

## Использование дифракционных оптических элементов для контроля геометрических параметров промышленных изделий

П.С. Завьялов<sup>1</sup>, Л.В. Финогенов<sup>1</sup>, Е.С. Жимулева<sup>1</sup>, М.С. Кравченко<sup>1</sup>,  
М.В. Савченко<sup>1</sup>, В.Э. Карлин<sup>1</sup>, А.В. Белобородов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
Русская 41, Новосибирск, Россия, 630058

**Аннотация.** В работе описаны системы для контроля геометрических параметров промышленных изделий. Системы разработаны на основе метода структурного освещения. Освещающая структура формируется с помощью дифракционных оптических элементов. Объектами контроля в системах являются: топливные таблетки, тепловыделяющие элементы, дистанционирующие решетки, керамические кольцевые изоляторы. Дифракционные оптические элементы, используемые в работе, представляют собой фокусаторы в набор колец, набор полос. Для контроля цилиндрических объектов выполнен фокусатор в дугу, плоскость фокуса которой совпадает с плоскостью образующей цилиндра.

### 1. Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) – уникальные оптические элементы, обладающие недостижимыми, в рамках традиционной оптики, характеристиками. Широкое развитие получили благодаря применению компьютеров для синтеза голограмм математически заданных объектов. По структуре выделяют следующие типы ДОЭ: бинарный амплитудный, бинарный фазовый, непрерывный микрорельеф, микрорельеф на сферической поверхности, структура с полутонным пропусканием. Для задач оптического приборостроения применяются преимущественно первые 3 типа. ДОЭ применяют для исправления аберраций оптических систем, корректировки модового состава лазерного излучения, высокоточного контроля асферических поверхностей в оптическом приборостроении и ряда других задач.

Актуальным применением дифракционных элементов является бесконтактный контроль геометрических параметров объектов, имеющих светорассеивающую поверхность. Способ контроля таких изделий заключается в освещении измеряемой поверхности световым полем сложной конфигурации (полосы, матрицы точек, сетки и т.п.) и регистрация его изображения (одним или несколькими фотоприёмниками). В результате последующей обработки производится вычисление необходимых геометрических параметров. Существует множество подобных методов, которые обобщенно можно назвать методами структурного освещения [1]. С их помощью имеется возможность измерения 3D формы объекта, используя всего лишь один кадр изображения. Кроме того, эти методы используются для оцифровки 3D объектов и сцен в реальном масштабе времени ввиду достаточной простоты обработки изображений [2]. В качестве формирователей структурного освещения, как правило, используются серийно

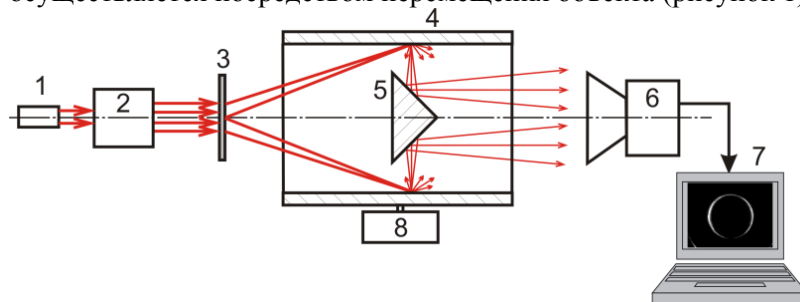
выпускаемые LCD или DLP проекторы, что ограничивает применение таких устройств в виду низкой точности измерений (погрешность более 0,1 мм)[3]. Это не позволяет использовать в полной мере такие осветители в промышленном производстве. Для уменьшения погрешности измерений необходимо применять высокоточные проекторы на базе элементов цифровой и дифракционной оптики [4,5].

В КТИ НП СО РАН предложены методы структурного освещения на базе ДОЭ и разработаны системы контроля ряда ответственных промышленных изделий. В работе представлен обзор полученных результатов с акцентом на вопросы разработки и использования дифракционных оптических элементов в задачах размерного контроля.

**2. Метод контроля протяженных отверстий**

Нами был предложен оптикоэлектронный метод контроля отверстий с использованием дифракционного фокусатора излучения [6]. На основе этого метода может быть создан малогабаритный зонд для контроля диаметров отверстий, непрямолинейности его оси, отклонения формы поверхности от цилиндричности и качества поверхности. Применение такого зонда в наибольшей степени целесообразно для контроля отверстий с несопрягающимися поверхностями (относительно свободными размерами), например, стволов гладкоствольного оружия.

Методика измерения заключается в формировании освещённого участка в виде кольца на внутренней цилиндрической поверхности изделия, приёме и обработке изображения этого участка. Свет, рассеянный от внутренней поверхности цилиндрического объекта, попадает на матрицу ПЗС-камеры благодаря коническому зеркалу. Сканирование всей поверхности осуществляется посредством перемещения объекта (рисунок 1).

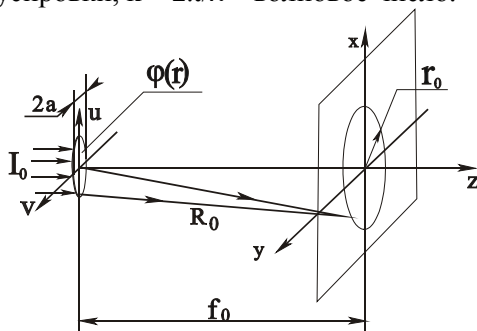


**Рисунок 1.** Принцип контроля отверстий. 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – ДОЭ; 4 – цилиндрический канал; 5 – коническое зеркало; 6 – ПЗС-камера; 7 – компьютер; 8 – устройство перемещения детали.

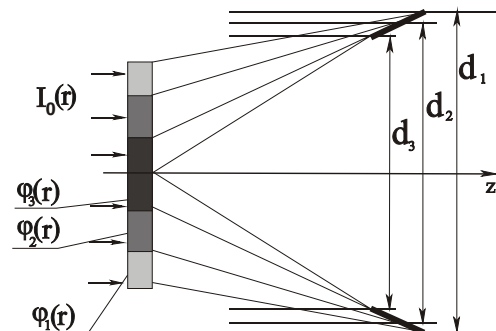
В предлагаемом методе измерения важнейшей задачей является фокусировка светового пучка в узкое кольцо (рисунок 2). В качестве такого оптического элемента был использован дифракционный фокусатор [7], со следующей фазовой функцией [8]:

$$\varphi(r) = -k\sqrt{f_0^2 + (r - r_0)^2}, \quad 0 \leq r \leq a, \tag{1}$$

где  $r$  – полярный радиус,  $f_0$  – фокусное расстояние,  $a$  – радиус фокусатора,  $r_0$  – радиус кольца фокусировки,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.



**Рисунок 2.** Геометрия фокусировки в кольцо.



**Рисунок 3.** Фокусировка в усечённый конус.

Диапазон измеряемых диаметров возможно увеличить, если на поверхности ДОО синтезировать несколько фокусаторов в кольца разных диаметров  $d_1, d_2, d_3$  с разными фокусными расстояниями (рис. 3). В этом случае увеличивается и размер фокального пятна.

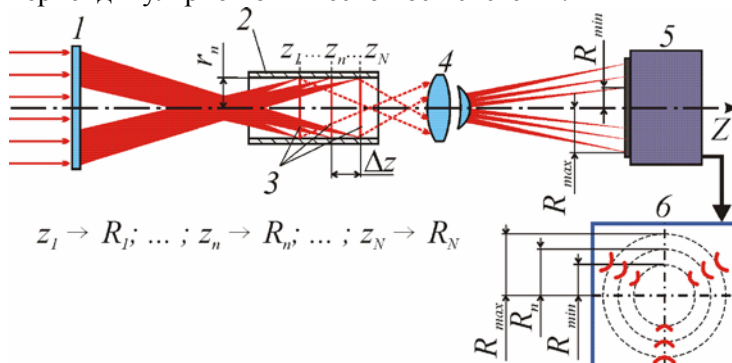
Результаты измерений непрямолинейности протяжённых отверстий с использованием фокусатора в кольцо показали, что погрешность при измерении в диапазоне смещений  $\pm 200$  мкм составила около 5 мкм. При использовании фокусатора в протяжённую область в диапазоне смещений  $\pm 400$  мкм погрешность составила не более 3 мкм. При измерении диаметров отверстий 39 – 41 мм погрешность не превысила 3 мкм.

### 3. Контроль дистанционирующих решеток

Для контроля таких сложных 3D-объектов как дистанционирующие решетки (ДР) тепловыделяющих сборок (ТВС) предложен метод структурного освещения на основе мультикольцевых фокусаторов (МКФ) [8,9]. Метод обеспечивает контроль следующих параметров шестиугольных ДР: диаметров ячеек и отверстий под канал, формируемых их выступами – пуклевками; расстояний между центрами соседних ячеек; сдвигов центров ячеек относительно номинального положения по чертежу; габаритных размеров ТВС. Для квадратных ДР вместо диаметров контролируются расстояния между противоположными пуклевками. Погрешности измерения диаметров ячеек и отверстий под канал не должны превышать  $\pm 10$  мкм, погрешность измерения расстояния между ячейками  $\pm 30$  мкм.

В предложенном методе увеличение быстродействия достигается путем освещения внутренней поверхности 3D объекта мультикольцевым световым зондом, который может быть создан на основе ДОО. При этом измерение одной ячейки ДР по всей длине производится за один кадр, содержащий всю информацию о её геометрии. Также при мультикольцевом структурном освещении не имеет принципиального значения количество и расположение пуклёвок ячейки, поэтому метод позволяет контролировать геометрические параметры как шестигранных (российских), так и квадратных (зарубежных) дистанционирующих решеток.

Суть метода поясняется на рисунке 4. Структурное освещение в виде набора колец формируется специально рассчитанным ДОО - МКФ), который фокусирует падающее на него лазерное излучение в систему колец равного диаметра, расположенных вдоль оси Z ячейки с некоторым шагом  $\Delta z$ . Освещенная поверхность ячейки проецируется на фотоприёмную матрицу камеры с помощью специального объектива для контроля отверстий, имеющего большую кривизну поля и дисторсию. Он фокусирует различные сечения по глубине в плоскость фотоприёмника, при этом, чем ближе сечение объекта, тем больше радиус его изображения. Для измерения геометрических параметров всех ячеек и параметров решетки в целом используется сканирующий двухкоординатный стол для её перемещения в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы.



**Рисунок 4.** Иллюстрация метода контроля ДР на основе МКФ. 1 – МКФ; 2 – контролируемая ячейка; 3 – световые кольца; 4 – объектив для контроля отверстий; 5 – камера; 6 – изображение ячейки;  $R_{min}$  и  $R_{max}$  – минимальный и максимальный радиусы изображения;  $\Delta z$  – шаг колец,  $2r_n$  – диаметр ячейки.

К МКФ предъявляются следующие требования. Для обеспечения информативности контроля по длине пуклёвки необходимо контролировать 10 – 15 сечений, поэтому МКФ должен формировать на пуклёвках такое же количество колец с шагом  $\Delta z = 0,5 - 1$  мм. Диапазон фокусировки кольца в радиальном направлении должен соответствовать допуску на положение центра ячейки (0,15 – 0,3 мм).

Дифракционные элементы, фокусирующие излучение в систему колец, можно создать двумя способами. Во-первых, можно разбить поверхность дифракционного элемента на радиальные сегменты, каждый из которых будет создавать одно световое кольцо. Во-вторых, можно создать дифракционный элемент, который всей поверхностью формирует набор световых колец вдоль оптической оси. В этом случае он работает как голограмма, а передаточная функция такого МКФ имеет следующий вид:

$$H(\rho) = \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{J_i} \cdot \exp\left[jk\sqrt{(\rho + r_0)^2 + (f_0 + i \cdot \Delta z)^2}\right], \quad \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \quad (2)$$

где  $J_i$  – относительная интенсивность  $i$ -го светового кольца,  $r_0$  – радиус колец,  $f_0$  – фокусное расстояние МКФ,  $\Delta z$  – шаг колец,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Такие МКФ с диаметром 45 мм могут генерировать до 20 узких световых колец равного диаметра с шириной 50 – 100 мкм и шагом по глубине в пределах 0,5 – 1 мм. На рисунке 5а показана структура разработанных МКФ.

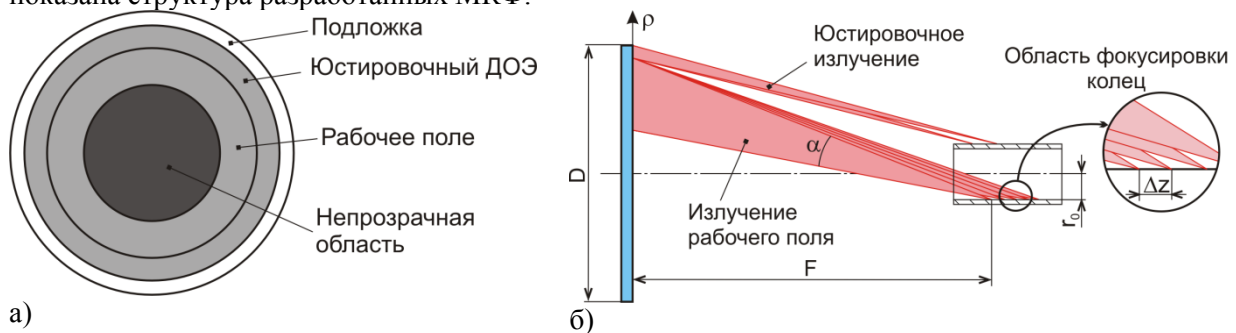


Рисунок 5. Дифракционный оптический элемент: а) структура ДОЭ; б) ход лучей МКФ.

Кроме рабочего поля, МКФ 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. Во-вторых, эта область уменьшает угловую апертуру  $\alpha$  рабочего поля (рисунк 5б), вследствие чего освещение поверхности производится излучением, в котором отсутствуют скользкие лучи. Юстировочный ДОЭ создает два кольца того же диаметра, что и рабочее поле (рисунк 5б), 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, и 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 приёмную оптическую часть по отношению к освещающей оптической системе.

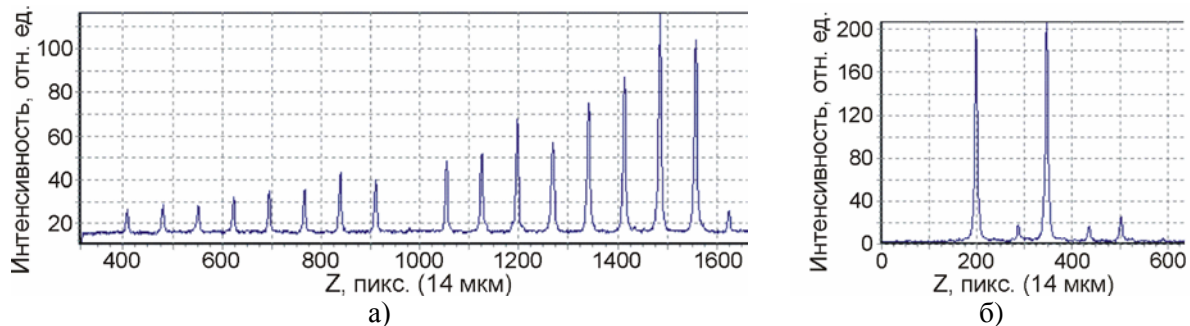


Рисунок 6. Экспериментально полученные распределения интенсивности МКФ, генерирующего 16 колец с шагом  $\Delta z = 1$  мм (а), 2 юстировочных колец (б).

На рисунке 6 показаны зарегистрированные ПЗС-линейкой (ширина пикселя 14 мкм) распределения интенсивности, формируемые изготовленными ДОЭ. В рабочее поле намеренно

введен признак (пропуск одного кольца посередине, рисунок 6а), позволяющий при обработке изображений безошибочно пронумеровать световые полосы.

На основе предложенного метода разработаны и созданы системы контроля геометрических параметров дистанционирующих решёток («Решетка-Н», 2 шт.). Разработанная система с января 2009 г. находится в эксплуатации в ПАО «НЗХК», г. Новосибирск. За это время системой проконтролировано несколько тысяч дистанционирующих решеток. Эксплуатация системы «Решетка-Н» позволила, используя методы статистического регулирования, стабилизировать технологический процесс изготовления ДР и уменьшить количество доработок в изделиях, и соответственно повысить рентабельность производства.

#### 4. Контроль плоскостности керамических изделий

Изделия из керамики в настоящее время широко используются во многих отраслях промышленности. Зачастую керамические изделия изготавливаются с высокой точностью, с допусками порядка десятых и сотых долей миллиметра. Ввиду технологических свойств материала такие детали подвергаются 100% размерному контролю, как правило, контактными средствами. Контакт измерительного инструмента с керамикой приводит к его быстрому износу, и, соответственно, к значительным экономическим потерям. Задача бесконтактного размерного контроля керамических изделий является весьма актуальной. Для решения поставленной задачи в интересах отечественных предприятий в КТИ НП СО РАН был разработан ряд оптико-электронных систем для бесконтактного контроля размеров изделий из керамики: керамических колец, высоковольтных изоляторов, бронепластин и бронероликов [10,11]. Размерный контроль осуществляется посредством использования теневого метода и метода структурного освещения.

Для измерения положения и формы торцевых поверхностей используется структурное освещение в виде набора световых линий. В качестве формирователя такого освещения применен ДОЭ, ход лучей которого показан на рисунке 7. Если на известном расстоянии с противоположных сторон объекта расположить два ДОЭ, то возможно определить толщину изделия.

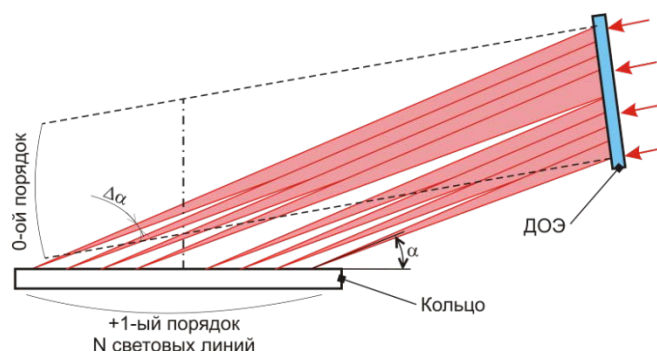


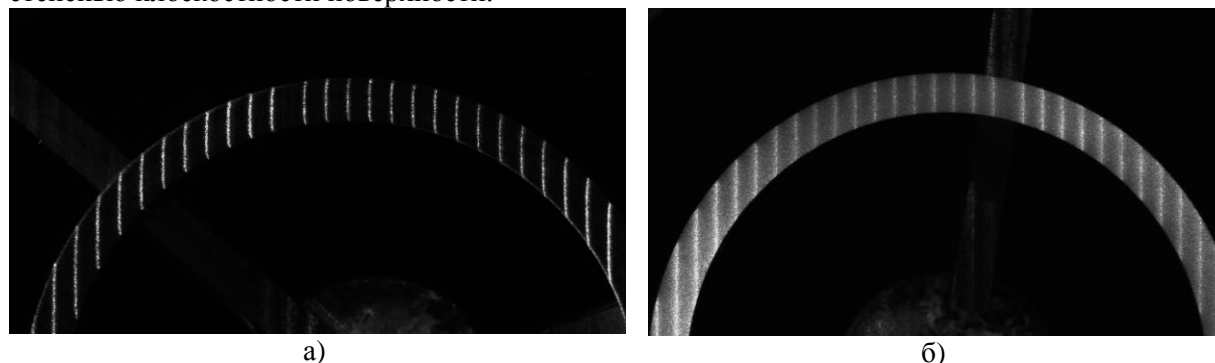
Рисунок 7. Формирование структурного освещения.

ДОЭ фокусирует падающее на него лазерное излучение в систему из  $N$  световых линий с шагом 1 мм. При этом для обеспечения равных условий во всем диапазоне измерений угол падения лучей  $\alpha$  и угловая апертура  $\Delta\alpha$  для каждой линии одинаковы. Геометрия освещения выбрана таким образом, чтобы нулевой порядок дифракции уходил в сторону от измерительной позиции. Для правильной идентификации полос структурного освещения в формируемую картину введен признак – увеличен до 1,5 мм интервал между световыми линиями в середине. При обработке этот признак выявляется с помощью корреляционного алгоритма, и от него производится нумерация всех полос.

ДОЭ изготавливались с помощью круговой лазерной записывающей системы CLWS-300С/М [12] в бинарном фазовом варианте исполнения (дифракционная эффективность около 40%).

При измерении производится вычисление положения центров полос на изображении торцевой поверхности. Найденные значения сравниваются с эталонным положением полос,

полученным при калибровке установки с использованием калибра в виде плитки с высокой степенью плоскостности поверхности.



**Рисунок 8.** Примеры изображений: а) изображение полос структурного освещения на металлизированном кольце; б) изображение полос структурного освещения на кольце без металлизации.

В результате проведенных работ созданы, внедрены и активно эксплуатируются системы промышленного контроля керамических колец и бронепластин: «Кольцо» «Кольцо-М», «КБК-1». В основу работы систем положен принцип комплексирования различных оптико-электронных методов измерения размеров: теневого, проекционного, структурного освещения, телевизионного. Системы обладают улучшенными характеристиками по сравнению с существующими и полностью удовлетворяют предъявляемым техническим требованиям: погрешности измерений 5 – 15 мкм (в зависимости от параметра), быстродействие до 1 шт./с. Применение систем в производстве позволяет повысить точность и производительность контроля, снизить трудозатраты, увеличить надежность измерений, убрать "человеческий фактор".

## 5. Литература

- [1] Geng, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial / J. Geng // *Adv. Opt. Photon.* – 2011. – Vol. 3(2). – P. 128-160. DOI:10.1364/AOP.3.000128.
- [2] Grosse, M. Fast data acquisition for three-dimensional shape measurement using fixed-pattern projection and temporal coding / M. Grosse, M. Schaffer, B. Harendt, R. Kowarschik // *Opt. Eng.* – 2011. – Vol. 50(10). – P. 100503-1-100503-3. DOI:10.1117/1.3646100.
- [3] Zhao, Y. 3D mouse shape reconstruction based on phase shifting algorithm for fluorescence molecular tomography imaging system / Y. Zhao, D. Zhu, R. Baikejiang, C. Li // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54(32). – P. 9573-9582. DOI:10.1364/AO.54.009573.
- [4] Steckenrider, J.J. High-resolution moiré interferometry for quantitative low-cost, real-time surface profilometry / J.J. Steckenrider, J.S. Steckenrider // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54(28). – P. 8298-8305. DOI:10.1364/AO.54.008298.
- [5] Finogenov, L.V. 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffraction optical elements / L.V. Finogenov, Yu.A. Lemeshko, P.S. Zav'yalov, Yu.V. Chugui // *Measurement Science and Technology.* – 2007. – Vol. 18(6). – P. 1779-1785. DOI: 10.1088/0957-0233/18/6/S18
- [6] Zavyalov, P.S. DOE application for the inspection of prolonged cylindrical channels / P.S. Zavyalov, V.G. Nikitin, A.R. Sametov, L.V. Finogenov, Yu.V. Chugui // *Diffraction Optics*, 2003. – P. 44-45.
- [7] Сойфер, В.А. Методы компьютерной оптики / Ред. В. А. Сойфер. – Москва: Физматлит, 2000. – 688 с.
- [8] Zavyalov, P. 3D Hole Inspection Using Lens with High Field Curvature / P. Zavyalov // *Measurement science review.* – 2015. – Vol. 15(1). – P. 52 -57. DOI: 10.1515/msr-2015-0008.
- [9] Завьялов, П.С. 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 // Автометрия. – 2008. – Т.44, № 2. – С. 23-31.
- [10] Белобородов, А.В. Оптико-электронный контроль керамических колец / А.В. Белобородов, А.А. Гущина, П.С. Завьялов, Е.С. Сенченко, Л.В. Финогенов, Ю.В. Чугуй // Датчики и системы. – 2012. – Т. 4. – С. 25-29.
- [11] Завьялов, П.С. Оптико-электронный контроль керамических изделий / П.С. Завьялов, Л.В. Финогенов, Е.С. Жимулева, Д.Р. Хакимов, К.И. Савинов // Датчики и системы. – 2016. – №8-9. – С. 64-72.
- [12] Верхогляд, А.Г. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А.Г. Верхогляд, М.А. Завьялова, А.Е. Каличкин, С.А. Кокарев, В.П. Корольков // Датчики и системы. – 2015. – Т. 9-10. – С. 45-52.

## Using diffractive optical elements to inspection the geometric parameters of industrial products

P. Zavyalov<sup>1</sup>, E. Zhimuleva<sup>1</sup>, L. Finogenov<sup>1</sup>, M. Kravchenko<sup>1</sup>, M. Savchenko<sup>1</sup>, V. Karlin<sup>1</sup>, A. Beloborodov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technology and Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, Russian 41, Novosibirsk, Russia, 630058

**Abstract.** This paper presents systems for controlling the geometric parameters of industrial products. The systems are developed on the basis of the structural light method. The illuminating structure is formed by means of diffractive optical elements. The objects of control are: fuel pellets, fuel elements, spacer grids, ceramic rings. Diffraction optical elements used in the work are focusers in a set of rings, a set of light lines. To control cylindrical objects, the focuser is placed in an arc, focus of which coincides with the element of cylinder.

**Keywords:** diffractive optical element, light ring, determination of the defects depth, multicircular focusers.