

УДК 621.039.542 : 620.16

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ\*

П. С. Завьялов, В. Э. Карлин, М. С. Кравченко,  
Л. В. Финогенов, Д. Р. Хакимов

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41  
E-mail: finog@tdisie.nsc.ru*

Рассматривается усовершенствованный метод структурного освещения для повышения производительности контроля внешнего вида поверхности цилиндрических объектов. Суть метода заключается в сокращении объема регистрируемой информации благодаря формированию освещения с помощью дифракционного оптического элемента под углом к плоскости регистрации изображения, перпендикулярной контролируемой поверхности. Реализация предлагаемого метода предполагает использование нескольких идентичных измерительных каналов. Ввиду этого нами рассмотрен один канал. Приведены расчёты дифракционных элементов, описание экспериментальной установки, результаты экспериментов по определению глубины дефектов на поверхности имитаторов топливных таблеток и тепловыделяющих элементов. Реализация исследованного метода контроля внешнего вида с определением глубины дефектов в промышленных системах контроля топливных таблеток и тепловыделяющих элементов позволит повысить качество выпускаемого топлива для атомных электростанций.

*Ключевые слова:* система контроля внешнего вида, определение глубины дефектов, дифракционный оптический элемент, световое кольцо, объект цилиндрической формы.

DOI: 10.15372/AUT20170504

**Введение.** В контрольно-измерительной технике часто встречаются объекты контроля, имеющие криволинейную поверхность. Среди них наиболее распространены объекты цилиндрической формы. В данной работе рассматривается усовершенствованный метод структурного освещения [1] применительно к высокопроизводительному контролю топливных таблеток (ТТ) и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для атомных электростанций. Топливные таблетки из диоксида урана являются активными элементами тепловыделяющих сборок. Для реакторов водо-водяного типа они представляют собой керамические цилиндры диаметром  $\sim 8$  мм и высотой 9–12 мм. В процессе изготовления ТТ на поверхности могут образовываться дефекты: сколы, трещины, поры, облой, непрошлифовка. Для выявления ТТ с недопустимыми по размерам дефектами их подвергают контролю после операции шлифования. При этом критерии отбраковки соответствуют атласу допустимых отклонений формы.

Существующие автоматические системы оптико-электронного контроля внешнего вида ТТ основаны на контрастном методе выделения дефектов на изображениях [2, 3]. Данный метод напрямую позволяет определить глубину дефектов, что является некоторым отступлением от требований к визуальному контролю. Поэтому для повышения достоверности контроля ТТ необходимо получить 3D-форму дефектов. Задача обнаружения дефектов

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60414X0086).

внешнего вида (наколов, царапин, вмятин) с вычислением их размеров существует и при контроле поверхности оболочек ТВЭЛ, изготовленных из циркониевого сплава. Диаметр оболочек равен  $\sim 9$  мм, а длина 3,8–4,5 м. Однако требования к чувствительности обнаружения дефектов на оболочке ТВЭЛ более жёсткие, чем при контроле ТТ. На высокой скорости контроля ( $V \approx 200$  мм/с) необходимо обнаруживать дефекты глубиной несколько десятков микрометров. Существующие установки контроля оболочек используют токовихревой метод обнаружения дефектов, который позволяет выявлять их наличие, но обмер дефектов осуществляется на отдельной позиции с изъятием ТВЭЛ из конвейера.

Известен метод контроля формы поверхности объектов [4], который даёт возможность определять глубину дефектов. Метод заключается в формировании на поверхности световой полосы, лежащей в плоскости, перпендикулярной продольной оси объекта контроля. Регистрация изображения световой полосы производится с помощью камеры, расположенной под углом к её плоскости. Недостатком данного метода является низкая производительность в случае контроля изделий с большой кривизной формы поверхности, таких как ТТ и ТВЭЛ. Изображение световой полосы, зарегистрированное на поверхности, будет иметь форму дуги и, следовательно, занимать много строк. Считываемые кадры содержат большой объём информации, значительная часть которой при наличии мелких дефектов бесполезна. Большой объём информации потребует много времени на её передачу и обработку, что ограничивает производительность контроля (в частности, контроля ТТ и ТВЭЛ).

В целях преодоления этих ограничений исследован высокопроизводительный оптико-электронный метод контроля внешнего вида ТТ и ТВЭЛ с определением глубины дефектов, основанный на использовании в качестве формирователя световой полосы дифракционного оптического элемента (ДОЭ). При этом освещение поверхности производится под углом, а считывание изображения осуществляется в плоскости световой полосы, перпендикулярной поверхности объекта. Трёхмерная конфигурация освещающего пучка позволяет минимизировать объём считываемой информации и регистрировать только отклонения формы поверхности от номинальной. При этом высокая производительность контроля достигается вследствие обработки малоразмерных кадров изображений (5–20 строк).

Цель данной работы — усовершенствование метода структурного освещения для повышения производительности контроля внешнего вида цилиндрических объектов.

**Метод контроля.** На рис. 1 представлена структурная схема одного канала устройства, реализующего предлагаемый метод контроля ТТ и ТВЭЛ с определением глубины дефектов. Устройство содержит четыре идентичных канала. Осветительная часть включает источник света (полупроводниковый лазер) 1, коллиматор 2, формирователь 3 све-

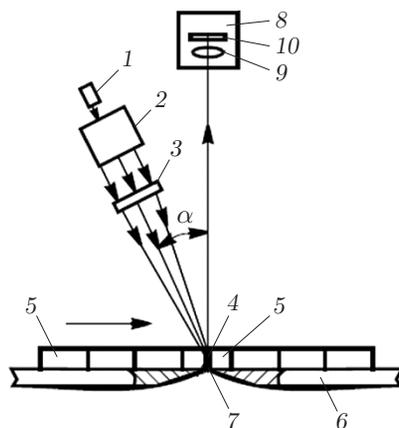


Рис. 1. Структурная схема измерительного канала устройства контроля ТТ

товой полосы 4 на поверхности контролируемого объекта 5. Таблетки (или ТВЭЛ) перемещаются по направляющей 6 с разрывом 7. Приёмный канал содержит фотоприёмную камеру 8 с объективом 9 и матричным фотоприёмником 10.

При контроле объекты перемещаются с постоянной скоростью по направляющей, в которой имеется разрыв, служащий для прохода освещающих и рассеянных объектом лучей. В позиции контроля на цилиндрической поверхности изделия формируются световые полосы, которые образуют кольцо по его периметру в плоскости, расположенной перпендикулярно продольной оси и под углом  $\alpha$  к оптическим осям освещающих блоков. В качестве формирователей световых полос используются ДОЭ. Для минимизации количества регистрируемой информации размер кадра фотоприёмных камер в направлении строчной развёртки ограничен длиной изображения световой полосы, а размер кадра в направлении, перпендикулярном строкам матрицы, ограничивается изображением максимально допустимого дефекта ТТ (или ТВЭЛ) по глубине. Современные матричные фотоприёмники позволяют считывать ограниченную область кадра, при этом частота кадров увеличивается. Информация из фотоприёмных камер поступает в аналитическое устройство, где определяется смещение световой полосы  $\Delta P$  в пикселях (с субпиксельным разрешением) при наличии дефекта. Далее вычисляется глубина дефекта  $H$  на поверхности таблетки по формуле

$$H = c \Delta P, \quad (1)$$

где  $c$  — коэффициент пропорциональности, определяемый при калибровке устройства.

В процессе сканирования всей боковой поверхности накапливаются данные из многих сечений, по которым реконструируется 3D-форма контролируемой поверхности. При наличии дефектов производится вычисление их геометрических размеров (длина, ширина, глубина, объём и др.).

**Расчёт и изготовление дифракционного оптического элемента.** Важнейшим элементом устройства, реализующего предложенный метод контроля, является ДОЭ, преимущество которого состоит в высокой точности проецирования освещающих полей, что позволяет использовать их в качестве формирователей эталонных волновых фронтов в различных интерференционных методах контроля [5, 6]. В методах структурного освещения для контроля трёхмерных объектов применение ДОЭ даёт возможность создать зондирующие поля с высокой точностью [7, 8] и выбрать их конфигурации. Для измерения глубины дефектов необходимо, чтобы ДОЭ формировал на цилиндрической поверхности световую дугу — фрагмент окружности, диаметр которой равен диаметру контролируемого цилиндра ( $D_{\text{ц}}$ ). При использовании трёх (или четырёх) оптических каналов угловой размер дуги должен быть  $90^\circ$  (или  $120^\circ$ ). Фокусирующие лазерное излучение в тонкие линии или малые области пространства ДОЭ называются фокусаторами. Известны методы аналитического расчёта фазовой функции дифракционного фокусатора в дугу окружности [9, 10]. В данной работе использовался более простой и универсальный метод расчёта на основе численного решения интеграла Френеля — Кирхгофа, подразумевающий дискретизацию создаваемой световой картины. Получаемое поле задаётся в виде набора из  $N$  точечных источников ( $\delta$ -функций), лежащих на дуге окружности с некоторым шагом  $\Delta$  (рис. 2).

При этом, как известно, поле, формируемое точечным источником  $\delta(x_i, y_i, z_i)$ , описывается импульсным откликом свободного пространства:

$$h_i(x, y) = e^{jkr_i} / j\lambda r_i,$$

где  $r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2}$ ;  $x, y$  — координаты точки в плоскости ДОЭ;  $x_i, y_i,$

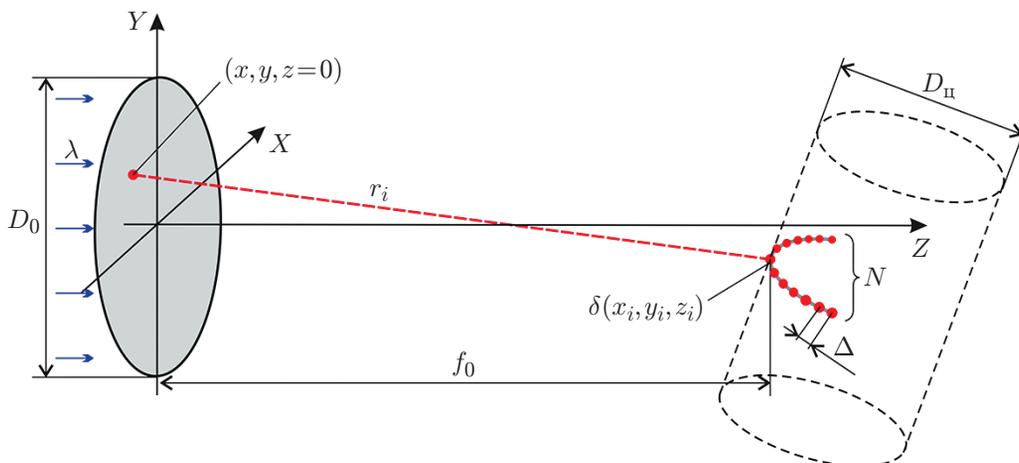


Рис. 2. Расчёт ДОЭ на основе преобразования Френеля — Кирхгофа

$z_i$  — координаты точек, лежащих на дуге;  $1 \leq i \leq N$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны света.

Поле в каждой точке ДОЭ описывается суперпозицией  $N$  импульсных откликов:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^N \sqrt{I_i} h_i(x, y), \quad (2)$$

где  $I_i$  — относительные интенсивности точек. Для первичных расчётов интенсивности всех точек брались равными единице. Однако существует возможность задания некоторой неравномерности  $I_i$  при расчёте ДОЭ для выравнивания яркости разных участков дуги на изображении. Величина этой неоднородности зависит от геометрии оптической схемы и рассеивающих свойств объекта.

Функция пропускания ДОЭ рассчитывается с некоторым шагом (около 1–2 мкм) в круге диаметра  $D_0$ . При этом из результирующего поля (2) выделяется его фазовая составляющая

$$T(x, y) = \arg(E(x, y)), \quad (3)$$

где  $T(x, y) \in [-\pi; \pi]$ .

При изготовлении ДОЭ в бинарном виде (фазовом или амплитудном) функция пропускания (3) бинаризуется.

На рис. 3 представлен фрагмент синтезированной дифракционной структуры. Для контроля ТТ и оболочек ТВЭЛ ДОЭ изготавливались на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300/С-М [11] с использованием термохимической технологии лазерной записи в плёнках хрома на стеклянных подложках с последующим жидкостным и ионным травлением.

Представленный метод расчёта имеет ограничение, связанное с дискретизацией формируемой световой картины. С одной стороны, шаг дискретизации  $\Delta$  нельзя делать слишком большим, так как на контролируемом объекте будет видна прерывистая световая полоса. С другой стороны, нельзя сильно уменьшать шаг дискретизации ввиду того, что в формируемой полосе будет происходить интерференция близлежащих точек. Таким образом, существует некоторое оптимальное значение шага дискретизации  $\Delta_{\text{opt}}$ . При этом для корректной работы предложенного метода контроля должно выполняться следующее условие:

$$\Delta_{\text{opt}} < R_{\text{min}} M,$$

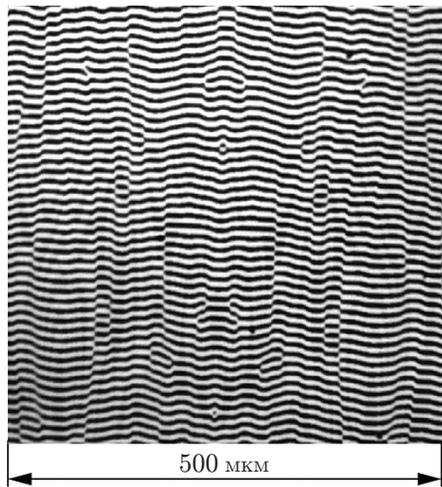


Рис. 3. Фрагмент микроструктуры изготовленного ДОЭ

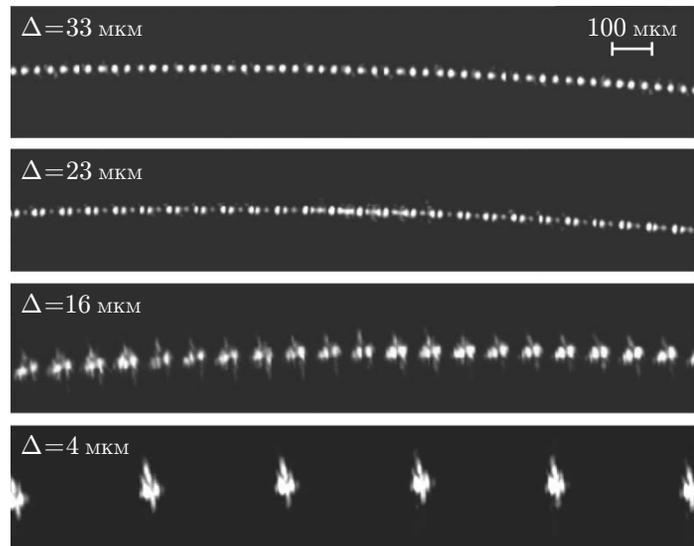


Рис. 4. Изображения световых дуг, сформированных ДОЭ

где  $R_{\min}$  — размер минимально обнаруживаемого дефекта (разрешение),  $M$  — увеличение объектива.

Характеристики изготовленного ДОЭ для контроля ТТ: минимальный размер структуры 1 мкм, рабочая длина волны  $\lambda = 405$  нм, диаметр ДОЭ  $D_0 = 10$  мм, фокусное расстояние  $f_0 \approx 260$  мм, угол падения лучей на ТТ  $\alpha = 15^\circ$ . Угловое расположение ДОЭ, дуги и лазера выбиралось так, чтобы нулевой порядок дифракции был в стороне от контролируемого участка поверхности. На рис. 4 представлены изображения световых дуг, сформированных ДОЭ с различным шагом дискретизации. Регистрация изображений проводилась КМОП-матрицей с размером пикселя 3,5 мкм. Световая полоса проецировалась ДОЭ непосредственно на матрицу без каких-либо дополнительных оптических элементов.

Из представленных экспериментальных данных видно, что оптимальное значение шага дискретизации составляет  $\Delta_{\text{opt}} \approx 25-30$  мкм (распределение интенсивности вдоль дуги имеет наибольшую пространственную частоту), что достаточно хорошо совпадает с диаметром диска Эйри ( $2,44\lambda f_0/D_0 = 25,7$  мкм), т. е. дифракционным разрешением данного ДОЭ.

При контроле оболочек ТВЭЛ требовалось повысить чувствительность метода и уменьшить ширину световой дуги. Для этого угол падения лучей был увеличен до  $45^\circ$  и фокусное расстояние  $f_0$  уменьшено до 50 мм. Таким образом, апертура ДОЭ выросла до максимально возможной ( $D_0/f_0 = 1/5$ ) при изготовлении на системе CLWS-300/С-М. Такая апертура не даёт возможности пространственно разнести нулевой и первый порядки дифракции. Поэтому для минимизации шума на изображении, возникающего вследствие освещения контролируемой поверхности недифрагированным светом, ДОЭ для контроля оболочек ТВЭЛ был изготовлен в бинарном фазовом исполнении (применялось ионное травление кварцевой подложки).

**Экспериментальные исследования.** Для исследований метода контроля боковой поверхности ТТ была разработана экспериментальная установка, которая содержала два оптических канала, соответствующих структурной схеме на рис. 1. Каждый канал состоит из полупроводникового лазера SLD3237vf мощностью 150 мВт с  $\lambda = 405$  нм, коллимирующей линзы, ДОЭ и фотоприёмной камеры с матрицей MT9V034C12STM разрешением

## Результаты измерений калибра

Диаметр калибра, мм	Величина ступеньки, мм	Калибровочный коэффициент, мм/пиксель	Измеренная глубина, мм	Погрешность измерений, мкм
7,487	—	—	—	—
7,189	0,1490	0,03727	0,1523	3,3
6,890	0,2985	0,0384	0,2981	-0,4
6,593	0,4470	0,03805	0,4491	2,1
6,292	0,5975	0,03861	0,5977	0,2

752 × 480 пикселей и размером пикселя 6 × 6 мкм. Управление установкой и обработка информации осуществлялись с помощью компьютера.

Объектами исследований были изготовленные стальные имитаторы ТТ. Всего использовалось четыре вида имитаторов: с дефектами типа пора глубиной 0,4 мм (годная таблетка), пора глубиной 0,6 мм (таблетка с недопустимым браком), типа трещина и образец без дефектов (годная таблетка). Программа исследований включала калибровку установки, обнаружение дефектов с минимальным линейным размером, определение погрешности измерения глубины дефектов типа пора, определение вероятности правильного контроля боковой поверхности.

Калибровка установки проводилась с помощью ступенчатого валика, диаметры и радиусы которого измерены микрометром (см. таблицу). Калибр располагался на подвижной платформе, перемещаемой с помощью шагового двигателя. Это позволило получить изображения полос в различных сечениях, перпендикулярных продольной оси калибра. На рис. 5 показаны объединённые изображения полос на сечениях максимального и минимального диаметров калибра. В экспериментах использовался ДОО с шагом дискретизации  $\Delta = 23$  мкм. Ширина полосы на изображении составляла 3–4 пикселя, что с учётом увеличения объектива равно 50–65 мкм. Таким образом, размер видимой полосы на объекте в 2 раза больше дифракционного предела. Это связано в первую очередь с шумовой составляющей дифрагированного излучения, которая усиливается на шероховатой поверхности.

По распределению интенсивности в первой полосе (базовой) на поверхности валика максимального диаметра (см. таблицу) и в последующих сечениях с использованием выражения (1) вычислялись калибровочные коэффициенты  $c_j$  (мм/пиксель). Разброс полученных значений коэффициентов не превышал 1,3 мкм/пиксель. Поэтому для измерений выбирался калибровочный коэффициент, полученный по распределению интенсивностей полос в сечениях максимального и минимального диаметров калибра. На рис. 5 видно, что расстояние между полосами меняется вдоль полос, в связи с чем калибровочный коэффициент зависит от координаты изображения  $j$ . В компьютерной программе коэффициент  $c_j$  вычислялся для каждой точки  $j$  вдоль полосы (с шагом в 1 пиксель) и заносился в программный массив данных. Погрешность измерений глубины профиля калибра



Рис. 5. Полосы в сечениях максимального и минимального диаметров калибра

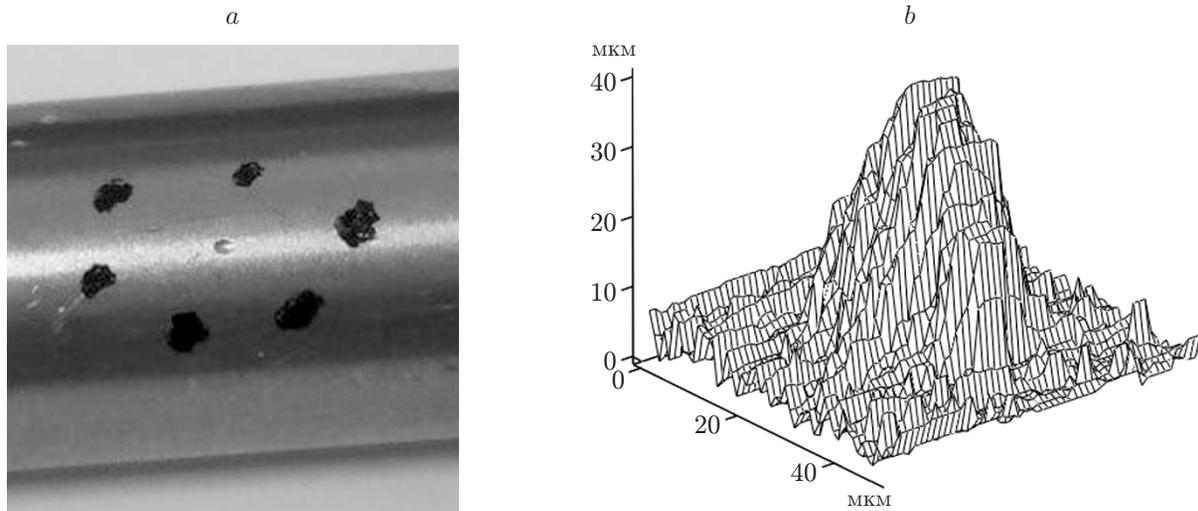


Рис. 6. Определение глубины дефектов на имитаторе оболочки ТВЭЛ: образ дефекта (а); 3D-форма дефекта (b)

при калибровке по сечениям с максимальным и минимальным диаметрами не превышает 3,3 мкм.

Для определения вероятности правильного контроля ТТ использовались два имитатора с дефектами типа пора и имитатор без дефектов. Имитаторы ТТ контролировались 25 раз с изменением позиционирования и очередности. Скорость подачи имитаторов составляла 6 шт./с. Вероятность правильного контроля боковой поверхности была 100 %, а погрешность измерения глубины дефектов — 0,04 мм. Минимальная обнаруженная визуально на изображении канавка имеет ширину и глубину 0,2 мм. Следует отметить, что царапины на ТТ также могут влиять на результаты контроля. Незначительные царапины практически не создают дефекты геометрии ТТ, но приводят к появлению пропусков в полосах при полном сканировании боковой поверхности. Чтобы исключить влияние пропусков на результаты сканирования, в алгоритме обработки изображений использовался пятиточечный медианный фильтр.

Эксперименты по обнаружению и измерению глубины дефектов на ТВЭЛ проводились на фрагментах их оболочек. По принципу работы и калибровки экспериментальная установка не отличалась от предыдущей, кроме того, что использовался всего один оптический канал, а ДОО имел увеличенную апертуру и угол освещения объекта  $45^\circ$ . На рис. 6, а приведена фотография фрагмента имитатора ТВЭЛ с дефектом типа пора (в центре среди меток, нанесённых фломастером). По результатам пятикратных измерений дефекта глубиной 38 мкм средняя квадратическая погрешность составила 4,3 мкм. Аттестация дефекта на оболочке ТВЭЛ выполнялась с помощью микроскопа-нанопрофилометра [12]. Восстановленный по результатам экспериментов 3D-профиль дефекта представлен на рис. 6, б.

**Заключение.** В данной работе исследован усовершенствованный метод структурного освещения применительно к контролю внешнего вида топливных таблеток и оболочек ТВЭЛ. Особенность метода заключается в формировании световой линии на боковой поверхности объекта контроля с помощью дифракционного оптического элемента. При этом освещение объекта производится под углом к плоскости световой линии, а считывание изображения осуществляется перпендикулярно оси объекта. Такое построение оптической системы в отличие от известного метода светового сечения позволяет минимизировать объём считываемой за кадр информации и тем самым повысить производительность контроля. Так, например, при наличии крупного дефекта на поверхности ТТ ( $\sim 0,6$  мм глубиной) увеличивается производительность контроля примерно в 2 раза. Значительно

большой эффект получается при контроле поверхности оболочек ТВЭЛ, так как глубина дефектов на них гораздо меньше (десятки микрометров).

По результатам экспериментов погрешность измерения дефектов глубиной 0,4–0,6 мм типа пора на ТТ равнялась 40 мкм, а на поверхности ТВЭЛ — 4,3 мкм. Вероятность правильного контроля имитаторов ТТ составила 100 %. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности предложенного метода контроля поверхности ТТ и ТВЭЛ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам института А. В. Белобородову за полезные советы по обработке информации и В. В. Широкову за предоставленные результаты измерений дефектов, полученные с помощью нанопрофилометра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2604109 РФ. Способ обнаружения поверхностных дефектов цилиндрических объектов /П. С. Завьялов, Д. Р. Хакимов, Л. В. Финогенов. Опубл. 12.12.16; Бюл. № 34.
2. Белобородов А. В., Власов Е. В., Завьялов П. С., Финогенов Л. В. Многоканальный высокопроизводительный оптико-электронный контроль качества поверхности топливных таблеток // Автометрия. 2010. 46, № 4. С. 121–129.
3. Сырецкий Д. Г., Сырецкий Г. А., Завьялов П. С. и др. Автоматизированный комплекс оптико-электронной разбраковки таблеток керамического ядерного топлива // Сб. матер. Междунар. науч. конф. «СибОптика-2016». Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 1. С. 124–129.
4. Pat. 20140152771 A1 US. Method and apparatus of profile measurement /T.-S. Chang. Publ. 05.06.2014.
5. Asfour J.-M., Poleshchuk A. G. Asphere testing with a fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram // JOSA A: Opt. Im. Sci. Vis. 2006. 23, N 1. P. 172–178.
6. Poleshchuk A. G., Nasyrov R. K., Asfour J. M. Interferometric testing of steep cylindrical surfaces with on-axis cghs // Компьютерная оптика. 2016. 40, № 5. С. 625–628.
7. Lemeshko Yu. A., Finogenov L. V., Zavyalov P. S. Using the diffractive optics for 3D inspection of nuclear reactor fuel assembly grid spacers // Meas. Sci. Rev. 2008. 8, Sect. 3. N 3. P. 74–77.
8. Белобородов А. В., Гущина А. А., Завьялов П. С. и др. Оптико-электронный контроль керамических колец // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 25–29.
9. Методы компьютерной оптики /Под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000. 687 с.
10. Golub M. A., Doskolovich L. L., Kasanskiy N. L. et al. Computational experiment for computer generated optical elements // Proc. SPIE. 1991. 1500. P. 194–206.
11. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике // Автометрия. 1998. № 6. С. 5–26.
12. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В. и др. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. 2010. 46, № 2. С. 119–128.

Поступила в редакцию 28 апреля 2017 г.