

# ОПТИЧЕСКИЙ ТЕНЕВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ТОПЛИВА В ОБОЛОЧКЕ-КАПСУЛЕ

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

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время во 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, 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 [1]. В данной работе приведены промежуточные результаты разработки средств диагностики криогенного топлива внутри оболочек по теневому изображению.

Построены две взаимно ортогональные оптические схемы (№ 1 и № 2) для получения качественного изображения, позволяющего определять четкий контур полистирольной оболочки и границы жидкого и твердого топлива в двух взаимно ортогональных плоскостях. Принципиальная схема наблюдения показана на рис. 1.

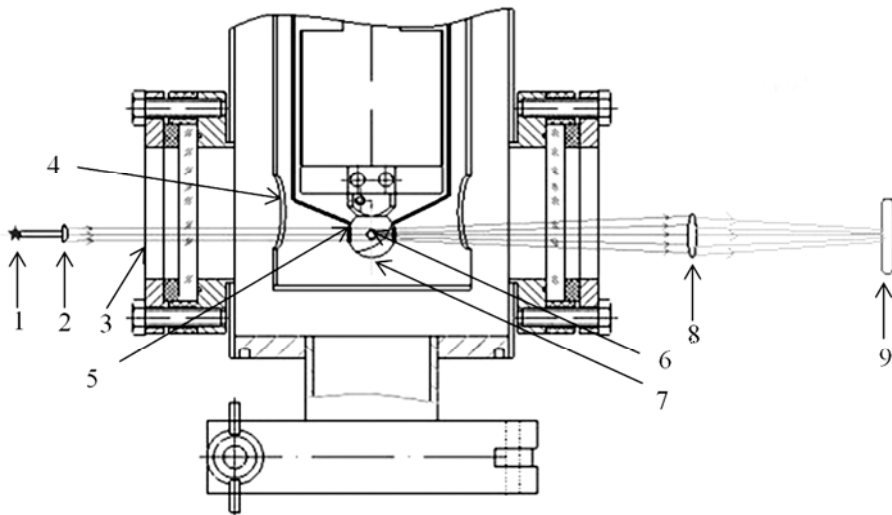


Рис. 1. Схема наблюдения оболочки с криотопливом: 1 – ось наблюдения, 2 – оптоволоконный источник направленного освещения с собирающей линзой, 3 – окна криостата толщиной 4 мм, 4 – окна криогенного экрана, 5 – окна экспериментального бокса диаметром 2,5 мм, 6 – сферическая оболочка диаметром ~2 мм, 7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

Оптическая схема № 1 включает в себя объектив с увеличением 3X (числовая апертура 0,14, рабочее расстояние 75 мм), камеру с размером пикселя 3,4×3,4 мкм и максимальным размером кадра 2576 пикселя ×1932 пикселя. В качестве подсветки используется квазипараллельный пучок света. Наблюдение и освещение оболочки осуществляется через окна экспериментального бокса диаметром 2,5 мм.

В оптическую схему № 2 входят объективы с увеличением 5X (числовая апертура 0,16, рабочее расстояние 64 мм) или 1X (числовая апертура 0,13, рабочее расстояние 90 мм), камера с разме-

ром пикселя  $7,5 \times 7,5$  мкм и максимальным размером кадра  $1280$  пикселя  $\times 1024$  пикселя. Наблюдение осуществляется через окно экспериментального бокса диаметром  $2,5$  мм, освещение – через окно диаметром  $4$  мм.

Измерение параметров (толщины, разнотолщинности и локальной толщины) криослоя основано на определении положения характеристического «яркого кольца» относительно края оболочки на теневом изображении [2]. Поэтому проведено построение теоретической модели прохождения света через оптически прозрачную оболочку-капсулу с топливом с образованием «яркого кольца» на теневом изображении, выполнена экспериментальная проверка модели.

### Первое приближение. Прямое моделирование теневого изображения сферической оболочки с криослоем нулевой разнотолщинности. Обратный алгоритм

В данном приближении считается, что локально внутренняя поверхность криослоя и яркое кольцо имеют сферическую форму, с определенным шагом по углу  $\varphi$  измеряется локальный радиус яркого кольца и ему в соответствие ставится локальный внутренний радиус криослоя (или его локальная толщина). Это обратный алгоритм определения параметров криослоя по теневому изображению.

Было проведено исследование вклада различных групп лучей в теневое изображение в приближении, что оболочка и криослой идеально сферические, однородные по толщине (прямое моделирование).

На рис. 2 показаны важные группы лучей, образующие теневое изображение. Для удобства расчетов все величины нормируются на радиус внешней оболочки в [мкм]. Здесь схематично изображены: 1-я группа лучей – основная, образующая теневое изображение; 2-я группа лучей с одним полным внутренним отражением от внутренней поверхности криослоя образует яркое кольцо; от 3-й и 4-й групп лучей на изображении получаются внутренние кольца с меньшей яркостью.

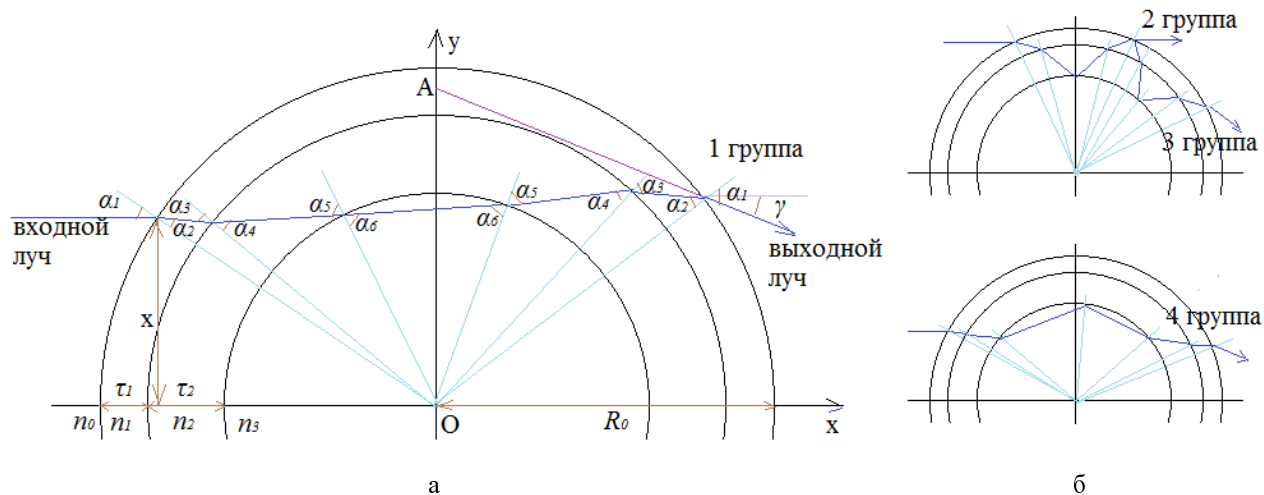


Рис. 2. Ход лучей разных групп через идеальную сферическую двухслойную оболочку: а – ход луча основной группы, образующей изображение, б – ход лучей, образующих различные по яркости кольца;  $\tau_1$  – толщина оболочки,  $\tau_2$  – толщина твердого криослоя,  $R_0$  – радиус оболочки,  $x$  – расстояние между осью наблюдения и входным лучом;  $OA$  – 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;  $Oy$  – ось локализации изображения;  $Ox$  – ось наблюдения

На рис. 2, а показан ход основной группы лучей, падающей параллельно оси наблюдения, на двухслойную идеальную (однородную по толщине) сферическую оболочку с идеальным по толщине

не 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 оболочки (на рис. 2,  $a$  – ось  $Oy$  – локализации изображения), поэтому задача состоит в определении интенсивности выходного луча в зависимости от координаты точки пересечения выходного луча с осью изображения. 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. Поглощением в среде можно пренебречь.

При расчетах используется метод «трассировки», т. е. путь каждого луча прослеживается от входа во внешнюю границу оболочки и до выхода из нее, с учетом попадания в угловую апертуру. В основе моделирования 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  $(R_0 - \tau_1 - \tau_2)$  (уравнение (7)).

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

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.

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

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

$$x^2 + y^2 = (R_0 - \tau_1 - \tau_2)^2 \quad (7)$$

Получены зависимости нормированного радиуса яркого кольца от нормированной однородной толщины криогенного слоя (для различных значений нормированной толщины оболочки). На рис. 3 приведены зависимости для нескольких значений нормированной толщины оболочки. По теневого 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.

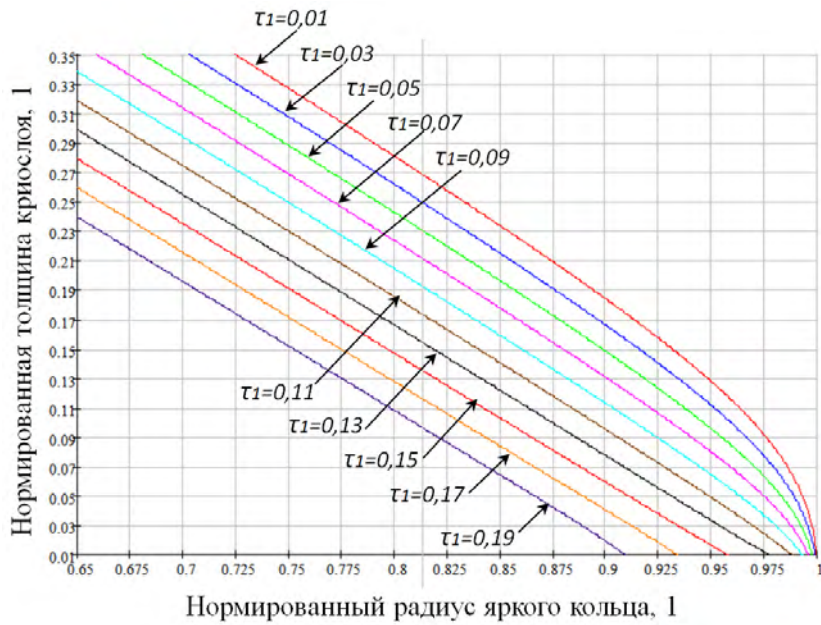


Рис. 3. Зависимости нормированного радиуса яркого кольца от нормированной толщины криослоя:  
 $\tau_1$  – нормированная толщина оболочки

На рис. 4, а представлено изображение (в логарифмической шкале для повышения видимости слабых колец) сферической оболочки с однородным по толщине криослоем, полученное в эксперименте по выравниванию криослоя на установке OMEGA [3]. 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. Расчетный нормированный радиус яркого кольца равен 0,905, экспериментальный нормированный –  $(0,91 \pm 0,05)$ . Таким образом, выполнена экспериментальная проверка теоретической модели.



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

### Второе приближение. Прямое трехмерное моделирование положения и формы яркого кольца на теневом изображении для криослоя с ненулевой разнотолщинностью

Было проведено прямое моделирование положения и формы характеристического яркого кольца на теневом изображении в зависимости от параметров оболочки и криогенного топлива. На рис. 5 показано трехмерное моделирование прохождения такой группы лучей через сферическую

оболочку с топливом, внутренняя поверхность которого имеет форму эллипсоида. Яркое кольцо аппроксимируется эллипсом, что согласуется с реальными теневыми изображениями, получаемыми в экспериментах по выравниванию криослоя. Все величины нормированы на внешний радиус оболочки.

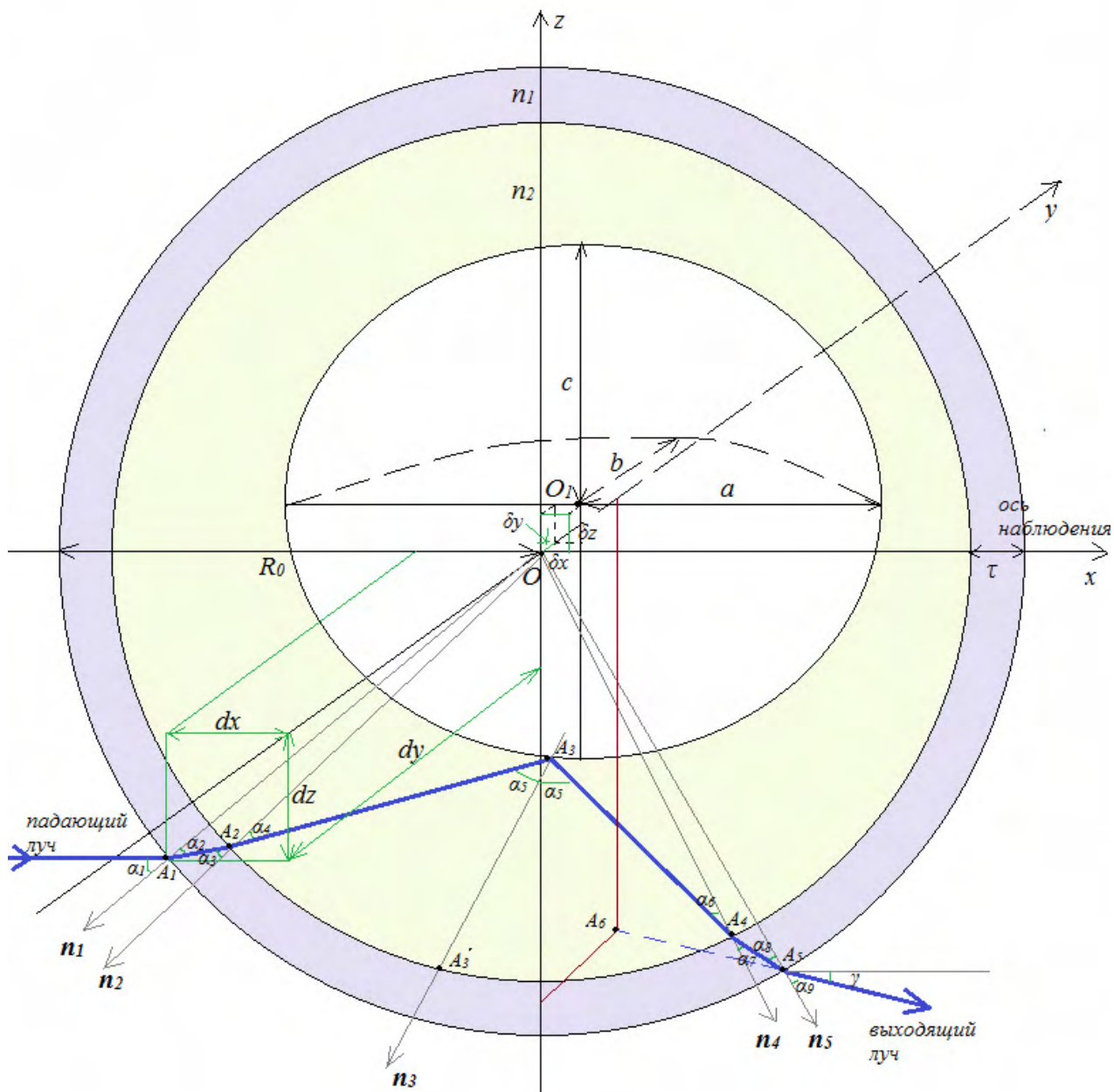


Рис. 5. Трехмерное моделирование прохождения группы лучей через сферическую оболочку с топливом, претерпевающих полное внутреннее отражение от внутренней границы криослоя:  $R_0$  – внешний радиус оболочки,  $\tau$  – толщина оболочки;  $a, b, c$  – полуоси эллипсоида внутренней поверхности криослоя;  $\delta x, \delta y, \delta z$  – смещения центра  $O_1$  внутренней поверхности криослоя относительно центра оболочки  $O$  по трем осям ( $x, y, z$  соответственно);  $\alpha_1$ – $\alpha_9$  – углы падения, преломления и отражения лучей;  $A_1$ – $A_5$  – точки пересечения группы лучей с поверхностями;  $A_6$  – точка, принадлежащая яркому кольцу;  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления полистирола и криослоя соответственно;  $n_1$ – $n_5$  – нормали к поверхностям в точках пересечения их лучом;  $dx, dy, dz$  – координаты точки пересечения падающего луча с оболочкой;  $\gamma$  – угол отклонения выходящего луча от оси наблюдения  $Ox$ ;  $ZOY$  – плоскость изображения

В основе моделирования лежит нахождение решения систем уравнений по пересечению луча, заданного в пространстве параметрическим уравнением прямой (8), с внешней поверхностью оболочки радиусом  $R_0$  (задана уравнением (9)), с внутренней поверхностью оболочки радиусом  $(R_0 - \tau)$  (уравнение (10)) и с внутренней поверхностью криослоя, задаваемой уравнением (11).

$$\begin{cases} x = x_0 + a_x \times \lambda \\ y = y_0 + a_y \times \lambda \\ z = z_0 + a_z \times \lambda \end{cases} \quad (8)$$

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.

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_0^2 \quad (9)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = (R_0 - \tau)^2 \quad (10)$$

$$\frac{(x - \delta x)^2}{a^2} + \frac{(y - \delta y)^2}{b^2} + \frac{(z - \delta z)^2}{c^2} = 1 \quad (11)$$

### Экспериментальная часть

На основании моделирования написана программа. В программе для оболочки с отвердевшим топливом, как показано на рис. 6, *а*, проведено моделирование положения и формы яркого кольца с использованием второго приближения. Исходные данные: диаметр оболочки 1820 мкм, толщина стенки  $< 10$  мкм,  $\tau = 0,01$ ,  $n_1 = 1,6$ ,  $n_2 = 1,14$ ,  $a = b = 0,701$ ,  $c = 0,661$ ,  $\delta x = 0$ ,  $\delta y = 0,018$ ,  $\delta z = 0,041$ . Экспериментально по изображению измерены параметры яркого кольца: полуоси эллипса  $a_2 = 0,804$ ,  $c_2 = 0,769$ , смещения центра  $\delta y_2 = 0,018$ ,  $\delta z_2 = 0,041$ , средняя толщина кольца  $\tau_k = 0,01$ .

В программе получены результаты, проиллюстрированные на рисунке 6, *б, в*. Теоретически рассчитываются внешняя и внутренняя граница яркого кольца. Итерациями получены следующие параметры внутренней границы яркого кольца:  $a_{1in} = 0,797$ ,  $c_{1in} = 0,767$ ,  $\delta y_{in} = 0,020$ ,  $\delta z_{in} = 0,044$ ; внешней:  $a_{1out} = 0,806$ ,  $c_{1out} = 0,779$ ,  $\delta y_{out} = 0,021$ ,  $\delta z_{out} = 0,045$ .

Получено хорошее совпадение теоретически смоделированных и экспериментально измеренных по фотографии параметров яркого кольца, что видно на рис. 6, *б*: оба кольца сливаются в одну кривую. График построен в полярной системе координат. На рис. 6, *в* приведен график толщины криослоя в [мкм], полученный с использованием второго приближения, что и является основным результатом программы (кривая под номером 2). На рис. 6, *в* также представлен график локальной толщины криослоя (кривая под номером 1), полученный в первом приближении, для того же теневого изображения. Видно, что форма кривых 1 и 2 на графике 6, *в* повторяется. Различие кривых обусловлено тем, что кривая под номером 2 – это результат моделирования, которое не учитывает локальные отклонения формы яркого кольца на теновом изображении от эллипса и, соответственно, не учитывает локальные неоднородности внутренней поверхности криослоя.

Разнотолщинность криослоя для теневого изображения 6, *а*, определенная в первом приближении, составляет  $\Delta = (17 \pm 2) \%$  при средней толщине криослоя  $(245 \pm 3)$  мкм.

Таким образом, результаты прямого трехмерного моделирования прохождения света через оболочку-капсулу с топливом ненулевой разнотолщинности подтверждают предположение о возможности применения обратного алгоритма для определения параметров криослоя, внутренняя поверхность которого локально считается сферической.

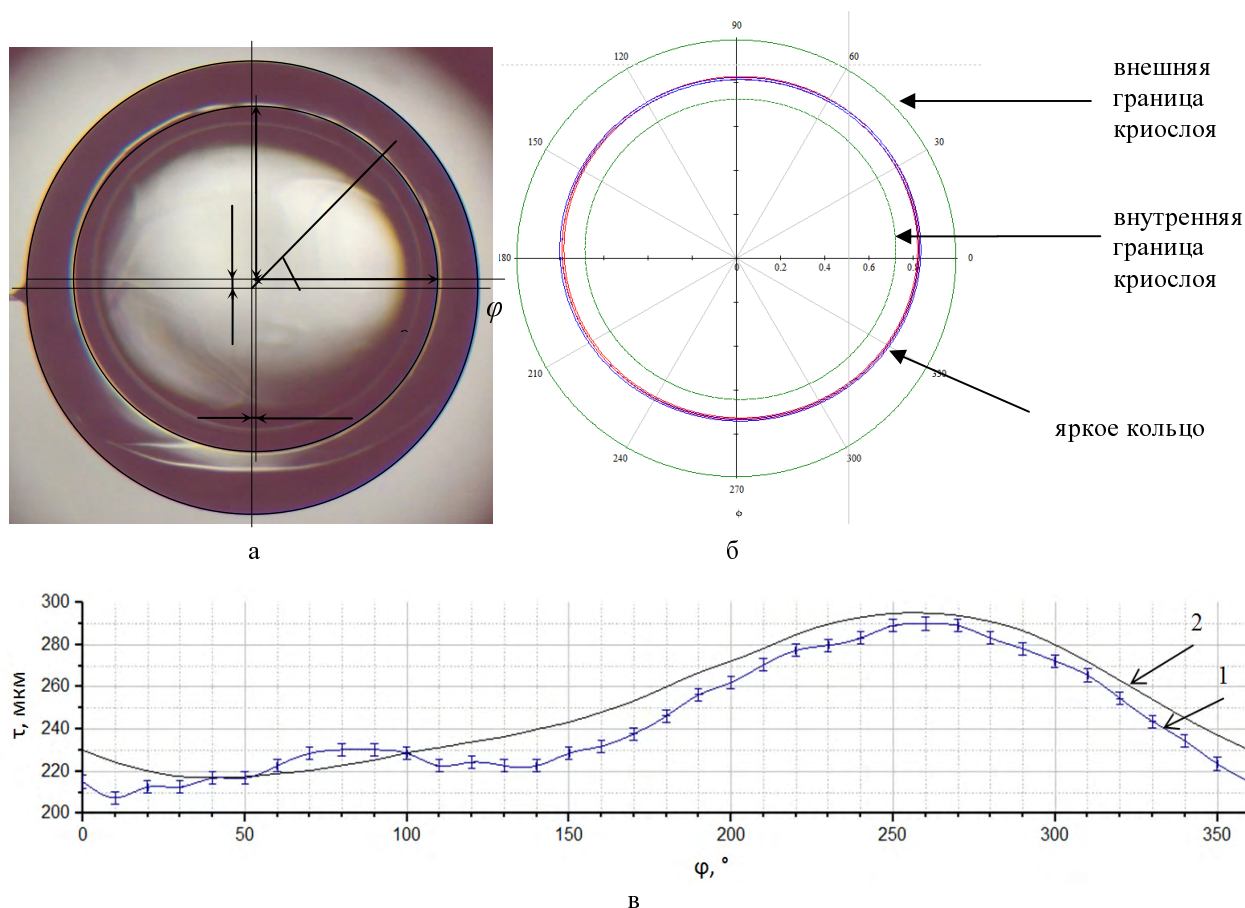


Рис. 6. а – Аппроксимация яркого кольца эллипсом и его экспериментально измеренные параметры, б – совпадение теоретически смоделированного и экспериментально измеренного яркого кольца (две кривые сливаются в одну), в полярных координатах, в – сравнение результатов, полученных в двух различных приближениях;  $\tau$  – толщина криослоя;  $\phi$  – полярный угол;  $a_2$  и  $c_2$  – полуоси эллипса яркого кольца;  $\delta y_2$  и  $\delta z_2$  – смещения центра эллипса яркого кольца относительно центра оболочки; 1 – график локальной толщины криослоя в зависимости от полярного угла (шаг по углу –  $10^\circ$ ), полученный в первом приближении; 2 – график толщины криогенного слоя, полученный во втором приближении

### Список литературы

1. Балуев В. В., Буряк Е. В., Вихорев А. С. и др. Проблемы создания мишеней для экспериментов на лазерной установке мегаджоульного уровня энергии //Сб. докл. 8 Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 2014. С. 8.
2. Cryogenic Target Handling System Operations Manual, Volume IV-CTHS Description, Chapter 8: Characterization Station (CS), Revision A – May, 2004. С. 14.
3. Three-Dimensional Characterization of Spherical Cryogenic Targets Using Ray-Trace Analysis of Multiple Shadowgraph Views, LLE Review, Vol. 109. С. 4.