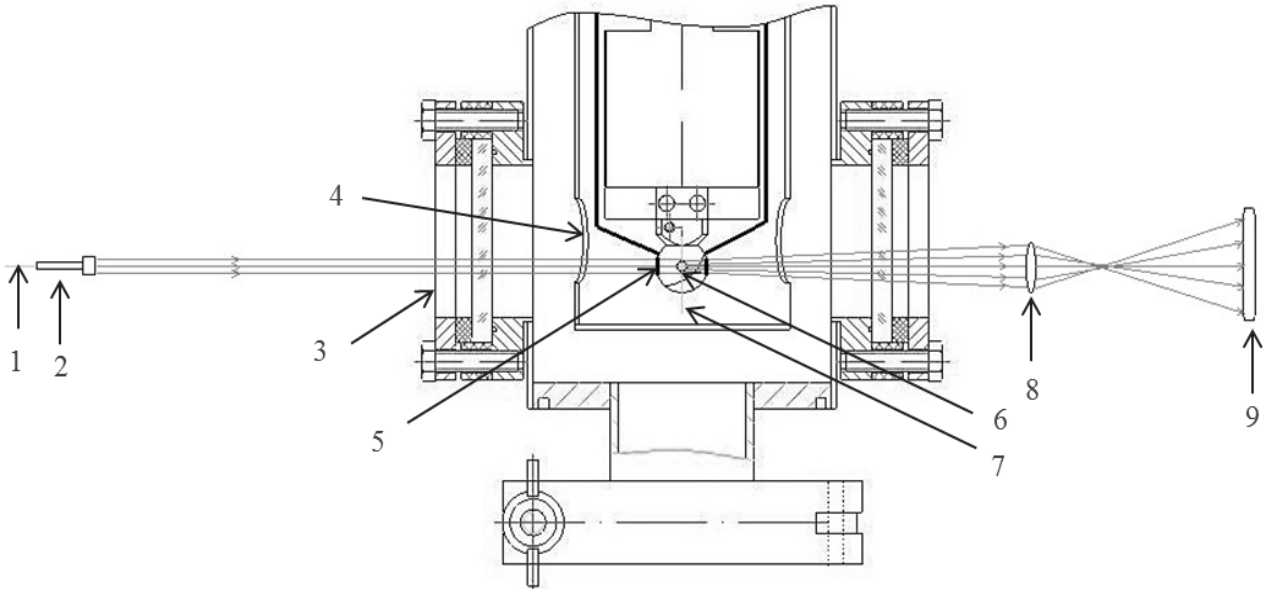


Рис. 1. Оптическая схема наблюдения: 1 – ось наблюдения, 2 – оптоволоконный источник направленного освещения с собирающей линзой, 3 – окна криостата, 4 – окна криогенного экрана, 5 – окна экспериментального бокса, 6 – сферическая оболочка, 7 – плоскость локализации изображения, 8 – объектив, 9 – камера

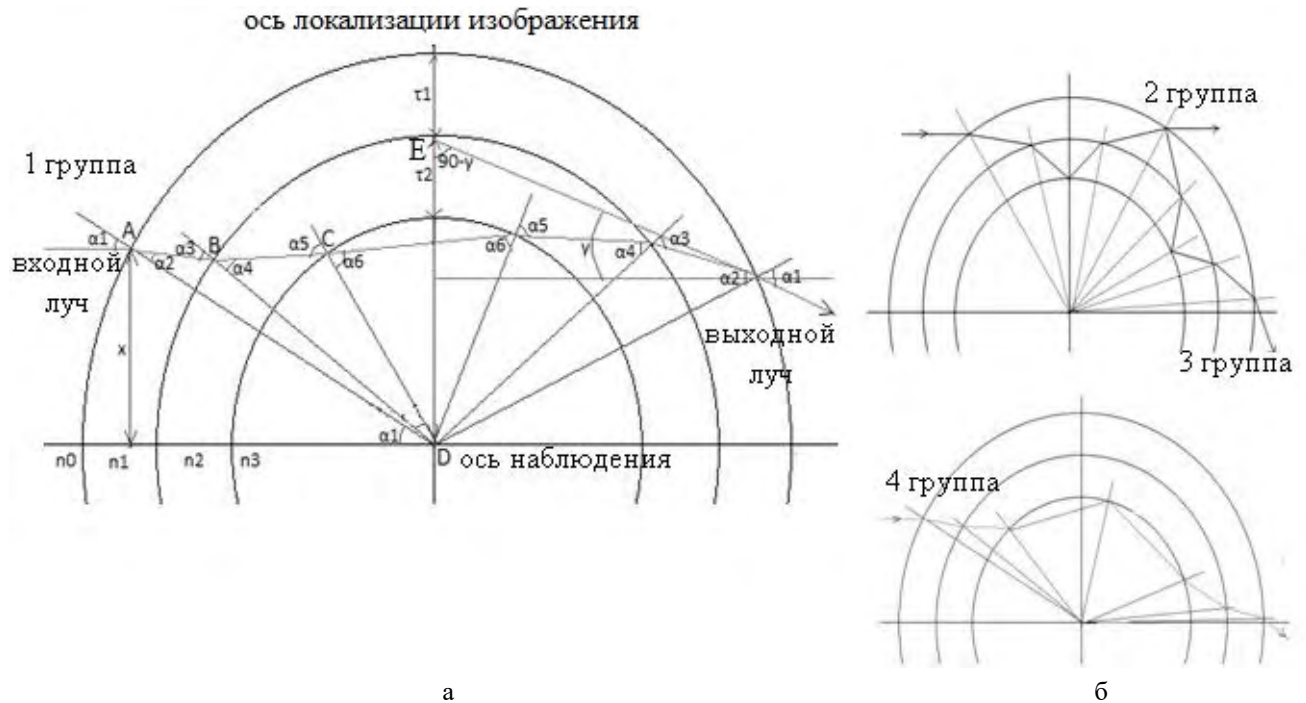


Рис. 2. Ход лучей разных групп через идеальную сферическую двухслойную оболочку: а – ход луча основной группы, образующей изображение, б – ход лучей, образующих различные по яркости кольца.  $\tau_1$  – толщина оболочки,  $\tau_2$  – толщина твердого криослоя,  $x$  – расстояние между осью наблюдения и входным лучом;  $DE$  – высота, на которой находится пересечение оси изображения и продолжения выходного луча;  $\gamma$  – угол наклона выходного луча относительно оси наблюдения;  $\alpha_1$ – $\alpha_6$  – углы падения и преломления,  $n_0$ – $n_3$  – показатели преломления сред

Здесь схематично изображены: 1-я группа лучей – основная, образующая теневое изображение; 2-я группа лучей с одним отражением от внутренней поверхности криослоя образует яркое кольцо; от 3-й и 4-й групп лучей на изображении получаются внутренние кольца с меньшей яркостью. Могут быть еще значительно менее яркие кольца, образованные другими группами лучей.

На рис. 2, а показан ход группы лучей, падающей параллельно оси наблюдения, на двухслойную идеальную (однородную по толщине) сферическую оболочку с идеальным по толщине криослоем. Ход луча рассматривается в плоскости, однозначно определяемой направлением входного луча и центром оболочек. В этом случае трехмерная задача построения теневого изображения сводится к двумерному решению. Объектив фокусируется на экватор оболочек (на рис. 2, а – ось локализации изображения), поэтому задача состоит в определении интенсивности выходного луча в зависимости от координаты точки пересечения выходного луча с осью изображения. Для угла  $\gamma$  должно выполняться условие «попадания в объектив»:  $|\gamma| < \gamma_0$ , где  $\gamma_0$  – числовая апертура объектива. Ход преломленного и отраженного от каждой из границ лучей можно рассчитать на основании закона Снеллиуса по формуле (1):

$$n_1 \times \sin(\alpha_1) = n_2 \times \sin(\alpha_2) \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления первой и второй среды, а  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы падения и преломления на границе сред. Интенсивность отраженного  $I_r$  и прошедшего  $T_r$  через границу раздела лучей вычисляется по формулам Френеля (2), (3).

$$I_r = \frac{1}{2} \times \left[ \left( \frac{\operatorname{tg}(\alpha_1 - \alpha_2)}{\operatorname{tg}(\alpha_1 + \alpha_2)} \right)^2 + \left( \frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right)^2 \right] \times I_i \quad (2)$$

$$T_r = I_i - I_r \quad (3)$$

где  $I_i$  – интенсивность падающего луча [3]. Поглощением в среде можно пренебречь.

При расчетах используется метод «трассировки», т. е. путь каждого луча прослеживается от входа во внешнюю границу оболочек и до выхода из нее, с учетом попадания в апертуру. Решение задачи построения теневой картины заключается в том, чтобы получить значение интенсивности света выходящего луча в зависимости от положения точки его пересечения с плоскостью наблюдения (плоскость, проходящая через ось симметрии перпендикулярно оси наблюдения).

На рис. 3 показан график зависимости нормированного радиуса яркого кольца от нормированной однородной толщины криогенного слоя, по-

лученный с помощью моделирования интенсивности на оси изображения. Зависимость построена для трех значений нормированного внутреннего радиуса  $R_1$  оболочки: 0,93, 0,96, 0,99. По теневому изображению криомишени легко определяется нормированный радиус яркого кольца, а по этому радиусу с помощью графика на рис. 3 находится толщина криогенного слоя, если известна толщина полистирольной оболочки-капсулы (она должна измеряться с высокой точностью с помощью широкоапертурного микроскопа или интерферометрическим методом до начала сборки криомишени). Данный график хорошо согласуется с полученным ФИАН [4].

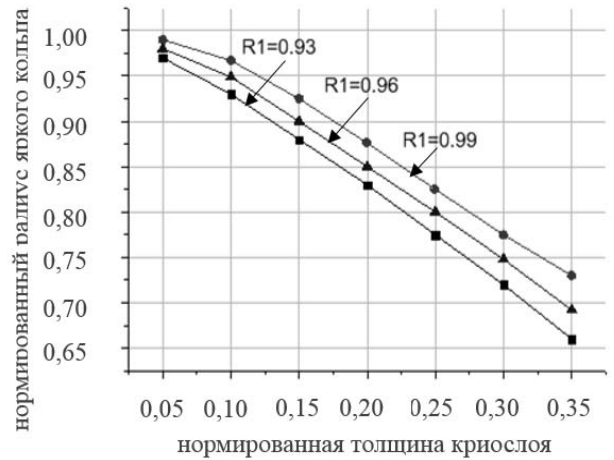


Рис. 3. Зависимость нормированного радиуса яркого кольца от нормированной толщины твердого криогенного слоя

На рис. 4, а представлено изображение (в логарифмической шкале для повышения видимости слабых колец) сферической оболочек с однородным по толщине криослоем, полученное в эксперименте по выравниванию криослоя американскими исследователями.

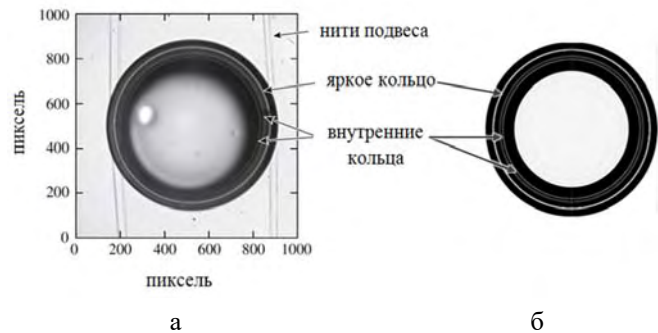


Рис. 4. Теневое изображение центрально-симметричной оболочки с твердым криослоем: а – экспериментальное, б – расчетное (в логарифмической шкале)

Параметры этой оболочки с твердым криослоем использовались для сравнения расчетов с экспериментальными данными: радиус 438 мкм, толщина полистирольного слоя 4,2 мкм, толщина криогенного слоя ДТ примерно 79 мкм. Следовательно,  $\tau_1 = 0,0097$ ,  $\tau_2 = 0,18$ ; расчеты проведены при апертурном угле 0,11.

Разработана программа «The form of cryolayer» (в среде программирования Microsoft Visual Studio на языке Visual C#), в которой по входным параметрам (показатели преломления оболочки и криослоя, толщина стенки оболочки, радиус яркого кольца) моделируется теневое изображение мишени. Результат моделирования теневого изображения 4, а в программе показан на рис. 4, б. Наличие и положения видимых колец в логарифмической шкале, расчетные и экспериментальные, хорошо согласуются. Расчетный нормированный радиус яркого кольца 0,909, экспериментальный нормированный – от 0,906 до 0,909.

На реальных теневых изображениях криомишени границы центральной зоны и колец значительно размыты по причине того, что пучок света, которым освещают мишень, не является идеально параллельным, поэтому в построении изображения должны участвовать лучи с наклонами по оценкам не менее  $\pm 0,025$  рад. Кроме того, на размытие центральной зоны влияет дисперсия (особенно полистирола) при освещении белым светом. Например, показатель преломления полистирольной оболочки в зависимости от длины волны  $\lambda$  изменяется от  $n = 1,6245$  для  $\lambda = 0,44$  мкм до  $n = 1,5823$  для  $\lambda = 0,65$  мкм (в расчетах  $n_1 = 1,6$ ). На положение яркого кольца дисперсия влияет мало [5].

Дозирование жидкого криогенного топлива при наполнении оболочки можно выполнить при контроле теневого изображения. На рис. 5, а приведено теневое изображение тонкостенной полимерной оболочки диаметром 1,5 мм и толщиной стенки 7,5 мкм, содержащей жидкий дейтерий. Здесь отчетливо видно яркое кольцо внутри оболочки, которое хорошо аппроксимируется окружностью (рис. 5, б). На возможность такого приближения наталкивают снимки реального жидкого слоя изотопов водорода при температуре около тройной точки в прозрачных оболочках, полученные в экспериментах. Центр яркого кольца смещен по вертикали относительно центра сферической границы оболочки на величину  $\delta$ . Расположение слоев обладает симметрией относительно вертикальной оси.

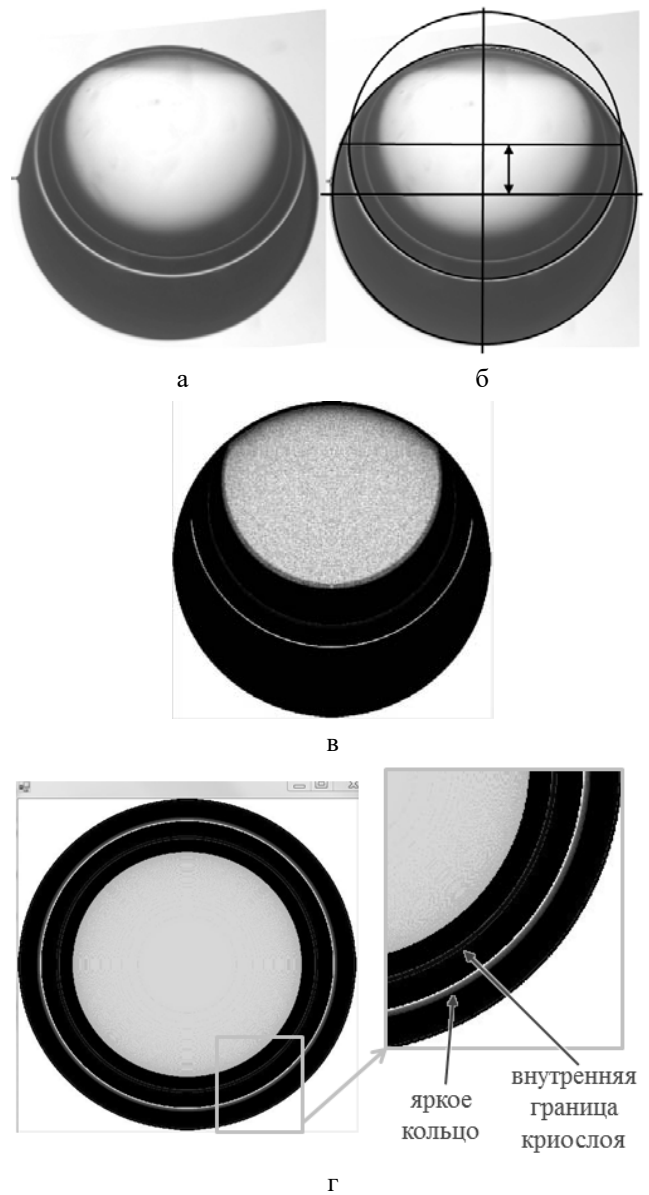


Рис. 5. а – теневое изображение полимерной оболочки с жидким  $D_2$  внутри, б – способ аппроксимации яркого кольца окружностью, в – результат моделирования теневого изображения, г – моделированное теневое изображение оболочки с криотопливом после выравнивания в твердой фазе  $\delta$  – нормированное смещение центра яркого кольца относительно центра сферической границы оболочки

В этом случае необходимо рассмотреть полную картину положения яркого кольца, а не только его положение на оси локализации изображения (как на рис. 2). Поэтому проведено полное трехмерное моделирование теневого изображения двухслойной осесимметричной мишени со сферической внутренней границей криослоя с учетом смещения центра внутренней границы криослоя по вертикали относительно центра сферической границы оболочки на величину  $\delta$ . В основе моде-

лирования лежит нахождение решения систем уравнений по пересечению луча, заданного в пространстве параметрическим уравнением прямой (4), с внешней поверхностью оболочки радиусом  $R_0$  (задана уравнением (5)), с внутренней поверхностью оболочки радиусом  $(R_0 - \tau_1)$  (уравнение (6)) и с внутренней поверхностью криослоя радиусом  $r_0$  (уравнение (7)).

$$\begin{cases} x = x_0 + a_x \times \lambda \\ y = y_0 + a_y \times \lambda \\ z = z_0 + a_z \times \lambda \end{cases} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – параметр,  $(x_0, y_0, z_0)$  – известные координаты точки, через которую проходит прямая,  $\mathbf{a}(a_x, a_y, a_z)$  – направляющий вектор прямой.

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_0^2 \quad (5)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = (R_0 - \tau_1)^2 \quad (6)$$

$$x^2 + y^2 + (z - \delta)^2 = r_0^2 \quad (7)$$

В программе «The form of cryolayer» по входным параметрам (показатели преломления оболочки и криослоя, нормированная толщина стенки оболочки, нормированные радиус и смещение центра яркого кольца относительно центра оболочки) моделируется теневое изображение оболочки с жидким криотопливом. Величины нормированы на внешний радиус оболочки. Для моделирования теневой картинке как на рис. 5, а входными параметрами будут  $\tau_1 = 0,01$ ,  $\delta = 0,333$ ,  $n_1 = 1,6$ ,  $n_2 = 1,14$ ,  $NA = 0,16$ . Результат моделирования для изображения 5, а представлен на рис. 5, в. На рис. 5, г представлено моделированное изображение той же оболочки с криотопливом после выравнивания в твердой фазе. Плотность жидкого дейтерия, используемая в программе, составляет  $0,174 \text{ г/см}^3$ , твердого –  $0,195 \text{ г/см}^3$  [6]. Ожидаемая толщина криослоя после выравнивания в твердой фазе, вычисленная в программе для данной оболочки с криотопливом, равна 140 мкм. Так можно определять количество топлива внутри оболочки до начала его замораживания.

Следует отметить, что в верхней части оболочки с топливом (изображение 5, а) наблюдается затемнение, которое объясняется градиентом температуры. Верхняя часть оболочки холоднее нижней, и на ней происходит конденсация газообразного топлива, которое стекает по стенке оболочки вниз под действием гравитации.

Правильная форма поверхности жидкости внутри оболочки (мениск) описывается с помощью решения уравнения гидростатического равновесия для осесимметричных задач с учетом нулевого угла смачивания полимерной оболочки жидкими изотопами водорода [7]. На рис. 6 пред-

ставлено рентгеновское изображение жидкого криослоя ДТ внутри оболочки большого диаметра ( $>2 \text{ мм}$ ), полученное американскими исследователями [8]. Видно, что форма мениска эллиптическая, только вблизи внутренней границы оболочки отличие формы границы от сферы заметно. Можно промоделировать с помощью программы «The form of cryolayer» видимое положение яркого кольца для оболочки, в которой жидкий криослой имеет сложную форму мениска. Эту форму можно аппроксимировать сферическими поверхностями, у которых радиус и параметр  $\delta$  зависят от вертикальной координаты. Для двухслойной системы с такой внутренней границей полученное положение яркого кольца представлено на рис. 6, б. По результатам расчетов можно сделать вывод, что яркое кольцо будет иметь форму, все-таки слабо отличающуюся от окружности, но параметры  $\delta$  для кольца и реальной внутренней границы криослоя будут различны. Эти сложности возникают при расчетах оболочек с большим количеством жидкости.

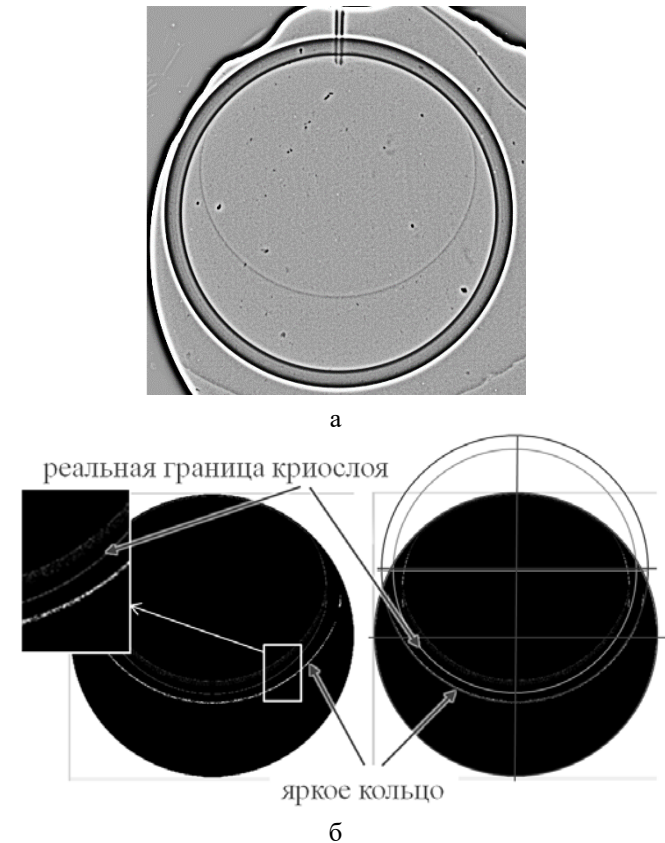


Рис. 6. а – рентгеновское изображение с фазовым контрастом жидкого слоя ДТ внутри бериллиевой, допированной медью (0,9 ат. %) сферической оболочки диаметром 2,154 мм и толщиной стенки 105 мкм; б – моделированное положение яркого кольца и внутренней границы криослоя

Программа построения теневого изображения методом «трассировки» лучей требует дальнейшего развития. В частности, необходимо промоделировать положение яркого кольца, если внутренняя граница эллипс в общем виде (со смещениями по  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), а также изучить влияние на форму яркого кольца возмущений внутренней границы сферическими модами. На данный момент имеется возможность до начала процесса отвердевания по форме жидкого криослоя определять ожидаемую толщину криослоя после выравнивания в твердой фазе.

### Список литературы

1. «Концепция построения лазерной установки...». Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. // Сборник тезисов докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 6–10 февраля 2012. С. 17.
2. Проблемы создания мишеней для экспериментов на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии. Балувев В. В., Буряк Е. В., Вихорев А. С. и др. // Сборник докладов 8 Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых

ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 2014. С. 8.

3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: «Наука», 1973. С. 55–63. С. 238.

4. Koresheva E. R. Possible approaches to fast quality control of IFE targets. Article in Nuclear Fusion, September, 2006. С. 172.

5. Creation of a diagnostic complex for the characterization of cryogenic laser-fusion targets using the tomography method with probing irradiation in the visible spectrum. Koresheva E. R., Osipov I. E., Aleksandrova I. V. et al. Journal of Russian Laser Research, Volume 28, Number 2, 2007. С. 176–182.

6. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. Малкова М. П. – М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 99.

7. Izgorodin V. M., Solomatina E. Y., Pepelyaev A. P., Osetrov E. I., Rogozhina M. A. The form of the free surface of hydrogen isotopes in the spherical shell / Journal of Physics: Conference Series 747 (2016) 012008 / II Conference on Plasma & Laser Research and Technologies / IOP Publishing.

8. X-ray imaging of cryogenic deuterium-tritium layers in a beryllium shell. Kozioziemski B. J., Sater J. D., Moody J. D. et al. June 13, 2005, Journal of Applied Physics UCRL-JRNL-212893. С. 2