

**ТРЕХМЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ  
ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК  
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ  
НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**П. С. Завьялов, Ю. А. Лемешко, Л. В. Финогенов, Ю. В. Чугуй**

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
г. Новосибирск  
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru*

Рассматривается метод контроля дистанционирующих решеток (ДР) на базе дифракционных оптических элементов. Изложены вопросы синтеза дифракционных элементов, расчета просцирующей оптики, юстировки и калибровки измерительной системы. Описаны методы обработки изображений, полученных на различных конструктивных элементах ДР.

**Введение.** Для безопасности атомных электростанций в современных условиях предъявляются жесткие требования к качеству их основных элементов – тепловыделяющих сборок (ТВС) [1–3]. Важнейшей составляющей ТВС является дистанционирующая решетка (ДР), выполненная в виде сотовой структуры (рис. 1, а), в ячейках которой помещаются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ).

В настоящее время выходной контроль ДР осуществляется контактными калибрами (цилиндрами, шариками). Такой контроль не дает полной информации о геометрии ДР и зависит в значительной степени от субъективного фактора. На стадии отработки технологии используется выборочный контроль с помощью координатно-измерительных машин, требующий больших временных затрат (3–4 ч в одном сечении по высоте).

Для размерного контроля дистанционирующих решеток ТВС перспективным представляется применение метода структурного освещения. На его основе в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН (КТИ НП) была разработана оптико-электронная система контроля основных геометрических параметров шестиугольных дистанционирующих решеток [4]. В этой системе для освещения объекта контроля используется матрица лазерных пучков (многоточечное структурное освещение). В настоящее время существенно расширилась номенклатура выпускаемых шестиугольных решеток. При этом заметно возросли требования к точности измерений вследствие улучшения технологии изготовления ДР. Более того, в связи с выходом российских предприятий на мировой рынок началось

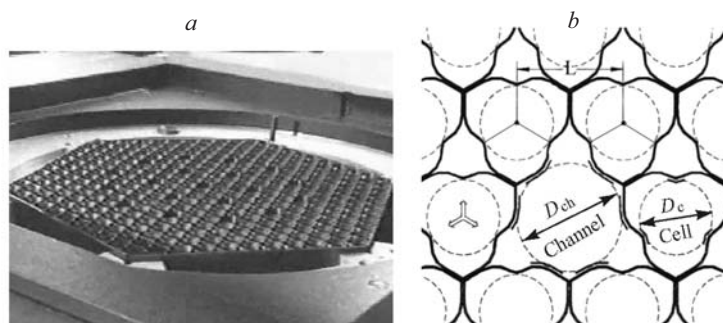


Рис. 1. Дистанционирующая решетка: общий вид (а), контролируемые параметры (b)

производство ТВС с квадратными ДР западного типа. Созданная ранее система на основе метода многоточечного структурного освещения не удовлетворяет существующим точностным требованиям и не обеспечивает измерение большей части современных ДР.

В предлагаемой работе представлен универсальный метод контроля геометрии ДР на основе осесимметричных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), который позволяет создать прецизионную систему автоматического контроля (в темпе технологического цикла производства) широкой номенклатуры отечественных и зарубежных дистанционирующих решеток.

**Метод контроля решеток на основе ДОЭ.** Для контроля трехмерных (3D) объектов предлагается метод структурного освещения на основе ДОЭ, который должен обеспечивать контроль следующих параметров шестиугольных ДР (рис. 1, b): диаметры  $D_c$  ячеек (порядка 9 мм), формируемые их выступами – пуклевками; диаметры  $D_{ch}$  вписанных окружностей под направляющие каналы (~13 мм); расстояния  $L$  между центрами соседних ячеек; сдвиги центров вписанных окружностей ячеек относительно номинального положения (сдвиги позиционирования); размеры обода решетки  $B$ , характеризующие габаритные размеры ТВС (для разных видов ДР от 140 до 240 мм). Для квадратных ДР вместо диаметров контролируются расстояния между противоположными пуклевками. Погрешности измерения диаметров ячеек  $\delta D_c$  и отверстий под канал  $\delta D_{ch}$  не должны превышать  $\pm 10$  мкм, погрешность измерения расстояния между ячейками  $\delta L$  должна составлять не более  $\pm 30$  мкм, погрешность измерения размера шестигранника  $\delta B$  – не более  $\pm 100$  мкм.

Обеспечение универсальности метода и требуемых метрологических характеристик измерительной системы достигается путем структурного освещения объекта волновым фронтом в виде кольца (кольцевое освещение), формируемым осесимметричным ДОЭ [5–8]. С помощью ДОЭ можно получать информацию как в одном, так и в нескольких сечениях ячейки по глубине. В последнем случае ДОЭ фокусирует лазерное излучение в систему колец равного диаметра, расположенных вдоль оси  $Z$  ячейки с некоторым шагом (рис. 2), что позволяет получить 3D-модель ячейки. При таком структурном освещении не имеет принципиального значения количество и расположение выпуклостей (пуклевок) ячейки, фиксирующих ТВЭЛ. Другими словами, структура освещения дает возможность проводить измерения по всей внутренней поверхности ячейки без необходимости механического перемещения, что обеспечивает высокое быстродействие метода.

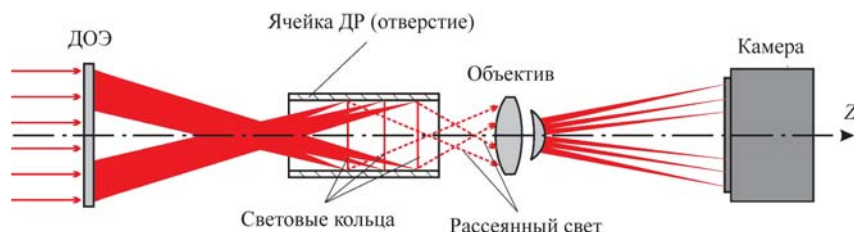


Рис. 2. Структурная схема метода контроля решеток на основе ДОЭ

Существенно, что применение таких элементов в измерительных системах позволяет с высокой точностью синтезировать заданное распределение поля практически любой конфигурации (согласованной с конфигурацией объекта). Использование ДОЭ в измерительной технике различного назначения в настоящее время получило широкое распространение [9].

Суть метода измерения геометрических параметров ячейки поясняет рис. 2. Освещенная поверхность ячейки проецируется на фотоприемную матрицу камеры с помощью специального объектива, имеющего большую кривизну поля и дисторсию. Он фокусирует различные сечения по глубине в плоскость фотоприемника, при этом чем ближе сечение объекта, тем больше радиус его изображения. Для измерения всех геометрических параметров ячеек и решеток в целом используется сканирующий двухкоординатный стол в целях ее перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы.

Предлагаемый метод структурного освещения на основе ДОЭ позволяет контролировать большой класс ДР. При этом возможно расширение номенклатуры контролируемых объектов за счет синтеза соответствующих ДОЭ.

**Синтез ДОЭ.** Основным элементом метода структурного освещения является ДОЭ, к которому предъявляются следующие требования. Для обеспечения информативности измерений решетки по длине пуклевки необходимо контролировать 10–15 сечений, поэтому ДОЭ должен формировать на пуклевках такое же количество колец с шагом  $\Delta z = 0,5\text{--}1,0$  мм. При контроле ячеек с длинными и короткими пуклевками целесообразно использовать разные дифракционные элементы. Диапазон фокусировки кольца в радиальном направлении должен соответствовать допуску на положение центра ячейки (0,15–0,30 мм).

Дифракционные элементы, фокусирующие излучение в систему колец, можно создать двумя способами: во-первых, разбить ДОЭ на радиальные сегменты, каждый из которых будет создавать одно световое кольцо; во-вторых, синтезировать ДОЭ, который всей поверхностью формирует набор световых колец вдоль оптической оси. В этом случае ДОЭ работает как голограмма, а его передаточная функция имеет следующий вид:

$$H(\rho) = \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left[ jk \sqrt{(\rho + r_0)^2 + (F + i\Delta z)^2} \right],$$

где  $N$  – число световых колец, формируемых ДОЭ, а  $r_0$  – радиус.

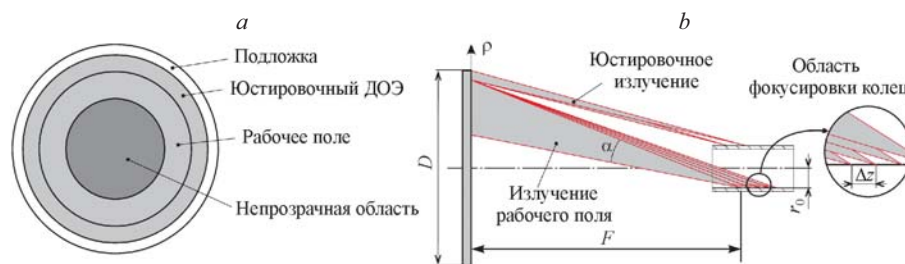


Рис. 3. Дифракционный оптический элемент: структура ДОЭ (а), ход лучей юстировочного излучения (b)

В результате экспериментов и теоретических расчетов установлено, что для задачи контроля решеток наиболее подходит ДОЭ-голограмма. Для формирования достаточно узких световых колец сегментированный ДОЭ должен иметь большие диаметр и фокусное расстояние (порядка  $D = 80$  мм,  $F = 160$  мм). Однако здесь углы падения лучей в начале и конце пуклевки существенно различаются, что не позволяет обеспечить одинаковые условия измерения по всей длине ячейки. К тому же при использовании сегментированного ДОЭ предъявляются более жесткие требования к равномерности интенсивности лазерного пучка. От этих недостатков свободна ДОЭ-голограмма. Такие элементы (рис. 3, а) для контроля решеток были изготовлены в КТИ НП СО РАН на круговом лазерном фотопостроителе CLWS-300 [10].

Кроме рабочего поля, ДОЭ имеет в центре непрозрачную область, а на периферии – дополнительный юстировочный элемент. Непрозрачная область в центре выполняет несколько функций: во-первых, она не пропускает прямое излучение от лазера в проекционный объектив, а во-вторых, уменьшает угловую апертуру  $\alpha$  рабочего поля (рис. 3, b), вследствие чего освещение поверхности производится излучением, в котором отсутствуют скользкие лучи. Юстировочный ДОЭ создает два кольца того же диаметра, что и рабочее поле (см. рис. 3, b), однако в этом случае юстировочные лучи не пересекают оптическую ось. Таким образом, при наличии ячейки в зоне контроля эти лучи не попадают в апертуру проекционного объектива, поэтому юстировочные кольца не наблюдаются. Когда же ячейка отсутствует, в апертуру объектива не попадает рассеянное от ячейки излучение рабочего поля ДОЭ. При этом видны два юстировочных кольца, по которым можно настраивать приемную оптическую часть по отношению к освещающей оптической системе.

Зарегистрированные ПЗС-линейкой (ширина пикселя 14 мкм) распределения интенсивностей, формируемых изготовленными ДОЭ, приведены на рис. 4. Расчеты и эксперименты показали, что для контроля всей номенклатуры ДР достаточно применять четыре таких дифракционных элемента с разными диаметрами и шагами световых колец. Перенастройка системы на контроль различных типов ДР осуществляется сменой ДОЭ.

**Расчет объектива для формирования поверхности отверстия.** Важным элементом в методе контроля является специально рассчитанный объектив, который предназначен для проецирования освещенной внутренней поверхности ячейки на матрицу камеры, при этом световые кольца по всей длине ячейки должны быть хорошо разрешимы. Решение этой задачи достигается при использовании объектива с большими кривизной поля и дисторсией.

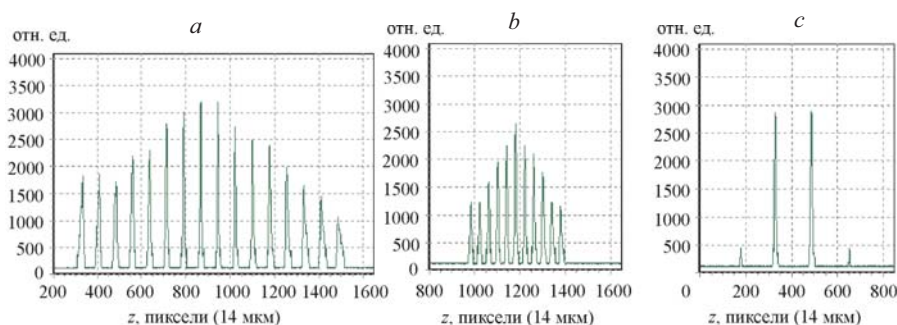


Рис. 4. Экспериментально полученные распределения интенсивностей, формируемые изготовленными ДОЭ: шаг колец 1,0 мм (а), шаг колец 0,5 мм (b), юстировочные кольца (с)

Преднамеренное увеличение кривизны поля объектива достигается за счет введения астигматизма. Диаграмма геометрического пятна рассеяния для центральной области ячейки (среднего кольца) представлена на рис. 5, а. Форма пятна рассеяния в виде линии приводит к тому, что изображения полос структурного освещения сливаются на краях пуклевки (рис. 5, b). Разрешение полос структурного освещения с шагом 0,5 мм в центре пуклевки является для такого объектива практически предельно достижимым.

С использованием специального программного обеспечения для проектирования оптических систем Zemax-EE [11] в данной работе рассчитан трехлинзовый проекционный объектив. Были смоделированы изображения некоторых элементов ДР, подлежащих контролю. На рис. 5, b, c приведены изображения световых колец на различных элементах ДР, рассчитанные методом трассировки лучей, а на рис. 5, d дано реальное изображение ячейки ДР, сформированное объективом в белом свете (черное пятно в середине –

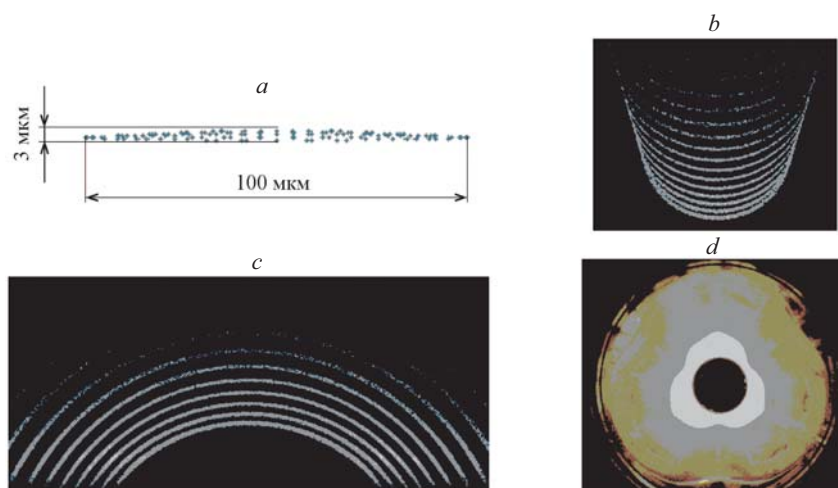


Рис. 5. Иллюстрация характеристик объектива: диаграмма геометрического пятна рассеяния (а); рассчитанные изображения полос на различных элементах ДР: пуклевке в виде цилиндра радиуса 2 мм (b), цилиндрическом отверстии диаметра 9 мм (с); реальное изображение ячейки, сформированное с помощью проекционного объектива (d)

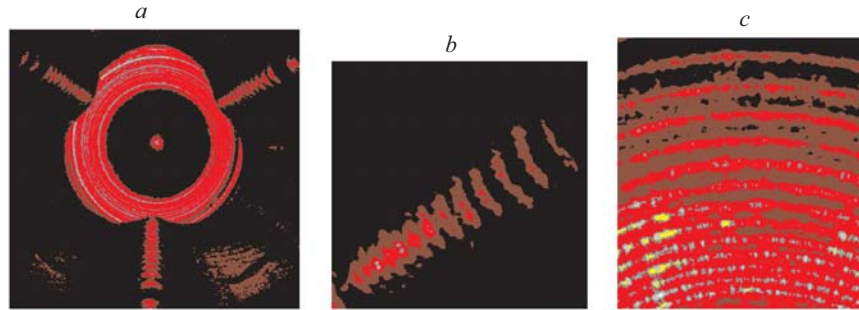


Рис. 6. Изображения полос структурного освещения на различных поверхностях: ячейка целлюлозы (а), пуклевка (b), цилиндрическое отверстие (с)

встроенный в объектив фильтр для удаления нулевого порядка дифракции (ДОЭ).

**Алгоритм обработки изображений и результаты экспериментальных исследований.** Очевидно, что успешное решение указанной задачи во многом зависит от эффективности алгоритма определения координат полос при обработке изображений. Созданный в данной работе алгоритм основан на радиальном сканировании изображения из центра, соответствующего положению оптической оси. В этом случае обрабатываемое изображение представляется в полярной системе координат с центром в точке  $x_0, y_0$  в виде радиального распределения  $I(R)$ . Алгоритм работает следующим образом.

Сначала вдоль направления сканирования анализируется радиальное распределение интенсивности  $I(R)$ , содержащее в себе  $N$  пиков (число колец ДОЭ). Основная задача состоит в том, чтобы правильно идентифицировать пики и найти их координаты. Типичные изображения колец на различных поверхностях, полученные с помощью CMOS-матрицы размера  $3456 \times 2304$  пикселя (размер пикселя 6,4 мкм) и полупроводникового лазера мощностью 40 мВт, показаны на рис. 6.

Как видно из рисунка, изображения колец имеют ряд особенностей, осложняющих обработку радиального распределения интенсивности  $I(R)$ . Расстояние между полосами увеличивается с возрастанием радиуса. Полосы на краю и в центре существенно различаются по интенсивности. Поэтому распределение  $I(R)$  далее подвергается ряду операций (рис. 7). Вычисляется усредненное распределение интенсивности  $I_{cp}(R)$  (фоновая составляющая) с помощью скользящего среднего по  $I(R)$  с шириной маски больше периода полос. Затем фоновая составляющая вычитается из распределения  $I(R) - I_{cp}(R)$ . Далее полученное распределение масштабируется по  $R$  так, чтобы период полос стал примерно одинаковым, и аппроксимируется рядом Фурье. Число гармоник ряда выбирается в зависимости от количества полос  $N$ . На аппроксимирующей кривой  $I_{ан}(R_m)$  находится  $N$  максимумов, которые затем используются для вычисления точного положения полос по методу центра масс.

После завершения радиального сканирования производится проверка правильности простановки номеров полос. В случае неправильного определения полос на некоторых направлениях сканирования (определились не все полосы, произошел пропуск какой-либо полосы и т. п.) осуществляется переустановка номеров полос, а если это невозможно, точки удаляются и в дальнейшем не рассматриваются.

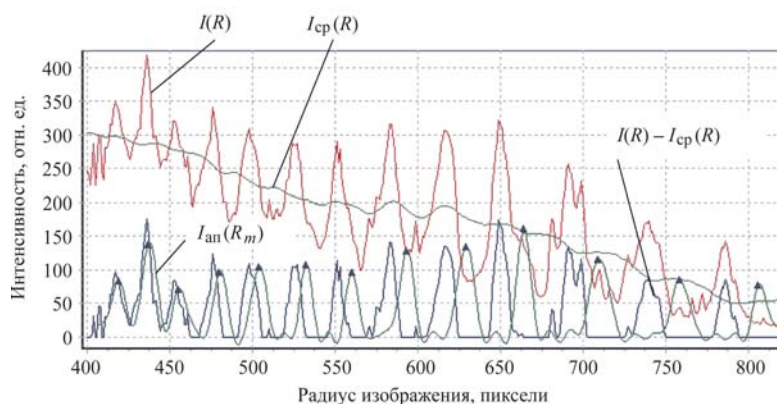


Рис. 7. Обработка радиального распределения интенсивности  $I(R)$

Для определения геометрических параметров объекта контроля необходимо провести калибровку оптической системы. В процессе калибровки для каждой полосы находится зависимость расстояния  $r$  (расстояние от оптической оси до контролируемой поверхности) от радиуса полосы на изображении  $R$ , т. е. для каждой полосы находится калибровочная кривая  $r_n(R)$ , где  $n$  — номер полосы.

Приведем пример обработки изображения ячейки — основного объекта контроля ДР. Радиально сканируются три области, расположенные под углом  $120^\circ$ ; для шестиугольных решеток или четыре угловые области, расположенные под углом  $90^\circ$ , для квадратных решеток. Размер области сканирования для одной пуклевки составляет примерно  $20-30^\circ$ , шаг сканирования  $\Delta\varphi = 0,1-0,2^\circ$ . Каждая полоса на пуклевке аппроксимируется полиномом 3-й степени, который используется для определения вершины полосы. Вершина соответствует ближайшей к оси точке поверхности пуклевки. Выполнение программы обработки изображения ячейки (показана одна из пуклевки) представлено на рис. 8, а. Полосы на пуклевке обозначены рядом точек, через которые проведены аппроксимирующие полиномы. График зависимости  $R_i(\varphi_i)$  для полос пуклевки приведен на рис. 8, б. Их угловой размер (при экспериментах) составлял  $4-8^\circ$ , соответственно на пуклевку приходилось порядка 30–80 отсчетов.

Обработка изображений других элементов решетки осуществляется в таком же порядке с небольшими различиями.

На основе разработанного метода изготовлен экспериментальный образец системы контроля фрагментов ДР, включающий блок осветителя, устройство позиционирования фрагментов ДР, фотоприемный блок и компьютер. Создано программное обеспечение, осуществляющее управление системой контроля, юстировку и калибровку оптической части системы. Разработаны алгоритмы обработки изображений и вычисления геометрических параметров элементов ДР.

С целью проверки предложенных технических решений проведены лабораторные испытания экспериментальной системы, в результате которых получены следующие метрологические характеристики: погрешность  $\delta L$  измерения позиционного отклонения центров ячеек  $\pm 0,007$  мм, а погрешность  $\delta B$  измерения размера обода решетки  $\pm 0,011$  мм.

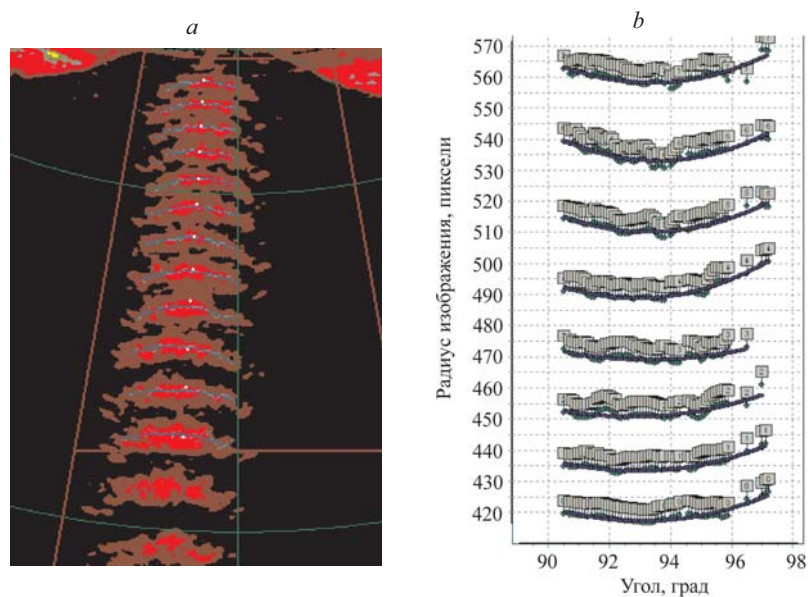


Рис. 8. Обработка изображений ячеек: полученное изображение пуклевки (а) и график зависимости  $R_i(\varphi_i)$  для полос на пуклевке с аппроксимирующими полиномами (б)

**Заключение.** Разработан универсальный метод контроля дистанционирующих решеток на основе ДОО, позволяющий производить достоверный 3D-контроль основных элементов дистанционирующих решеток: ячеек, отверстий под канал и обода. Метод дает возможность контролировать большую номенклатуру выпускаемых шестиугольных и квадратных решеток. Перенастройка на различные виды решеток сводится к замене дифракционных элементов, например, посредством револьверного механизма.

Созданы дифракционные элементы для формирования структурного освещения в виде 10–15 колец (диаметром 9 мм) с шагом 0,5 и 1,0 мм вдоль оси отверстия. Это позволяет получить необходимую достаточно полную информацию для последующей реконструкции 3D-моделей контролируемых объектов. Спроектирован и изготовлен специальный объектив для регистрации освещенной поверхности отверстия. Созданы алгоритмы обработки изображений и вычисления геометрических параметров элементов ДР. На основе разработанного метода создан экспериментальный образец системы контроля фрагментов ДР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **От первой в мире АЭС – к атомной энергетике XXI века** // Сб. тезисов, докладов и сообщений 10-й Ежегод. конф. ядерного общества России. М.: Изд-во «ФЭН», 1999.
2. **JSC TVEL Nuclear fuel for power and research reactors.** Russian business agency. М., 2001.
3. **VVER Nuclear fuel production.** JSC Novosibirsk Chemical Concentrates Plant (NCCP). Novosibirsk, 2001.
4. **Битюцкий О. И., Вергопрахов В. В., Гущина А. А. и др.** Трехмерный бесконтактный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов // Автометрия. 2003. 39, № 5. С. 4.



5. **Финогенов Л. В.** Контроль геометрических параметров отверстий с использованием дифракционного кольцевого фокусатора // Автометрия. 2005. **41**, № 6. С. 23.
6. **Завьялов П. С., Кирьянов В. П., Никитин В. Г. и др.** Комплексный контроль отверстий на основе дифракционного фокусатора // Сб. тр. VI Междунар. конф. «Прикладная оптика». С.-Пб., 2004. С. 407.
7. **Пат. 2245516 РФ.** Устройство контроля отверстий деталей /Ю. В. Чугуй, Л. В. Финогенов, П. С. Завьялов и др. Заявл. 15.04.2003; Оpubл. 10.10.2004, Бюл. № 3.
8. **Завьялов П. С., Финогенов Л. В., Чугуй Ю. В.** Использование дифракционного фокусатора для комплексного контроля отверстий // Современные проблемы геодезии и оптики: Сб. науч. ст. по материалам LIV науч.-техн. конф. Новосибирск: СГГА, 2005. С. 168.
9. **Насыров Р. К., Поleshук А. Г., Корольков В. П. и др.** Методы сертификации дифракционных оптических элементов для контроля асферической оптики // Автометрия. 2005. **41**, № 1. С. 115.
10. **Gurenko V. M., Kastorsky L. B., Kiryanov V. P. et al.** Laser writing system CLWS-300/C-M for microstructure synthesis on the axisymmetric 3-D surfaces // Proc. SPIE. 2002. **4900**. P. 320.
11. **Верхотуров О. П.** Введение в вычислительную оптику. Новосибирск: СГГА, 1998.

*Поступила в редакцию 12 апреля 2007 г.*

---