

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.786.23/24 : 621.039

**О. И. Битюцкий, В. В. Вертопрахов, А. А. Гушина, М. Г. Зарубин,
П. И. Лавренюк, В. И. Ладыгин, Ю. К. Карлов, К. И. Кучинский,
Ю. В. Пименов, С. В. Плотников, В. В. Рожков, И. Г. Чапаев,
В. М. Чернышов, Ю. В. Чугуй, В. П. Юношев**

(Новосибирск)

**ТРЕХМЕРНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Для обеспечения высокой надежности тепловыделяющих сборок атомных реакторов предъявляются жесткие требования к геометрическим параметрам дистанционирующих решеток. Они определяют заданное расположение пучка тепловыделяющих элементов в поперечном и продольном направлениях тепловыделяющих сборок, что крайне важно для исключения их коррозии и обеспечения требуемого теплового режима функционирования. Разработана и создана лазерная измерительная машина с использованием метода многоточечного структурного освещения для обеспечения 100-процентного трехмерного контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток российских атомных реакторов ВВЭР-1000. Представлены метод измерения, аппаратные и программные средства лазерной измерительной машины (ЛИМ). Приводятся и обсуждаются результаты испытания ЛИМ в производственных условиях.

Введение. Для обеспечения высокой надежности и безопасности атомных электростанций в современных условиях предъявляются жесткие требования к качеству атомных реакторов [1]. Производимое в России корпорацией ОАО «ТВЭЛ» оборудование для атомных электростанций, как известно, базируется в основном на двух реакторах на тепловых нейтронах с водяным охлаждением ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 [2, 3]. Их базовым компонентом является тепловыделяющая сборка (ТВС) гексагональной формы, которая содержит несколько сотен тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) (диаметром более 9 мм и длиной от 2,5 до 4 м) и несущий каркас. Дистанционирующая решетка выполнена в виде сотовой структуры, в ячейках которой помещаются ТВЭЛы. С помощью таких решеток задается требуемое строго дистанционное расположение пучка ТВЭЛ в поперечном и продольном сечениях (по высоте ТВС), что крайне важно для обеспечения необходимого теплового режима функционирования ТВС. Надежность ТВС во многом зависит от геометрических параметров дистанционирующих решеток. Так, если

диаметр ячейки меньше требуемого (по чертежу), то может произойти повреждение поверхности оболочки ТВЭЛ, что впоследствии приведет к ее коррозии. В случае же, когда диаметр ячейки слишком велик, может иметь место вибрация ТВЭЛ внутри ячейки во время работы реактора, способная вызвать эффекты фреттинг-коррозии.

Кроме того, при отклонении относительного положения ТВЭЛов в ТВС от номинального возникают их локальные перегревы, которые приводят к преждевременному выходу из строя всей ТВС. Локальные перегревы появляются также в местах дефектов на поверхности ТВЭЛов, образующихся, например, при сборке кассет с использованием дистанционирующих решеток, и ТВЭЛов, не удовлетворяющих допускам по геометрическим размерам. Вот почему 100-процентному трехмерному (3D) контролю подлежат конфигурации отверстий ячеек и направляющих каналов дистанционирующих решеток, расстояния между соседними ячейками и размеры «под ключ», характеризующие габаритные размеры ТВС. Эта операция является неотъемлемой частью технологического процесса производства ТВС и должна выполняться в темпе технологического конвейера (время контроля должно быть менее 0,5 ч).

Среди существующих бесконтактных средств 3D-контроля наиболее перспективными являются оптические на основе стереопроцирования, поточечного сканирования поверхности объекта, метода структурного освещения и т. д. [4, 5]. В последнее время для автоматических 3D-измерений широко используется метод структурного освещения. Он основан на освещении объекта пучком света известной конфигурации (линия, решетка и т. д.), записи изображения ПЗС-камерой и обработке информации. Форма и геометрические параметры поверхности объекта внутри измерительного объема $D_x \times D_y \times D_z$ восстанавливаются при помощи набора поперечных сечений объекта. Поскольку применение традиционного метода структурного освещения сталкивается с проблемами, касающимися формирования требуемой световой структуры, восприятия и обработки оптического изображения (разд. 2), нами на его основе разработан модифицированный метод 3D-контроля [6]. Этот метод позволяет быстро и бесконтактно выполнять автоматически 3D-измерения многих объектов. Он был применен в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения (КТИ НП) СО РАН, специализирующемся в области оптических измерительных и лазерных технологий, при разработке лазерной измерительной машины (ЛИМ) для 3D-бесконтактного контроля геометрических параметров дистанционирующих решеток атомного реактора ВВЭР-1000 [7].

В работе приведены технические требования к устройству 3D-контроля дистанционирующих решеток (разд. 1), описаны сущность предложенного метода (разд. 2), структура и программное обеспечение лазерной измерительной машины (разд. 3, 4), а также экспериментальные результаты тестирования в ОАО «НЗХК» (разд. 5).

1. Технические требования к ЛИМ. Рассмотрим более подробно суть измерительной задачи. С этой целью обратимся к объекту контроля. На рис. 1 показан общий вид ТВС для реактора ВВЭР-1000. Каркас состоит из центральной трубы, 13 или 18 (в зависимости от модели) направляющих каналов и закрепленных на них дистанционирующих решеток, равномерно распределенных по высоте ТВС. Вид решетки для реактора ВВЭР-1000 показан на рис. 2. Каждая решетка состоит из 312 или 317 ячеек (общее число ячеек и направляющих каналов равно 331). Каждая ячейка решетки представляет со-

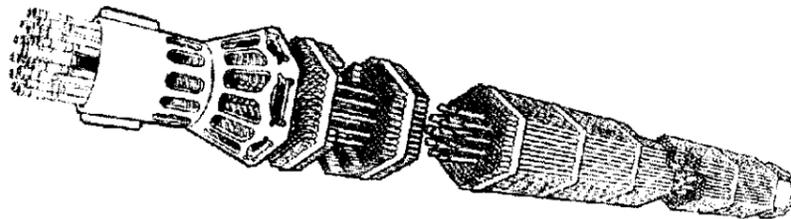


Рис. 1. Вид топливной сборки реактора ВВЭР-1000

бой полую тонкостенную интегральную призму высотой 20 мм с тремя цилиндрическими выступами в направлении центра ячейки (рис. 3, а). Образуемый в процессе сборки «натяг» в соединении ячейка–ТВЭЛ (за счет выступов ячейки) формирует и удерживает ТВЭЛ в заданном положении как в процессе транспортно-технологических операций, так и при эксплуатации ТВС. Измерительная машина должна контролировать следующие параметры дистанционирующих решеток (рис. 3, б): диаметры $D_c^{(n)}$ ячеек, формируемые их выступами, т. е. диаметры вписанных окружностей ячеек (номинальный размер $D_{c, ном} = 8,9$ мм); диаметры $D_{ch}^{(m)}$ вписанных окружностей под направляющие каналы (номинальный размер $D_{ch, ном} = 12,9$ мм); расстояния $L^{(k)}$ между соседними ячейками, т. е. расстояния между центрами вписанных окружностей в ячейках (номинальный параметр $L_{ном} = 12,75$ мм); сдвиги центров вписанных окружностей для ячеек относительно параметров чертежа дистанционирующей решетки $S^{(q)}$ (сдвиги позиционирования); размеры под ключ $B^{(n)}$, характеризующие габаритные размеры ТВС (номинальные размеры $B_{1, ном} = 234$ и $B_{2, ном} = 233,5$ мм).

В данном случае для дистанционирующей решетки ВВЭР-1000 параметры следующие: $1 \leq n \leq 312$ (или 317); $1 \leq m \leq 19$ (или 14); $1 \leq q \leq 331$; $1 \leq p \leq 3$; $1 \leq k \leq K$, где K определено общим числом расстояний между соседними ячейками для дистанционирующей решетки.

Машина должна обеспечить измерение геометрических параметров дистанционирующих решеток: $D_c^{(n)}$, $D_{ch}^{(m)}$, $L^{(k)}$, $S^{(q)}$, $B^{(n)}$ с погрешностями, не превосходящими следующие предельные значения: $\Delta D_c = \pm 0,03$, $\Delta D_{ch} = \pm 0,05$, $\Delta L = \Delta S = \pm 0,04$, $\Delta B = \pm 0,1$ мм.

Что касается такого важного параметра, как время контроля дистанционирующих решеток, определяющего производительность ЛИМ, то оно не должно превышать 0,5 часа. Существующие контактные координатно-измерительные машины не обеспечивают требуемой производительности, и в КТИ ИП СО РАН была разработана и создана специализированная лазерная измерительная машина для решения такой задачи.

Существенно, что для вычисления, например, параметра d необходимо знать конфигурацию отверстия ячейки



Рис. 2. Вид дистанционирующей решетки реактора ВВЭР-1000

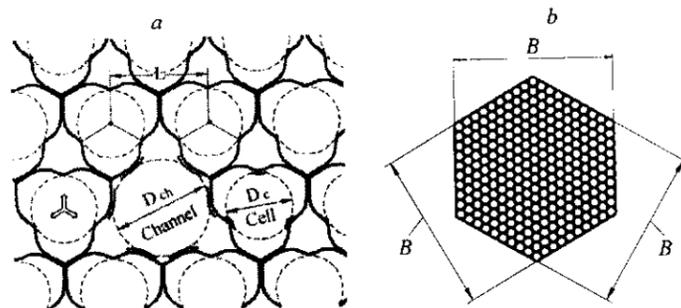


Рис. 3. Геометрические параметры дистанционирующей решетки при контроле: фрагмент ячейки и зоны направляющего канала (а), общая размерная конфигурация (б)

(по ее высоте), используя информацию о геометрии трех указанных цилиндрических выступов и их расположении в пространстве. Естественно, это требует получения достаточно большого объема 3D-информации для каждой ячейки дистанционирующей решетки. Указанное справедливо и для канальных отверстий. В этом случае, однако, задача сильно усложняется: параметр вписанной окружности D вычисляется исходя из геометрии и расположения в пространстве шести цилиндрических выступов. Расчеты показывают, что для получения достоверной информации о конфигурации каналов под ТВЭЛы необходимо иметь информацию о выступах не менее чем в 12 сечениях по высоте дистанционирующей решетки.

2. Метод многоточечного структурного освещения. Рассмотрим детально некоторые особенности традиционных методов структурного освещения для 3D-измерений. Во-первых, эти методы должны обеспечивать требуемую глубину фокусировки структурного светового поля. Это означает, что световое поле должно сохранять свои параметры при распространении света вдоль оси Z в измеряемом объеме. Во-вторых, поскольку интенсивность света, рассеянного различными частями объекта, может отличаться на несколько порядков величин, то камера не может одновременно записывать все части информативного объекта с одинаковым качеством. Наконец, возникает проблема идентификации пар точка объекта – точка изображения при обработке изображения. Например, при использовании структурного освещения в виде одномерной решетки анализируемое окаймленное изображение объекта с гладкой поверхностью приводит к неопределенности идентификации полей, т. е. к значительным трудностям (а в некоторых случаях невозможности) установления связи между каждой полосой изображения и соответствующей полосой структурного светового поля. Таким образом, пространственное положение объекта и/или его форма не могут быть определены однозначно. Устранить этот недостаток можно путем последовательного освещения объекта световыми решетками с различными периодами и последующей обработкой всех полученных изображений объекта. Однако это связано с большими временными затратами по восстановлению 3D-объекта. Нами предложен модифицированный метод 3D-контроля с использованием многоточечного структурного освещения [6], который лишен указанных выше недостатков.

Принцип измерения представлен на рис. 4. Многоточечное структурное освещение задается в виде матрицы, состоящей из двумерного (2D) набора лазерных пучков (рис. 4, а), которые могут быть сформированы с помощью



киноформных элементов, например с помощью двух скрещенных решеток Дамманна [8]. Распределение интенсивности света $J(\xi, \eta)$ в точечном структурированном освещении представляет собой совокупность гауссовых пучков одинаковой интенсивности:

$$J(\xi, \eta) \sim A \sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{j=-M/2}^{M/2} \exp \left\{ -\frac{(\xi - i\Delta_\xi)^2 + (\eta - j\Delta_\eta)^2}{\sigma^2} \right\}, \quad (1)$$

где ξ, η – координаты поперечных сечений лазерных пучков; N, M – количество гауссовых пучков вдоль ξ и η соответственно; Δ_ξ, Δ_η – расстояния между центрами пучков; σ – полуширина гауссовых пучков, $\sigma \ll \Delta_\xi, \sigma \ll \Delta_\eta$. В этом случае во всем диапазоне $D_x \approx N\Delta_\xi, D_y \approx M\Delta_\eta$ имеет место однородное освещение в опорных точках и поэтому не наблюдается заметных отличий интенсивностей падающих пучков в центре и на периферии. Благодаря малой расходимости лазерных пучков обеспечивается требуемый измерительный объем по глубине $D_z \approx D_y \approx D_x$.

Для того чтобы преодолеть неопределенность при нахождении положения и формы объекта, вводится сингулярность в структуру матрицы лазерного пучка в виде сбой периода: $j \neq 0$ (см. выражение (1)). Параллельные лазерные пучки создают пятна света как на объекте, так и изображении, зарегистрированном ПЗС-камерой. Сингулярный (пустой) слой позволяет идентифицировать световые пятна относительно световых пучков. Один из двух падающих и наблюдаемых пучков (t_1 и t_0), уравнения которых известны, всегда может определять параметры 3D-сегмента, соответствующего минимальному расстоянию между пучками. Центр сегмента соответствует освещенной точке на поверхности объекта, тогда как длина сегмента определяется параметрами многоточечной системы.

При 3D-контроле ячеек дистанционирующей решетки, состоящей из трех выступов (рис. 4, б), которые аппроксимированы цилиндрическими сегментами, требуется наличие трех матриц лазерных пучков (для простоты показана одна матрица света). В случае использования метода многоточечного структурного освещения нами разработана лазерная измерительная машина для контроля 3D-пространственных решеток.

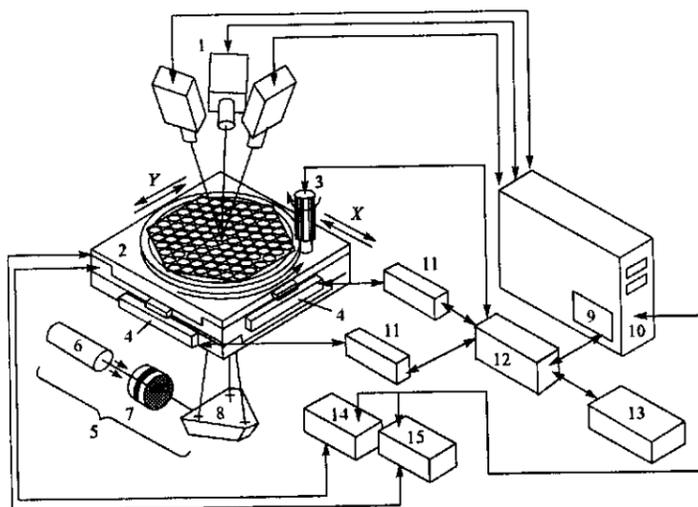


Рис. 5. Блок-схема лазерной измерительной машины: 1 – измерительная оптическая головка; 2 – X-Y-стол; 3 – шаговый двигатель; 4 – преобразователи линейных перемещений фотоэлектрические; 5 – модуль осветителя; 6 – лазер, 7 – решетка Дамманна, 8 – призма; 9 – устройство сбора и обработки информации; 10 – персональный компьютер; 11 – устройства преобразования импульсов; 12 – контроллер функциональный; 13 – блок питания; 14, 15 – контроллеры координат X, Y

3. Структурная схема ЛИМ приведена на рис. 5, а общий вид ее представлен на рис. 6. Конструктивно ЛИМ выполнена на базовой плите, где размещены измерительный стол с контролируемой дистанционирующей решеткой и арка. Лазерная измерительная машина включает в себя специальную трехканальную лазерно-электронную измерительную головку для восприятия изображений отверстий ячеек и каналов (далее измерительная головка), сканирующий X-Y-стол, электронику и программное обеспечение. Узел осветителя включает лазер, узел решетки Дамманна и специальную призму. Модуль решетки Дамманна состоит из двух скрещенных решеток и предназначен для расщепления лазерного луча на 12×13 дифракционных порядков двумерного светового распределения, которое дальше разделяется призмой на три части с равными интенсивностями.

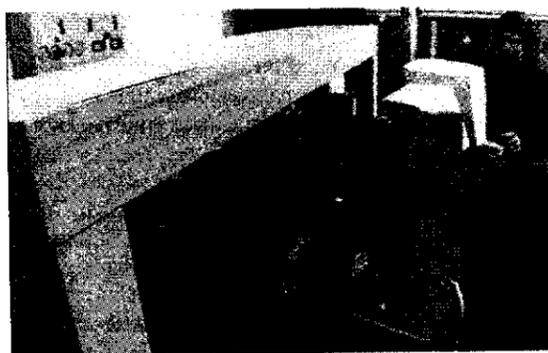


Рис. 6. Вид лазерной измерительной машины

В результате из призмы пучки выходят под углом 120° друг к другу в плоскости XU и каждый пучок – под углом 30° к оси Z . Таким образом, формируются три матрицы из лазерных пучков (с периодами $\Delta_y = 0,2$, $\Delta_z = 0,52$ мм), направленных под углом 30° на три внутренние поверхности контролируемой ячейки. Приемный модуль представляет собой три идентичных проецирующих объектива и три ПЗС-камеры (ХС-77/ВВСЕ). Считанные изображения в цифровом виде передаются в управляющий компьютер через соответствующие видеобуферы SILICON VIDEO MUX.

Измерительный X – Y -стол обеспечивает контролируемое перемещение дистанционирующей решетки в поле зрения оптико-электронного измерительного блока в направлении координат X и Y , а также поворот дистанционирующей решетки в плоскости XU . В качестве измерительного стола выбран двухкоординатный X – Y -стол типа OFL-2121SM со встроенным поворотным устройством. Дистанционирующая решетка устанавливается в обойму поворотного устройства, приводимую в движение шаговым двигателем. Каретки столика приводятся в движение двумя шаговыми двигателями посредством ходовых винтов. Шаговые двигатели, в свою очередь, связаны с управляющими контроллерами координат X и Y модели MCS-ST-48-PS, которые взаимодействуют с компьютером через последовательный порт RS-232. Для контроля величины и направления движения кареток на них конструктивно установлены фотоэлектрические преобразователи линейных перемещений, которые работают в комплексе со стандартными блоками (унифицированными преобразователями импульсов), соединенными с контроллером функциональным.

Контроллер функциональный состоит из двух идентичных плат – устройств сопряжения. Одна из них производит обработку сигналов от блока по координате X и управляет работой шагового двигателя устройства поворотного. Другая обрабатывает сигналы от блока по координате Y . Устройство сбора и обработки информации предназначено для сбора данных с периферийных устройств по двум скоростным последовательным каналам и их предварительной обработки с помощью микроконтроллера INTEL 80C188EB.

4. Функционирование ЛИМ. Программное обеспечение ЛИМ включает: основную программу; программу для анализа статистики, собранной в ходе измерения; программу для устройства сбора и обработки информации.

Основная программа, написанная на языке программирования Microsoft Visual C++ версии 5.0, работает под управлением операционной системы Windows 95/98. Она обеспечивает отображение на экране текущего состояния процессов в удобной для оператора форме. Для взаимодействия с оператором используется оконный графический режим.

В основной программе ЛИМ реализованы два режима: подготовительный и рабочий. В подготовительном режиме (с участием оператора) производятся следующие операции: тестирование основных узлов ЛИМ, ввод параметров контролируемых дистанционирующих решеток и стандартных образцов, калибровка и метрологическая поверка ЛИМ.

Калибровка системы выполняется отдельно для каждого луча из структурного пучка. Рассмотрим единичный луч. Несложно заметить, что образ рассеянного излучения лежит на некоторой прямой в плоскости матрицы видеокамеры. На первом этапе находятся коэффициенты этой прямой в системе координат видеокамеры. Затем по методу наименьших квадратов находим коэффициенты A и B для получения зависимости между координатой пятна

Рис. 7. Изображение ячейки под многоточечным структурным освещением

на матрице видеокамеры и 3D-координаты пятна на поверхности объекта с помощью следующей дробно-рациональной функции:

$$\Delta X = A\Delta\chi(1 + B\Delta\chi)^{-1}$$

(здесь $\Delta\chi$ – смещение образца рассеянного излучения вдоль соответствующей прямой на камере; ΔX – смещение пятна на поверхности контролируемого объекта вдоль луча). Далее, зная параметры луча в пространстве, можно рассчитать 3D-координаты пятна на поверхности.

Режим измерения позволяет автоматически определить геометрические параметры контролируемой дистанционирующей решетки, а также визуализировать результаты измерений по каждому из параметров и выдавать протоколы измерения и контроля в краткой или полной форме.

При измерении элементов дистанционирующей решетки используется следующий алгоритм: позиционирование измеряемого элемента дистанционирующей решетки (границы обода, ячейки или каналные отверстия) относительно системы считывания, передача оцифрованных изображений от трех телекамер в управляющий компьютер, обработка полученных данных. Последняя включает растровую обработку изображения, идентификацию светового пятна и восстановление формы поверхности, используя квадратичную форму трех переменных X, Y, Z . Эти вопросы более подробно изложены в [6]. Пример изображения типичной ячейки, образованного при многоточечном структурном освещении и записанного ПЗС-камерой, представлен на рис. 7. Растровое изображение ячейки, обработанное на компьютере, показано на рис. 8.

Измерение начинается с процедуры определения положения стола. Для этого производится последовательное измерение трех реперных цилиндров, установленных на поворотном узле. Определив их координаты, программа совмещает центр решетки с осью системы считывания. Таким образом определяется начало прямоугольной системы координат, в которой в дальнейшем производятся перемещения и измерения.

Определение размеров под ключ производится в два этапа. Сначала находят координаты нечетных граней обода решетки (по шесть замеров на каждой грани), а затем после поворота решетки на 60° измеряются координаты четных граней, исходя из которых вычисляются требуемые размеры B .

При определении геометрии отверстия под канал производится поворот решетки относительно исходного (базового) положения на 60° и осущест-

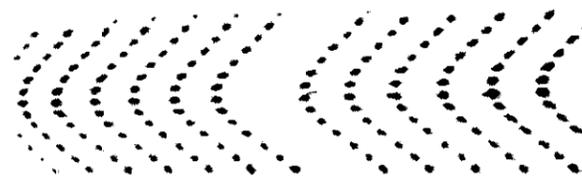


Рис. 8. Растровое изображение ячейки после цифровой обработки

вляется шесть «подъездов» к элементам отверстия. По координатам пятен на поверхностях строятся интерполянты этих поверхностей. Затем в 16 сечениях по вертикали определяются диаметры вписанных окружностей. В качестве результата измерения выбирается минимальный диаметр.

Определение геометрии ячеек осуществляется после поворота решетки в базовое положение и коррекции обратного поворота по реперным цилиндрам. Считывание информации о размере ячейки производится за один переезд в точку, соответствующую центру ячейки по чертежу. После считывания трех изображений цилиндрических поверхностей ячейки анализируется их качество и в случае плохого качества, т. е. при заметном отклонении положения решетки от центра диапазона измерения головки, производится перемещение и повторный ввод изображения с последующим вычислением наименьшего диаметра вписанной окружности.

В рабочем режиме предусмотрены три способа визуализации результатов измерения и контроля. При первом способе происходит отображение диаметров в виде картограммы дистанционирующей решетки с цветовым выделением ячеек и канальных отверстий.

При втором способе визуализации отображаются смещения центров ячеек и канальных отверстий ($S^{(q)}$) в виде картограммы дистанционирующей решетки с векторами, выходящими из центров ячеек и отверстий под канал. Модули векторов и их направления в соответствующем масштабе отображают смещения, а цвет векторов – принадлежность полю допуска. В качестве примера, иллюстрирующего этот режим работы ЛИМ, приведены результаты измерения смещения ячеек $S^{(q)}$ дистанционирующей решетки, которая была искусственно подвергнута сильной деформации (рис. 9). Очевидно, что такая форма отображения может оказаться весьма полезной при анализе качества решетки.

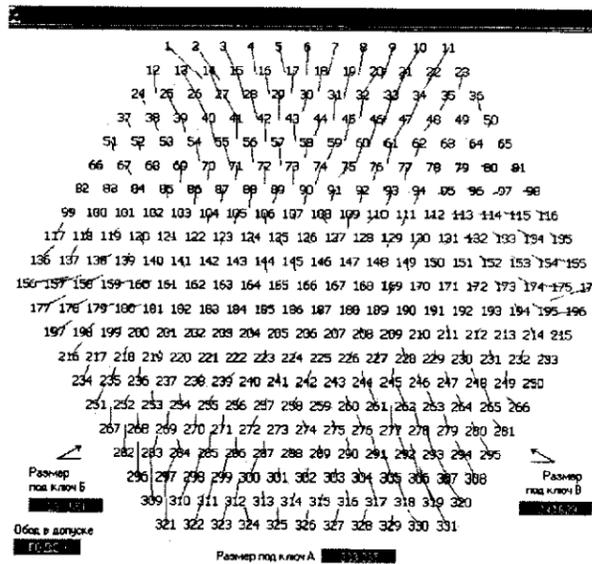


Рис. 9. Векторная картограмма, иллюстрирующая смещение ячейки дистанционирующей решетки после сильной искусственной деформации (данные получены на лазерной измерительной машине)

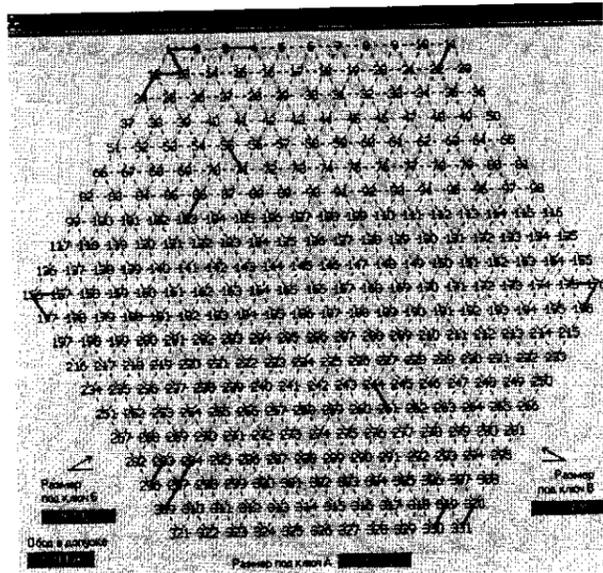


Рис. 10. Результат измерения межцентровых расстояний

И, наконец, при отображении межцентровых расстояний $L^{(k)}$ на экране виден «скелет» решетки: пунктирные линии, соединяющие чертежные центры ячеек и канальных отверстий, обозначают нормальные ситуации (в допуске), а сплошными линиями обозначены расстояния между ячейками, выходящие за поле допуска. В качестве примера на рис. 10 представлен результат измерения межцентровых расстояний L между ячейками.

Указанные выше способы отображения информации предусматривают контроль индивидуальных размеров и трехмерной конфигурации любой ячейки или отверстия под канал. Результаты измерения годной и бракованной ячейки приведены на рис. 11. Здесь представлены массивы диаметров $D_c(j)$ и координат центров $X_c(j), Y_c(j)$ вписанных окружностей по 16 сечениям и построенные по этим значениям 2D-графики и 3D-конфигурация ячейки. Кроме того, на экране монитора дается информация о среднем, минимальном, максимальном диаметрах вписанных окружностей, а также признаки годности по следующим параметрам: принадлежность центров вписанных окружностей цилиндру (полю допуска) и принадлежность вписанных окружностей полуму цилиндру (нижнему и верхнему допускам).

Результаты измерения хранятся в формате СУБД Access. Программа анализа статистики также реализована на базе СУБД Microsoft Access. Используя возможности СУБД Access, можно получать любые формы представления результатов измерений.

5. Результаты производственных испытаний ЛИМ. Созданная в КТИ ИП СО РАН лазерная измерительная машина для 3D-контроля дистанцирующих решеток прошла полный цикл испытаний в ОАО «НЗХК» (корпорация ОАО «ТВЭЛ»).

Остановимся сначала на метрологическом обеспечении ЛИМ. Она укомплектована стандартными образцами (СО) диаметров, а также размеров под ключ. Стандартный образец размера под ключ имеет вид шестигранника с

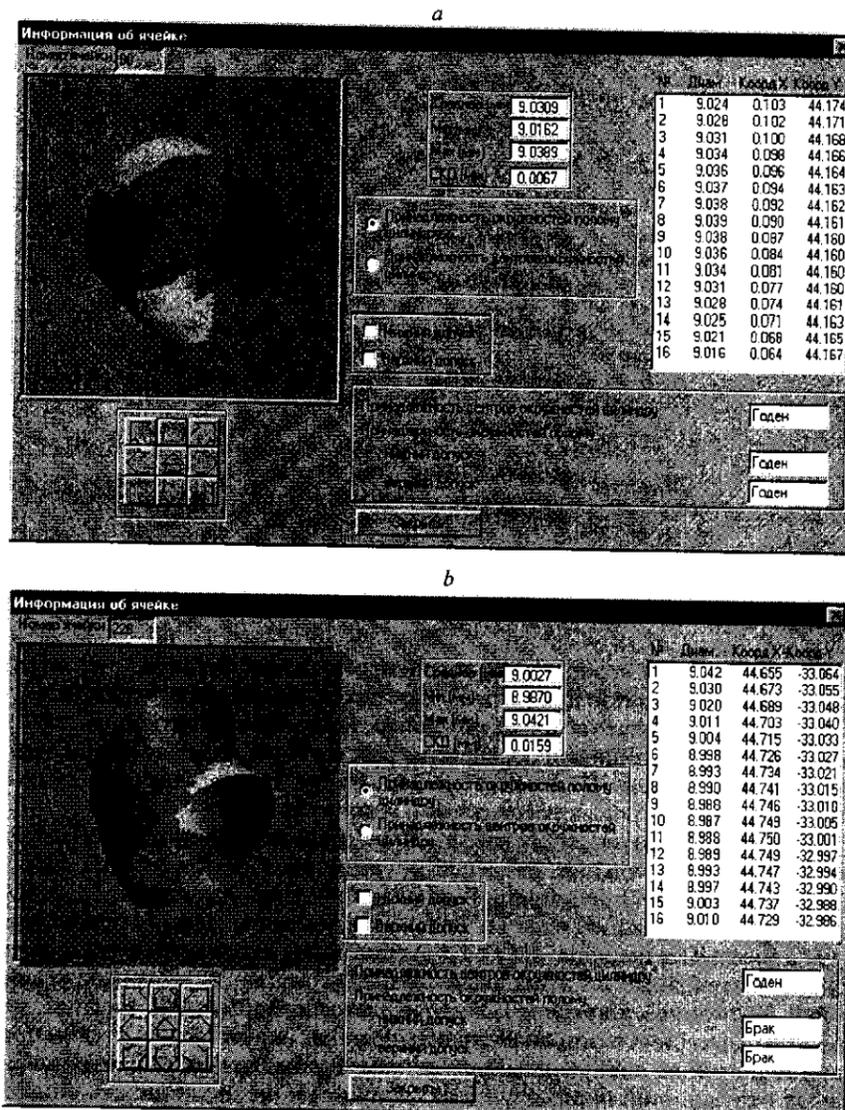


Рис. 11. Результаты измерения с помощью лазерной измерительной машины годной (a) и бракованной (b) ячеек, включая их 3D-изображения, диаметры $D_c(j)$ и координаты центров $X_c(j), Y_c(j)$

параметрами $B_1 = B_2 = 233,440$, $B_3 = 233,430$ мм. В режиме калибровки ЛИМ по размерам B_1, B_2 и B_3 определяет коэффициенты пересчета, связывающие линейные размеры по координатам X и Y с дискретными шаговыми двигателями и стеклянными линейками. Погрешность позиционирования составляет 1 мкм. Предусмотрены также два стандартных образца размеров под ключ с параметрами, соответствующими нижнему и верхнему технологическим размерам решетки.

Контролируемые параметры	Погрешность измерения, мм
Диаметр ячейки (ΔD_c)	0,016
Отверстие под канал (ΔD_{ch})	0,018
Смещение центра (ΔL)	0,015
Размер под ключ (ΔB)	0,032

Стандартные образцы диаметров представляют собой набор десяти полых цилиндров, закрепленных на шестигранной платформе. Внутренние диаметры шести цилиндров соответствуют диаметрам вписанных окружностей в ячейку, внутренние диаметры оставшихся четырех цилиндров соответствуют диаметрам вписанных окружностей в отверстие под канал. Калибровка проводится по СО с номинальным диаметром $\bar{D}_{ном} = 9,024$ мм. Четыре СО служат для воспроизведения нижнего и верхнего технологических размеров, а также для проверки диапазона измерения диаметров ячеек.

Программа производственных испытаний ЛИМ включала определение метрологических характеристик по аттестованным стандартным образцам и многочасовую работу устройства в режиме контроля штатных изделий с дефектами, специально нанесенными на них. В результате испытаний установлены следующие точностные характеристики (см. таблицу). Из таблицы видно, что достигнутые точностные характеристики в 2–3 раза превышают требуемые.

На рис. 12, а дана картограмма дистанционирующей решетки, забракованной по диаметрам некоторых ячеек и канальных отверстий (измерения проводились в производственных условиях). Забракованные по диаметру ячейки и отверстия под канал (диаметры выходят за поле допуска) показаны более темным цветом, годные – светлым. Картограмма дистанционирующей решетки, признанной годной по диаметрам всех ячеек и канальных отверстий, представлена на рис. 12, б.

Анализ составляющих результирующей погрешности измерения показывает, что они обусловлены рядом факторов. Во-первых, определенный вклад вносят шумы и погрешности узлов тракта съема информации (лазер, ТВ-камеры и др.). Экспериментально установлено, что при многократном измерении диаметра СО в виде цилиндрического отверстия, а также диаметра ячейки дистанционирующей решетки эта погрешность не превышала $\pm 1,5$ и ± 5 мкм соответственно. Во-вторых, заметный вклад в погрешность вносит составляющая, обусловленная изменением геометрических, фотометрических и других характеристик цилиндрических поверхностей ячеек (наклон, поворот, конусность, смещение, шероховатость и др.).

И, наконец, неточность установки дистанционирующей решетки на измерительном столе (ориентация, положение) и ошибки позиционирования измерительного стола являются дополнительными источниками погрешностей измерения.

С учетом долговременной нестабильности работы ЛИМ (интервал между калибровками выбран 3 мес.) погрешность измерения составляет ± 15 мкм. Следует отметить, что анализ точностных характеристик ЛИМ и способы их устранения требуют отдельного и тщательного исследования.

Что касается производительности ЛИМ, то этот параметр зависит от режима работы. В основном (штатном) режиме, когда измеряются все парамет-

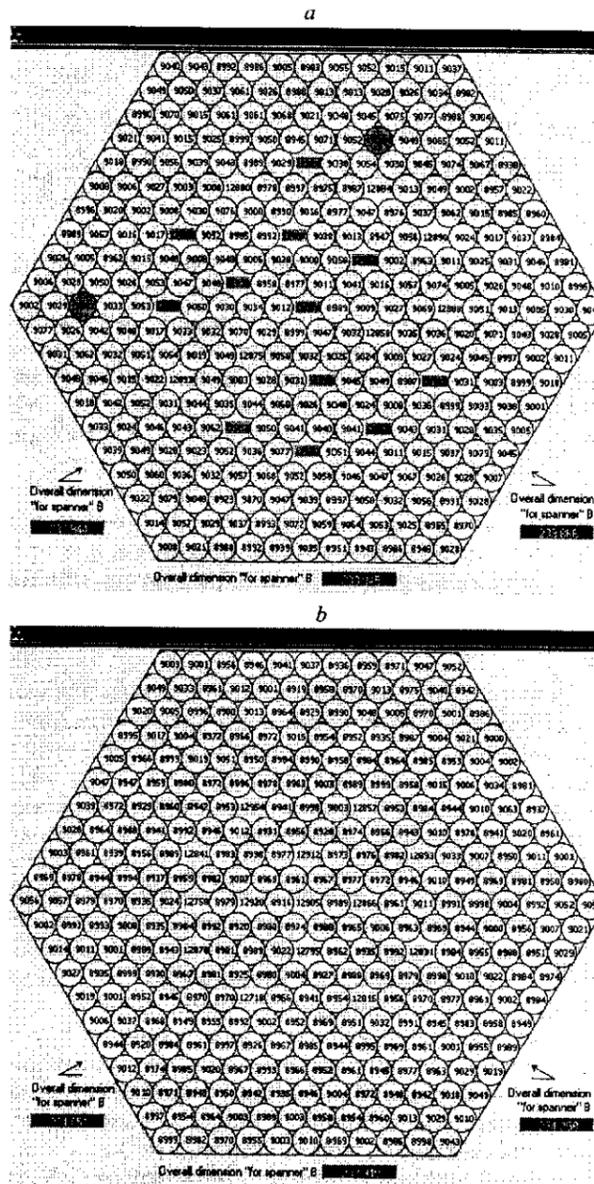


Рис. 12. Результаты измерений диаметров двух дистанционирующих решеток на лазерной измерительной машине: бракованной (а), годной (b)

ры, кроме конфигурации направляющих каналов, время измерения составляет 12 мин. Это время увеличивается до 30 мин при 100-процентном контроле всех геометрических параметров. Существенно, что время измерения можно заметно уменьшить путем применения более быстродействующих видео-буферов.

Заключение. Для обеспечения высокой надежности ТВС атомных реакторов предъявляются жесткие требования к геометрическим параметрам дистанционирующих решеток, которые определяют заданное расположение пучка ТВЭЛ в поперечном и продольном направлениях ТВС, что крайне важно для обеспечения требуемого теплового режима ее функционирования. Поэтому 100-процентному контролю подлежат конфигурации отверстий ячеек и направляющих каналов дистанционирующих решеток, расстояния между соседними ячейками и размеры под ключ.

Для российских предприятий ОАО «ТВЭЛ» разработана и создана в КТИ НП СО РАН лазерная измерительная машина, обеспечивающая с микронным разрешением бесконтактный 3D-контроль геометрии дистанционирующих решеток для атомного реактора ВВЭР-1000. В основу ее действия положен метод многоточечного структурного освещения (предложенный в КТИ НП). Основным узлом ЛИМ является специальная трехканальная лазерно-электронная измерительная головка для получения изображений ячеек и отверстий под канал при их структурном освещении. Она включает также сканирующий X–Y-стол, электронику и программное обеспечение.

Режим измерения автоматически позволяет определить геометрические параметры дистанционирующей решетки при контроле и визуализировать результаты измерения каждого параметра с последующей выдачей протоколов измерения и контроля.

Созданное программное обеспечение предусматривает три способа визуализации результатов измерения: в виде цветной и векторной картограмм для отображения соответственно диаметров и смещения центров ячеек и канальных отверстий, а также в виде картограммы скелетного типа для отображения межцентровых расстояний ячеек решетки. Существенно, что ЛИМ позволяет контролировать индивидуальные размеры и 3D-конфигурацию любой ячейки или отверстия канала, используя измерительную информацию о диаметрах и координатах их центров вписанных окружностей в 16 поперечных сечениях.

В результате промышленного тестирования установлено, что погрешности измерения для диаметра ячейки, отверстия канала и сдвига центра не превышали 18 мкм. Что касается размеров под ключ, то их погрешности были менее 32 мкм. Время контроля геометрических параметров дистанционирующей решетки составляет 12–30 мин в зависимости от режима измерения, что выше производительности существующих контактных координатно-измерительных машин более чем в 8–20 раз.

ЛИМ прошла полный цикл производственных испытаний и принята в опытную эксплуатацию в ОАО «НЗЖК» с марта 2003 года. Ее применение позволяет получить объективную информацию о геометрии дистанционирующих решеток, что способствует улучшению технологии их производства и повышению качества выпускаемых ТВС для атомных реакторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. От первой в мире АЭС – к атомной энергетике XXI века // Сб. тез., докл. и сообщений 10-й Ежегодн. конф. Ядерного общества России. М.: Изд-во ФЭН, 1999.
2. JSC TVEL nuclear fuel for power and research reactors. М.: Russian business agency, 2001.

3. **VVER** nuclear fuel production. Novosibirsk: JSC Novosibirsk Chemical Concentrates Plant (NCCP), 2001.
4. **Uber G. T.** Illumination and viewing methods for machine vision // Proc. SPIE. 1994. **MS97**. P. 122.
5. **Yeung K. K.** A low cost three-dimensional vision system using space-encoded spot projection // Proc. SPIE. 1986. **728**. P. 160.
6. **Vertoprakhov V. V., Krikliviy V. V.** The multipoint structured light method for 3D measurements: algorithms and application // Proc. of 6th ISMQC IMEKO Symposium "Metrology for Quality Control in Production". 1998. P. 681.
7. **Чугуй Ю. В.** Информационные, оптические и лазерные технологии // Автометрия. 1997. № 4. С. 3.
8. **Dammann H., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**. P. 1295.

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

*Поступила в редакцию
28 мая 2003 г.*