

**В. А. Белоглазова, О. И. Битюцкий, А. А. Гущина,
Ю. К. Карлов, Б. Е. Кривенков, П. И. Лавренюк,
В. И. Ладыгин, В. И. Несин, А. И. Пастушенко,
А. Н. Петров, Ю. В. Пименов, В. В. Рожков, И. Г. Чапаев,
В. М. Чернышев, Ю. В. Чугуй, В. П. Юношев, С. П. Юношев**

(Новосибирск – Москва)

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО
БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЭЛ**

Представлено устройство размерного контроля тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) атомных реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, созданное на основе теневого метода измерения. Дано описание технических программных средств и метрологического обеспечения устройства. Обсуждаются результаты производственных испытаний и опытной эксплуатации. Показано, что такое устройство позволяет поддерживать на должном уровне технологический процесс производства ТВЭЛ и что это способствует повышению безопасности ядерных реакторов и улучшению их эксплуатационных характеристик.

Введение. Высокие эксплуатационные и надежность характеристики реакторов в течение предусмотренных регламентом топливных циклов достигаются поддержанием на должном уровне технологии производства, в частности, тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), включая контроль широкой гаммы параметров на всех стадиях технологического процесса, а также 100 %-ный контроль готовой продукции [1]. Среди российских ядерных реакторов наиболее распространенными являются реакторы типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-440. На рис. 1 показаны тепловыделяющие сборки этих и других типов российских ядерных реакторов. Основным компонентом сборок являются ТВЭЛ, к которым предъявляются достаточно жесткие требования. Во избежание повреждений поверхностей оболочек ТВЭЛ и ухудшения коррозионной стойкости изделий средства измерения должны быть бесконтактными. Они также должны обеспечивать высокую точность измерения размеров и производительность (более сотни измерений в секунду) в большом диапазоне измерений (десятки миллиметров). Таким требованиям в наибольшей степени удовлетворяют оптико-электронные средства измерения [2, 3].

Как известно, ТВЭЛ реакторов на тепловых нейтронах с водяным охлаждением (ВВЭР-1000 и ВВЭР-440) [4, 5] имеют вид труб (диаметром 9 мм и длиной от 2,5 до 4 м), заполненных топливными таблетками из диоксида ура-

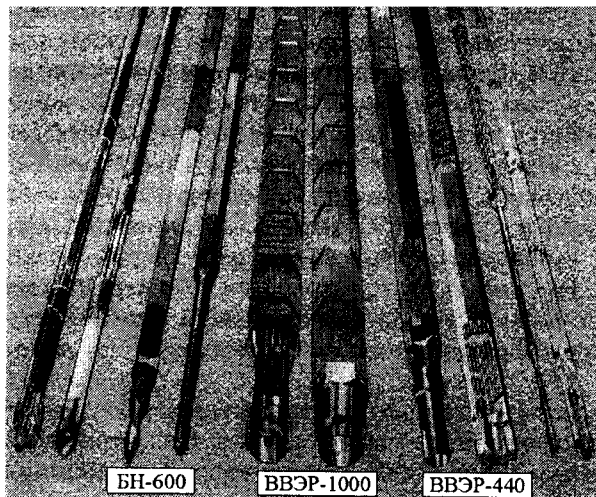


Рис. 1. Тепловыделяющие сборки российских ядерных реакторов

на, с заглушками на концах (рис. 2). 100 %-ному контролю подлежат внешний диаметр D оболочки ТВЭЛ (номинальный размер с технологическими допусками $D = 9,1^{+0,080}_{-0,050}$ мм), длина L (номинальное значение с допусками $L = 3837^{+2}_{-2}$ мм для ВВЭР-1000 и $L = 2551^{+2}_{-2}$ мм для ВВЭР-440), отклонения от прямолинейности B оболочки на базе 250 мм (кривизна относительно оси симметрии), отклонение H конца нижней заглушки относительно оси оболочки на длине 125 мм («кивок»).

Следует отметить, что для обеспечения заданных требований на геометрические параметры D и B их измерение необходимо производить по всей длине ТВЭЛ с интервалом 2 мм, причем диаметры D измеряются в двух поперечных сечениях оболочки для выявления возможной некруглости труб. Оптико-электронное устройство контроля ТВЭЛ должно обеспечивать измерение указанных геометрических параметров с точностями, определяемыми полями соответствующих технологических допусков. Погрешности измерений параметров D, L, B, H находятся в пределах: $\Delta D \leq \pm 0,01$, $\Delta L \leq \pm 0,4$, $\Delta B \leq \pm 0,05$, $\Delta H \leq \pm 0,025$ мм. Положение и протяженность вдоль оси Z участков с диаметрами, выходящими за границы допусков контролируемого параметра, определяются с погрешностью не более $\Delta Z = \pm 2$ мм.

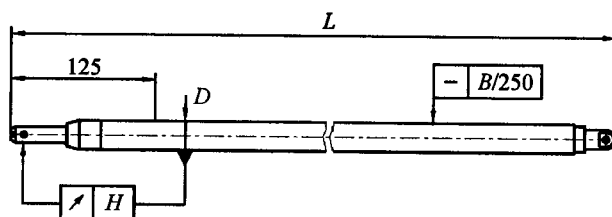


Рис. 2. Конфигурация тепловыделяющего элемента

Существенно, что устройство должно осуществлять контроль ТВЭЛ при движении их по конвейеру (вдоль оси Z) в условиях ряда возмущающих факторов: поперечных вибраций изделий вдоль осей X и Y с амплитудой до $\pm 1,5$ мм, меняющихся во времени фоновых засветок, наличия частиц пыли на поверхности ТВЭЛ и различной температуры тепловыделяющих элементов ($20-90$ °С). Перечисленные факторы заметно усложняют процесс измерения параметров ТВЭЛ или приводят к изменению значений этих параметров. Очевидно, что в этом случае предъявляются достаточно жесткие требования к быстродействию и точности измерительного устройства, которые должны обеспечиваться в довольно большой измерительной зоне. Ее размер вдоль осей X и Y (например, для диаметра оболочки) определяется вариациями контролируемого параметра D , диапазоном вибрации изделия. С учетом приведенных выше параметров зона имеет форму кольца с $D_{\min} = 5$ и $D_{\max} = 13$ мм. Все это требует разработки адекватных схемотехнических решений и алгоритмов обработки результатов, минимизирующих влияние перечисленных выше помех, а также соответствующих методик калибровки устройства.

В данной статье представлено разработанное и созданное специализированное оптико-электронное устройство для бесконтактного контроля геометрических параметров ТВЭЛ, которое надежно функционирует в условиях производства.

Далее рассматриваются: теневой метод измерения параметров ТВЭЛ (разд. 1), созданное на его основе устройство для измерения геометрических параметров тепловыделяющих элементов атомных реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440, технические и программные средства, метрологическое обеспечение (разд. 2), а также результаты производственных испытаний (разд. 3).

1. Измерение диаметров тепловыделяющих элементов. 1.1. *Метод измерения.* Базовым модулем разработанного устройства является оптико-электронный измерительный датчик, блок-схема которого представлена на рис. 3. Принцип действия его основан на формировании теневого изображения объекта, сканировании этого изображения многоэлементным фотоприемником и обработке цифрового сигнала. Датчик включает в себя: осветитель, фотоприемный модуль и электронное устройство управления. Осветитель состоит из инфракрасного светодиода (СД) и коллимирующего объектива. В фотоприемный модуль входят оптическая проекционная система, со-

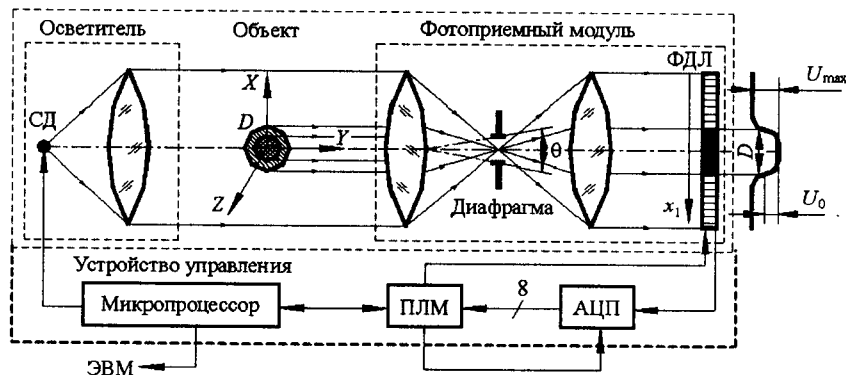


Рис. 3. Блок-схема оптико-электронного измерительного датчика

стоящая из двух одинаковых объективов (с фокусным расстоянием 80 мм, световым диаметром 27 мм), апертурной диафрагмы (диаметром 1,5 мм), и фотодиодная линейка (ФДЛ) (с числом элементов 1024 и шагом 25 мкм). Электронное устройство управления включает в себя плату аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и плату обработки сигнала на базе сигнального процессора ADSP2181.

Датчик работает следующим образом. Контролируемый объект – тепло-выделяющий элемент с диаметром D – освещается квазипараллельным пучком света. Формируется теневое изображение объекта в плоскости ФДЛ, которая выполняет его электронное сканирование. Выходной сигнал ФДЛ с помощью АЦП преобразовывается в цифровую форму и затем обрабатывается. Управление работой фотодиодной линейки и аналого-цифрового преобразователя осуществляет программируемая логическая матрица (ПЛМ). На рис. 4 показан фрагмент выходного сигнала $U(x)$ с фотодиодной линейки, соответствующий изображению края цилиндра. Определение диаметра D основано на пороговой обработке теневого изображения, при которой порог U_0 выбирают в зависимости от типа освещения объекта: $U_0 = 0,25U_{\max}$ при когерентном (лазерном) освещении или $U_0 = 0,5U_{\max}$ при некогерентном освещении (U_{\max} – значение сигнала, соответствующее интенсивности светового потока в удаленной от объекта области) [6].

Уменьшение влияния вибраций ТВЭЛ вдоль осей X и Y на точностные характеристики устройства достигается импульсной подсветкой объекта (устранение размытия изображения по оси X), а также увеличением глубины фокусировки объекта вдоль оси Y за счет соответствующего выбора углового размера θ апертурной диафрагмы.

Применение теневых измерителей в производственных условиях, по нашему мнению, более предпочтительно с метрологической точки зрения, так как они менее критичны к вибрациям в сравнении с традиционно используемыми лазерными сканирующими измерителями [7]. Далее приведен анализ погрешностей измерения диаметров ТВЭЛ оптико-электронным измерительным датчиком и на его основе сформулированы требования к выбору параметров оптической системы и способов обработки измерительной информации.

1.2. *Анализ погрешностей измерения.* Погрешность метода измерения в значительной степени обуславливается точностью определения положения края цилиндрического объекта (по его изображению) во всей измерительной зоне. По данным исследований установлено, что основной вклад в результирующую погрешность измерения положения края цилиндра $\Delta_{кр}$ вносят следующие составляющие: погрешность $\Delta_{пл}$, вызванная влиянием отражающих свойств и дефокусировки изображения цилиндрического объекта, погрешность аппроксимации края $\Delta_{аппр}$, погрешность абберации проекционной системы $\Delta_{абер}$ и случайная погрешность $\Delta_{сл}$. Рассмотрим каждую из этих погрешностей.

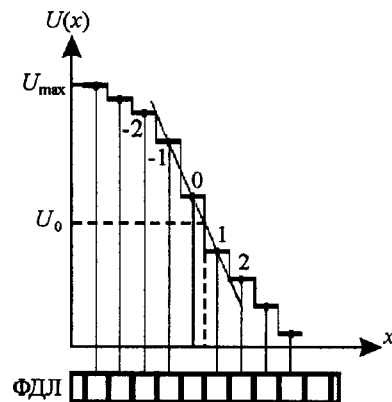


Рис. 4. Выходной сигнал $U(x)$ с ФДЛ

Погрешность $\Delta_{\text{цпл}}$ обусловлена влиянием отражающих свойств цилиндрического объекта на структуру его теневого изображения [8]. Задача определения положения края объекта по его изображению решена для плоских объектов нулевой толщины [9]. Что касается протяженных (трехмерных) объектов, то ее строгое решение усложняется влиянием геометрических и отражательных характеристик таких объектов, а также параметров оптической проекционной системы. Это требует при расчете дифракционных полей применения конструктивных подходов, которые просты, физически наглядны и вместе с тем достаточно точны для инженерных применений [10]. Один из таких подходов использован при анализе структуры изображения кругового цилиндра [11], которая, как известно, во многом определяется поведением отраженной от его поверхности волны, накладываемой на основную проходящую волну (рис. 5). Результирующее поле в случае монохроматического когерентного освещения имеет вид интерференционных полос, при этом профиль изображения цилиндра и глубина его резкости могут значительно отличаться от случая плоского объекта (в виде полуплоскости), для которого положение геометрического края объекта (соответствующее порогу $0,25U_{\text{max}}$) при дефокусировке его изображения в широком диапазоне (порядка нескольких миллиметров) остается строго неизменным. В качестве примера на рис. 5 показаны световые распределения в диаметральной P_1 и дефокусированной P_2 плоскостях. Видно, что с увеличением дефокусировки Δy происходит увеличение измеренного значения диаметра ($D < D_1 < D_2$).

Погрешность $\Delta_{\text{цпл}}$ можно радикально снизить путем заметного уменьшения углового размера θ апертурной диафрагмы оптической проекционной системы, т. е. выбором $\theta \ll 1$ (увеличением глубины резкости системы). Расчеты показывают, что при освещении цилиндра когерентной монохроматической волной с длиной λ смещение положения края в его изображении при дефокусировке Δy изображения объекта вдоль оси Y описывается следующим выражением:

$$\Delta_{\text{цпл}} = \delta_{\text{цпл}}^0 + \delta_{\text{цпл}}(\Delta y) = 0,1\mu\sqrt{\lambda\theta D} + 0,04\mu\sqrt{D/\lambda}\theta^{5/2}\Delta y,$$

где μ – коэффициент отражения света от цилиндра (по интенсивности). Если, например, выбрать параметры оптико-электронного измерительного датчи-

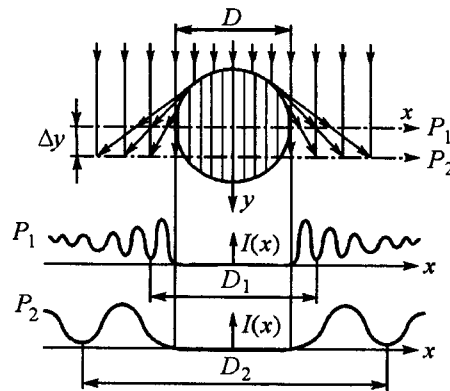


Рис. 5. Влияние отраженных волн на изображение цилиндра

ка (см. рис. 3) $\lambda = 0,63$ мкм, $\theta = 0,02$, то при диаметре объекта $D = 10$ мм, $\mu = 0,3$ и $\Delta y = \pm 1,5$ мм погрешность $\Delta_{\text{цпл}}$ не превышает 0,5 мкм. Полученные результаты соответствуют экспериментальным данным в [12].

Для сравнения отметим, что при широкоапертурном формировании изображения цилиндра в когерентном свете интенсивность его равна нулю в точке, соответствующей положению геометрического края (вследствие вычитания проходящей и отраженной волн), а погрешность определения края $\Delta_{\text{цпл}}$ (например, с использованием первого минимума интерференционной картины (см. рис. 5)) при смещении объекта в диапазоне $\Delta y = \pm 1,5$ мм с диаметром $D = 10$ мм, как показывают расчеты, может достигать ± 50 мкм [13].

Погрешность $\Delta_{\text{аппр}}$ возникает вследствие неточного приближения выходного сигнала $U(x)$, соответствующего изображению края цилиндра, линейной функцией. Первый из них основан на предварительной свертке выходного сигнала ФДЛ с прямоугольной функцией. Показано [12], что для заданной ширины края ΔN погрешность $\Delta_{\text{аппр}}$ можно уменьшить выбором оптимальной ширины M прямоугольной функции и числа элементов аппроксимации N . Так, при $\Delta N = 3$, $M = 5$ и $N = 5$ эту погрешность можно довести до 1 мкм. Второй способ снижения погрешности – использование более сложных функций для аппроксимации изображения края цилиндра, в частности, кубического полинома при $N = 7$ (после предварительной свертки сигнала ФДЛ с прямоугольной функцией шириной $M = 5$). В этом случае погрешность $\Delta_{\text{аппр}}$ не превышает $\pm 0,5$ мкм.

Погрешность $\Delta_{\text{абер}}$ вызвана в основном дисторсией оптической проекционной системы, описывающей отклонение координаты изображения края от действительного его положения на входе измерительного датчика. Поскольку разработка, производство и настройка оптической системы с низким уровнем аберрации трудоемки и дороги, то были предложены два альтернативных способа коррекции аберрации. Первый из них предусматривает аппроксимацию дисторсии в виде полинома, а второй – формирование соответствующей корректирующей таблицы для последующей компенсации дисторсии. Экспериментально установлено, что первый способ коррекции позволяет снизить ошибку с ± 25 до ± 5 мкм, а второй – до ± 1 мкм.

Случайная погрешность $\Delta_{\text{сл}}$ обусловлена, прежде всего, погрешностью дискретизации выходного сигнала с фотодиодной линейки аналого-цифровым преобразователем, а также неоднородностью чувствительности элементов фотодиодной линейки. В случае 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя и 1 %-ного уровня неравномерности чувствительности фотодиодной линейки (от максимального уровня сигнала) погрешность $\Delta_{\text{сл}}$ определения координаты края не превышает $\pm 0,5$ мкм (при вероятности 0,95). Уменьшение уровня этой погрешности достигается за счет накопления данных (путем многократных измерений), что связано, однако, со снижением производительности устройства.

С учетом проведенных выше оценок составляющих погрешности измерения положения края цилиндра имеем

$$\Delta_{кр} = \sqrt{\Delta_{цил}^2 + \Delta_{аппр}^2 + \Delta_{абер}^2 + \Delta_{сл}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2 + 1,0^2 + 0,5^2} \approx 1,3 \text{ мкм.}$$

Суммарная погрешность измерения его диаметра (в расчет принимались два края) $\Delta_{\Sigma} = \sqrt{2}\Delta_{кр} \approx 1,9 \text{ мкм}$. Практическая проверка показала, что погрешность лежит в диапазоне 2–2,5 мкм (шаг элементов ФДЛ 25 мкм, оптическое увеличение $1\times$, $\Delta y = \pm 1,5 \text{ мм}$).

Таким образом, предложенные технические решения и способы обработки измерительной информации обеспечивают уменьшение погрешности определения диаметров цилиндрических объектов до приемлемого уровня. Полученные результаты были использованы при разработке оптико-электронного измерительного датчика диаметров изделий – базового модуля устройства «Контроль».

2. Структурная схема и работа устройства. Структурная схема оптико-электронного устройства контроля геометрических параметров ТВЭЛ приведена на рис. 6. Измерительные датчики ДИ1– ДИ6 предназначены для измерения поперечных параметров: диаметров и положения оси. Их структура и работа описаны в разд. 1. Датчики координаты конца ТВЭЛ ДКТ1, ДКТ2 служат для измерения длины тепловыделяющего элемента. Датчики положения ДП1, ДП2 необходимы для привязки результатов измерений к координате вдоль его оси. Устройство сопряжения УС обеспечивает ввод информации с датчиков ДП, ДИ и ДКТ, а также формирование сигнала «Годен/Брак». Устройство сбора и обработки информации УСОИ (на базе микропроцессора INTEL 188) осуществляет синхронный запуск датчиков и сбор результатов измерений со всех ДП, ДИ и ДКТ, создание пакета данных и пересылку его в

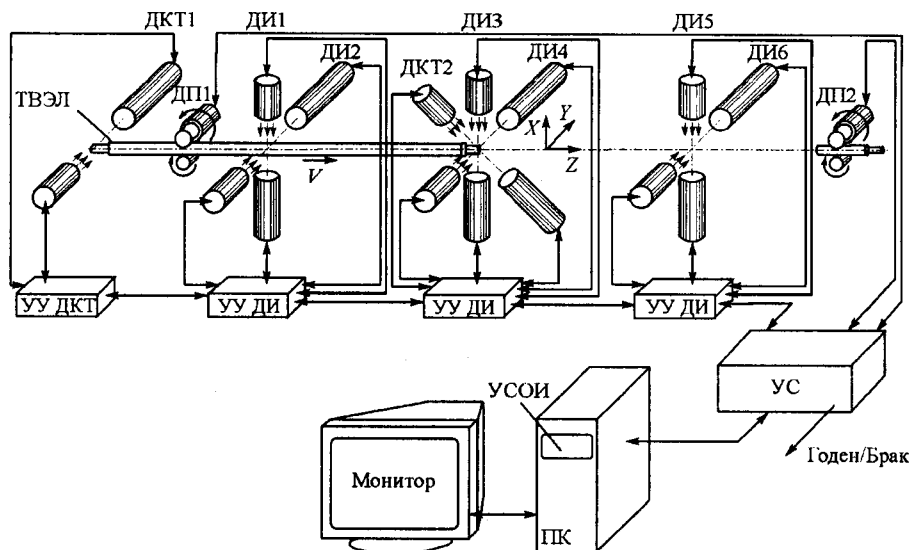


Рис. 6. Структурная схема устройства

режиме прерываний в управляющий компьютер. Компьютер производит проверку и подготовку устройства к проведению измерений, выбор необходимых режимов работы устройства, анализ и отображение на экране монитора результатов контроля, статистическую обработку результатов контроля и их длительное хранение (с возможностью передачи данных в цеховую сеть).

Измерительные датчики сгруппированы попарно в трех измерительных позициях. При этом их оси (оптические оси проекционных систем) и ось тепловыделяющего элемента ориентированы взаимно ортогонально. ФДЛ, входящие в состав фотоприемного блока, расположены перпендикулярно оси ТВЭЛ. Такое расположение ДИ позволяет измерять не только диаметры в двух ортогональных сечениях, но и такую пространственную характеристику, как отклонение оси от прямолинейности. Один датчик координаты конца тепловыделяющего элемента ДКТ2 расположен во второй измерительной позиции, и входящая в его состав ФДЛ ориентирована вдоль оси ТВЭЛ. Другой датчик координаты конца тепловыделяющего элемента ДКТ1 вынесен на расстояние, равное его номинальной длине.

Общий вид устройства показан на рис. 7. Программное обеспечение устройства работает под управлением операционной системы Windows 98. Оно включает в себя: основную программу, обеспечивающую подготовку устройства к проведению измерений (полуавтоматическая настройка всех измерительных датчиков), проверку устройства перед началом работы, калибровку устройства, выполнение метрологической аттестации устройства, проведение измерений и отбраковку ТВЭЛ, непригодных для эксплуатации; программу статистической обработки результатов измерения, реализованную на базе СУБД Microsoft Access; программу для УСОИ и программы для микропроцессоров.

Устройство укомплектовано набором стандартных образцов, предназначенных для периодической калибровки и ежедневной поверки всех датчиков в изменяющихся условиях производства (температура, освещенность, запыленность, переналадка, ремонт). Результаты поверки выдаются в виде протокола.



Рис. 7. Общий вид устройства контроля ТВЭЛ

3. Результаты производственных испытаний и опытной эксплуатации устройства. Испытания устройства «Контроль» проводились в составе действующей линии по производству ТВЭЛ на ОАО «НЗХК» (г. Новосибирск) в течение 2002–2003 гг. Программа производственных испытаний включала в себя: определение точностных характеристик устройства по аттестованным стандартным образцам и долговременную (72-часовую) проверку работы устройства в режиме контроля штатных изделий, специально подготовленных для проведения испытаний (на части изделий искусственно создавались участки с браком по диаметру).

В результате испытаний установлено, что погрешность измерения геометрических параметров ТВЭЛ (с доверительной вероятностью 0,95) составила: для внешних диаметров $\Delta D = \pm 0,008$ мм, для отклонений от прямолинейности $\Delta B = \pm 0,015$ мм, для отклонений конца верхней заглушки от оси $\Delta H = \pm 0,015$ мм, для длины $\Delta L = \pm 0,15$ мм, для местоположения и протяженности участков с браком по диаметру $\Delta Z = \pm 2$ мм. При этом быстродействие устройства равнялось 130 измер./с.

В процессе проверки работы устройства в режиме контроля штатных изделий выявлено 97 % бракованных, в том числе и те, которые стандартными средствами контроля (измерительными скобами) не выявлялись.

В таблице приведены геометрические параметры и статистические данные по выборке из 600 изделий. Гистограмма распределения средних диаметров ТВЭЛ представлена на рис. 8, а кривизны – на рис. 9. Из анализа первой гистограммы следует, что все значения диаметров оболочки лежат в узком диапазоне, составляющем 25 % от технологического допуска (границы допуска 9,05 и 9,18 мм показаны на рис. 8 пунктирными линиями), а средний диаметр (9,108 мм) близок к его номинальному значению (9,100 мм). Распределение параметра отклонения от прямолинейности (кривизны) лежит в интервале, составляющем 40 % от предельно допустимого значения, а среднее значение кривизны (0,155 мм) почти в 3 раза меньше верхней границы допуска (на рис. 9 верхняя граница допуска показана пунктирной ли-

Статистические данные по выборке из 600 изделий

Контролируемый параметр	Значение, мм		Среднее значение, мм	Средне-квадратичное отклонение, мм	Номинальное значение, мм
	min	max			
Диаметр оболочки	9,068	9,134	9,108	0,007	9,100
Диаметр в области нижней заглушки	9,063	9,201	9,116	0,009	9,100
Диаметр в области верхней заглушки	9,024	9,133	9,081	0,011	9,100
Кривизна	0,127	0,334	0,155	0,028	–
«Кивок»	0	0,300	0,163	0,071	–
Длина ТВЭЛ	3837,711	3838,786	3838,295	0,144	3837,0

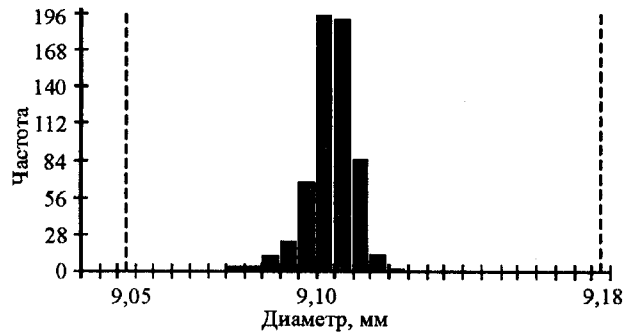


Рис. 8. Гистограмма распределения диаметров оболочки

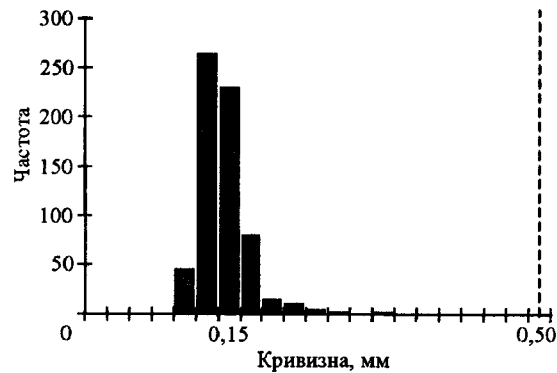


Рис. 9. Гистограмма распределения отклонения от прямолинейности

нией). Полученные данные свидетельствуют о высоком уровне технологии производства тепловыделяющих элементов.

Объективная информация о геометрических параметрах ТВЭЛ позволяет поддерживать технологический процесс их производства на должном уровне.

Заключение. Для решения задачи 100 %-ного бесконтактного контроля геометрических параметров тепловыделяющих элементов разработано и создано высокопроизводительное оптико-электронное измерительное устройство «Контроль». Оно работает в составе технологической линии производства ТВЭЛ на ОАО «НЗХК» и позволяет в процессе движения (скорость 0,2 м/с) осуществлять размерный контроль всех требуемых геометрических параметров: наружных диаметров оболочек ТВЭЛ в двух ортогональных (поперечных) сечениях, отклонений от прямолинейности оболочки ТВЭЛ, отклонения конца нижней заглушки от осевой линии, длины, положения и протяженности участков с браком по диаметру вдоль оси ТВЭЛ.

В результате производственных испытаний установлено, что технические характеристики устройства полностью удовлетворили требованиям производства тепловыделяющих элементов. При этом быстродействие устройства составило 130 измер./с.

За время опытной эксплуатации устройства проконтролированы на соответствие геометрических параметров технологическим требованиям производства десятки тысяч ТВЭЛ ВВЭР-1000 и ВВЭР-440. Ими укомплектованы тепловыделяющие сборки, работающие в настоящее время на российских атомных электростанциях и АЭС ближнего зарубежья.

Высокие технические характеристики устройства «Контроль» создают предпосылки для применения его при освоении технологии производства тепловыделяющих сборок нового поколения (на базе ТВС-2 и ТВСА), увеличивающих срок эксплуатации ядерных реакторов АЭС.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук П. Е. Твердохлебу за полезные замечания и рекомендации при обсуждении работы.

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. **Brown G. M., Harding K. G., Stahl H. Ph.** Industrial application of optical inspection, metrology, and sensing // Proc. SPIE. 1992. **1821**.
3. **Чугуй Ю. В.** Информационные, оптические и лазерные технологии // Автометрия. 1997. № 4. С. 3.
4. **JSC TVEL Nuclear fuel for power and research reactors** // Russian business agency. Moscow, 2001.
5. **Производство ядерных элементов ВВЭР.** Новосибирск: ОАО «НЗКХ», 2001.
6. **Гудмен Дж.** Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
7. **Soobitsky J. A.** Scanning laser diameter gage for industrial use // Optomechanical and Electro-optical Design of Industrial Systems. 1988. **959**. P. 193.
8. **Dew C. D.** The application of spatial filtering techniques to profile inspection and an associated interference phenomenon // Opt. Acta. 1970. **17**, N 4. P. 237.
9. **Birch K. G.** A spatial frequency filter to remove zero frequency // Opt. Acta. 1968. **15**, N 2. P. 113.
10. **Chugui Yu. V.** Optical dimensional metrology for 3D objects of constant thickness // Measurement. 2001. **30**. P. 19.
11. **Лемешко Ю. А., Чугуй Ю. В.** Размерный контроль круговых отражающих цилиндров интерференционным методом // Автометрия. 2003. **39**, № 5. С. 42.
12. **Богомолов Е. Н., Василец Н. В., Кривенков Б. Е. и др.** Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» // Автометрия. 1989. № 5. С. 83.
13. **Erben A.** Optisches antasten des prufplings mit hilfe der interferenzlinie bei langen – und winkelmessungen am messmikroskop BK 70/50 des VEB Carl Zeiss JENA // Feingerate-technik. 1972. **2**, N. 2. S. 61.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
Новосибирский завод химконцентратов,
ОАО «ТВЭЛ»,
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru
nzhk@nccp.ru
pimenov@tvel.ru*

*Поступила в редакцию
2 сентября 2003 г.*