

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК**

*Евгений Владимирович Власов*

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник, тел. (383) 306-59-40, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

*Петр Сергеевич Завьялов*

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, тел. (383) 306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

*Марк Владимирович Савченко*

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, программист, тел. (383) 306-59-40, e-mail: savchenko\_mark@bk.ru

В данной работе рассматривается высокопроизводительная система контроля перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок (ТВС), принцип работы которой основан на теневом методе измерений. Разработанный телецентрический объектив с большим полем зрения (250 мм) позволяет получать за один кадр изображение всей решетки с высокой степенью ортоскопичности. Созданы алгоритмы обработки изображений перемешивающих решеток для вычисления их геометрических параметров.

**Ключевые слова:** система технического зрения, перемешивающие решетки, обработка изображений, теневой метод контроля

## **OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR INSPECTION OF GEOMETRY OF MIXING GRIDS OF FUEL ASSEMBLIES**

*Evgeny V. Vlasov*

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383) 306-59-40, e-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

*Petr S. Zavyalov*

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, phone: (383) 306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

*Mark V. Savchenko*

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Programmer, phone: (383) 306-59-40, e-mail: savchenko\_mark@bk.ru

In this paper, a high-performance inspection system for mixing grids of fuel assemblies is considered. The operating principle is based on the shadow measurement method. The developed telecentric lens with a large field of view (250 mm) makes it possible to obtain an image of the whole

grid with a high degree of orthoscopy in one frame. Algorithms for processing images of mixing grids for calculating their geometric parameters have been developed.

**Keywords:** vision system, mixing grids, image processing, shadow inspection method

### *Введение*

При производстве тепловыделяющих сборок (ТВС) достижение высоких характеристик надёжности при эксплуатации ядерных реакторов в течение предусмотренных регламентом 12-18 месячных топливных циклов обеспечивается путем поддержания на соответствующем уровне технологий производства. При контроле геометрических параметров компонентов ТВС предъявляются все более жесткие требования к точностям измерений. Одним из ответственных компонентов ТВС являются перемешивающие решетки (ПР), расположенные между дистанционирующими решетками, изготавливаемые из циркония или нержавеющей стали (рис. 1) [1-3]. В одной ТВС установлены порядка 4-5 ПР. Поднятие мощности реактора чревато различными побочными эффектами, главный из них – кипение теплоносителя, что представляется очень опасным явлением. В этом случае возникает риск разрушения оболочки твэла. Такое явление называется кризисом теплообмена, который нельзя допускать. По этой причине необходимо сдвинуть момент наступления кризиса в область более высокого теплового потока, тогда можно будет использовать полученный запас для повышения мощности. Для улучшения теплообмена между поверхностью твэла и теплоносителем, а также удаления паровой пленки с поверхности стенок твэлов разработаны два типа перемешивающих решеток: «Прогонка» и «Вихрь». Они служат для оттока горячего теплоносителя от тепловыделяющих элементов и выравнивания энтальпии в активной зоне реактора между менее нагруженными и более нагруженными областями в конструкциях ТВС, что крайне важно для обеспечения необходимого теплового режима их функционирования [4].

На данный момент контроль таких параметров, как диаметры и позиционные отклонения ячеек перемешивающих решёток, на отечественных предприятиях осуществляют как контактными способами с использованием калибров и координатно-измерительных машин (КИМ), так и бесконтактными с использованием оптических средств, основанных на оптическом методе структурного освещения [5]. За рубежом для этих целей используют в основном КИМ в режиме выборочного контроля. Однако контроль контактным способом с использованием калиброванных цилиндров и шариков не выдает всей требуемой информации о геометрии решеток. Более того, субъективный характер контроля (наличие человеческого фактора) приводит к появлению существенной погрешности измерения. Применение же КИМ с использованием контактных датчиков связано с большими затратами времени (например, для измерения всех ячеек ПР требуется более 5–6 часов).

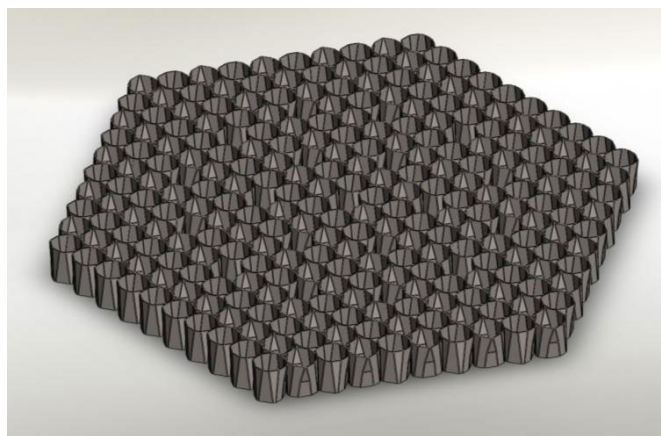


Рис. 1. Трехмерная модель ПР типа «Прогонка»

### *Методы и материалы*

Для обеспечения требуемого быстродействия контроля (порядка 2 минут на одно изделие), основной задачей является получение изображения всех ячеек ПР за один кадр. Для этого необходимо иметь в распоряжении объектив с полем зрения, не меньшим чем размеры диагонали решетки, составляющей порядка 250 мм [6].

Основные параметры, подлежащие контролю, следующие: диаметры основных ячеек (от 10 до 12 мм) и отверстие под канал (от 12 до 15 мм). Допустимая погрешность измерения не должна превышать 30 мкм для определения диаметров и не более 70 мкм для расчёта позиционных отклонений центров ячеек.

На основе теневых методов измерений [7, 8] в КТИ НП СО РАН была изготовлена установка «Решетка-Т», предназначенная для оперативного контроля ПР. Оптико-электронный блок установки, показанный на рис. 2, осуществляет управление работой осветителя, считывание информации с камеры и её последующую аппаратно-цифровую обработку с целью определения размеров объекта [9, 10]. Оптическая схема состоит из светодиодного осветителя, коллимирующего объектива и фотоприёмного модуля – телецентрического проецирующего объектива [11] и цифровой камеры SP-20000M с разрешением  $5120 \times 3840$  пиксел, обеспечивающей получение изображения с частотой 16 кадров в секунду.

В качестве источника света в установке используется сверхяркий светодиодный кластер SSR-90-R-R11-НН100 Luminus (диапазон длин волн 619-623 нм). Коллимирующий объектив формирует параллельный световой пучок, который полностью освещает ПР. Подсвеченная контролируемая поверхность ПР проецируется с помощью телецентрического объектива на фотоприёмную матрицу камеры. Технические характеристики объектива следующие: увеличение – 0,097 крат, фокусное расстояние – 1500 мм, рабочий диапазон длин волн – 610÷660 нм, диаметр линейного поля зрения – 250 мм, рабочее относительное отверстие – 1/7, максимальная нетелецентричность в пространстве предметов  $-0,019^\circ$ , максимальная дисторсия – 0,04%. Изображение с камеры передается в компьютер, где производится обработка полученного изображения.

Решение о годности измеряемого изделия принимается исходя из анализа отклонений измеренных параметров от номинальных величин.

Установка измеряет и контролирует следующие параметры перемешивающих решёток: диаметры вписанных окружностей в ячейки и отверстия под канал (погрешность не более чем 0,03 мм); позиционные отклонения центров вписанных окружностей в ячейки и в отверстия под канал (погрешность менее 0,07 мм). Система определяет наличие/отсутствие ячейки в месте расположения отверстия под канал, а также правильность ориентации ячеек. Время контроля одного изделия составляет не более 2 минут.



Рис. 2. Функциональная схема и общий вид установки «Решетка-Т»

Одной из основных задач при обработке полученных теневых изображений является выравнивание равномерности освещенности. Для её решения на этом этапе осуществляется коррекция полученного кадра по предварительно сформированным кадрам с яркой засветкой и при отсутствии освещённости. При этом на кадре с отсутствующим объектом измерения нормируется освещенность изображения по всему полю изображения. Таким образом, убирается так называемый «колокол», возникающий из-за затемнения отдельными деталями приемного объектива и неравномерной засветки рабочей области осветителем. Такая опера-

ция позволяет определить максимальный ( $I_{max}=1$ ) и минимальный ( $I_{min}=0$ ) уровень освещенности по всему полю измерения.

На следующем этапе производится коррекция дисторсионных искажений поля измерения. Для этой цели используется специальная юстировочная пластина (рис. 3), с помощью которой вычисляется дисторсия по полю по двум координатам  $x$  и  $y$ , и в соответствии с ней производится смещение каждой точки поля. Коррекция производится для учёта остаточных аберраций кадра полученного изготовленным объективом (основным источником искажений являются преимущественно дисторсии, т.к. именно они влияют на максимальное изменение положения точки по полю при обработке). Юстировочная пластина представляет собой изделие из металла с отверстиями в виде малых кружков диаметром 1,5 мм, расположенных по всему полю в пределах диаметра пластины (255 мм) с шагом 3 мм (фрагмент чертежа на рисунке).

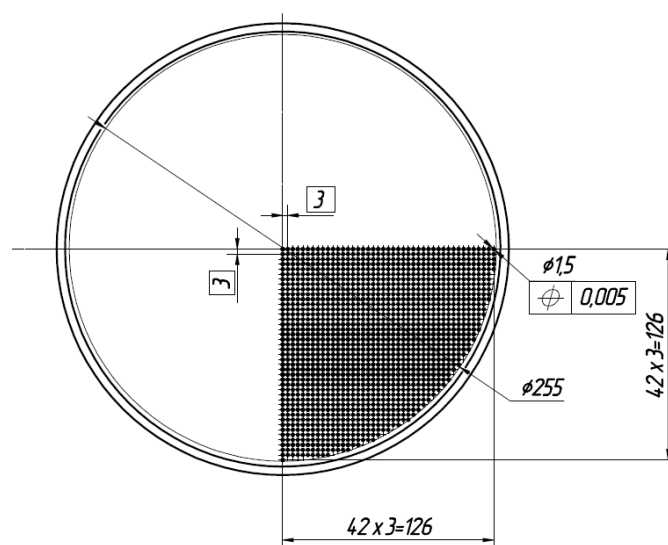


Рис. 3. Юстировочная пластина

Далее производится радиальное сканирование всех ячеек и отверстий под канал из некоторых номинальных центров (по чертежу). На каждом направлении сканирования полученный профиль интенсивности света аппроксимируется прямой в линейной области перехода света и тени, и по пороговому методу обработки определяется положение точки на пограничной кривой, в которой интенсивность имеет промежуточное значение, соответствующее истинному положению края элемента. Таким образом, после завершения радиального сканирования определяются контуры всех ячеек.

Для определения радиуса вписанной в контур ячейки окружности можно использовать два метода: метод поиска минимального диаметра и метод поиска вписанной окружности максимального радиуса. Первый из них позволяет находить радиус быстро ценой точности вычислений, второй обеспечивает высокую точность при большем времени вычислений.

Метод поиска минимального диаметра предусматривает анализ пар противоположных друг другу радиусов для нахождения минимального диаметра. В качестве радиусов берутся расстояния от точек контура ячейки до точки, принятой в качестве центра ячейки. Так как форма ячеек содержит выступающие части, которые расположены в предсказуемых местах, то для уменьшения количества радиусов, которых необходимо проверить, определенные части контура ячеек исключены из проверки.

Суть метода поиска вписанной окружности максимального радиуса состоит в переборе всех возможных пар точек контура ячейки, при этом каждая пара соответствует одной вписанной окружности. Для каждой окружности проверяется, находится ли она внутри контура ячейки, или нет. Радиус самой большой из вписанных окружностей и является искомым радиусом. Проверка нахождения окружности внутри контура подразумевает проверку расположения каждой точки контура относительно окружности, и если хотя бы одна точка расположена внутри этой окружности, то такая окружность не является описанной. Данный алгоритм обладает  $O(N^2 \times (N + 1) / 2)$  сложностью для одной ячейки, что делает практически невозможным его применение для обработки в разумные сроки, в результате чего было решено от него отказаться.

Вычисление геометрических параметров ячеек производится следующим образом. По полученному теневому изображению ПР (фрагмент изображения приведен на рис. 3) вычисляются координаты центров тяжести всех ячеек  $O_{цт}(X_{цт}, Y_{цт})$ . Находятся точки пересечения лучей, исходящих из центров тяжести, с краями ячеек  $P_{цтi}(X_{цтi}, Y_{цтi})$ . Методом наименьших квадратов по точкам  $P_{цтi}(X_{цтi}, Y_{цтi})$  определяются центры окружностей  $O_c(X_c, Y_c)$ , вписанных в ячейки. Далее находятся точки пересечения лучей, исходящих из точек  $O_c(X_c, Y_c)$ , с краями ячеек  $P_i(X_i, Y_i)$ .

Минимальное расстояние от  $O_c(X_c, Y_c)$  до  $P_i(X_i, Y_i)$  является искомым радиусом вписанных в ячейки окружностей.

Методом наименьших квадратов также производится оптимизация положения решетки. Так как отверстия под канал являются базовыми и определяют положение ПР в координатах всей ТВС, то при контроле позиционного отклонения расположения ячеек номинальная сетка приводится к осям отверстий под канал так, чтобы среднее позиционное отклонение расположения этих отверстий было минимальным.

Используя координаты центров ячеек по чертежу, вычисляются отклонения положений центров ячеек  $O_c(X_c, Y_c)$  от номинальных значений.

Исходя из анализа отклонений измеренных параметров от номинальных величин, принимается решение о годности измеряемого образца.

### ***Результаты***

В статье приведены результаты разработки промышленной установки для высокопроизводительного контроля геометрии перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок. Описаны алгоритмы обработки теневых изображений на

предмет вычисления геометрических параметров ячеек и их позиционного отклонения от номинального расположения. Результаты обработки в реальном времени полученных изображений показали высокую достоверность результатов контроля: она составила не менее 95%. Время контроля одного изделия не превышает 2 минут. Установка «Решетка-Т» находится на стадии ввода в опытную эксплуатацию на Новосибирском заводе химконцентратов.

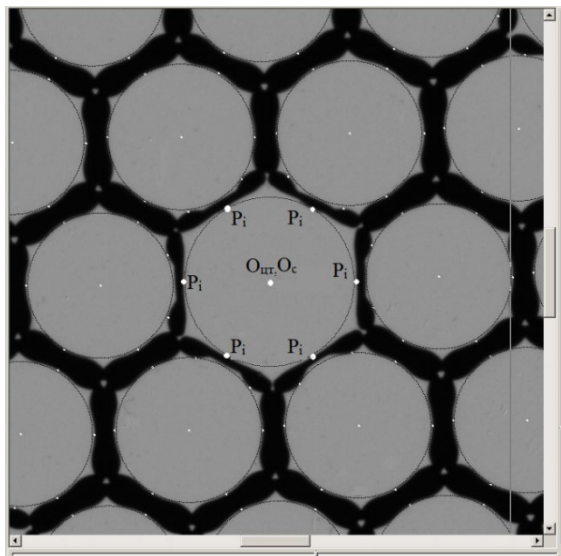


Рис. 4. Фрагмент обработанного изображения ПР

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артемьев В. К. Обзор некоторых достижений в области экспериментально-расчетных исследований повышения эффективности решеточных интенсификаторов теплообмена в ТВС / В. К. Артемьев, Н. В. Гусев, Ю. Н. Корниенко, Е. В. Корниенко // Россия, Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского. – 2008. – 16 с.

2. Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора [Текст]: заявка РСТ/RU2009/000080 /Самойлов О. Б., Романов А. И., Кайдалов В. Б., Фальков А. А., Симановская И. Е., Кострицын В. А., Евстигнеев И. В. патентообладатель: ОАО «Машиностроительный завод», патент WO 2010030207 A1, заявл. 19.02.2009; опубл.18.03.2010.

3. Селиванов Ю. Ф. Влияние перемешивающих решёток типа «Вихрь» на критическую мощность ТВС ВВЭР / Ю. Ф. Селиванов, Р. С. Пометько, С. Е. Волков // Третья международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ–2014). – г. Москва, 7-10 октября 2014 г.

4. Лисенков Е. А. Исследование перемешивания однофазного теплоносителя на модели ТВС-2М с перемешивающими решетками / Е. А. Лисенков, С. М. Лобачев, Ю. А. Безруков, А. В. Селезнев // ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия. – 2013. – 10 с.

5. Beloborodov A. V., Chugui Yu. V., Finogenov L. V., Guschina A. A., Lemeshko Yu. A., Zavyalov P. S. 3D Inspection of Fuel Assembly Components // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 437. – P. 155–159.

6. Senchenko E. S. Nuclear fuel assemblies' deformations measurement by optoelectronic methods in cooling ponds / E. S. Senchenko, P. S. Zavyalov, L. V. Finogenov, D. R. Khakimov // Proceedings of SPIE. – 2013. – Vol. 9066.

7. Chugui Yu. V. High Precision Algorithms for 3D Objects Shadow Inspection in Partially Coherent Light / Yuri V. Chugui and Elena S. Senchenko // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 613. – P. 151–156.

8. Senchenko E. S. Shadow Inspection of 3D Objects in Partially Coherent Light / E. S. Senchenko, Yu. V. Chugui // Measurement Science Review. – 2011. – Vol. 11. – No. 4. – P. 104–107.

9. Данилевич Ф. М. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов: справочное пособие / Ф. М. Данилевич, В. А. Никитин, Е. П. Смирнова. – Л., Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976. – 256 с.

10. Бубис И. Я. Справочник технолога-оптика: справочник / И. Я. Бубис, В. А. Вейнденбах, И. И. Духопел и др.; под общ. ред. С. М. Кузнецова и М. А. Окатова. – Л. Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 414 с., ил.

11. Телецентрический в пространстве предметов объектив. Заявка на получение патента на изобретение №: 2016115311 [Текст]: Завьялов П. С., Сенченко Е. С., патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, дата приор. 19.04.2016.

© *Е. В. Власов, П. С. Завьялов, М. В. Савченко, 2021*