

**Физический
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

4

С. К. МАНКЕВИЧ, Е. П. ОРЛОВ

**МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ
УСТАНОВКИ СБОРОК ТЕПЛО-ВЫДЕЛЯЮЩИХ
ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДО-ВОДЯНОМ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

Москва — 2016

ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

Главный редактор В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,
научный секретарь С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

Редакционная коллегия: В. С. Бескин, А. А. Горбацевич, О. Д. Далькаров,
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Адрес редакции: Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;

E-mail: preprins@sci.lebedev.ru, irinakh@sci.lebedev.ru

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:

<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

С.К. Манкевич, Е.П. Орлов

**МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ УСТАНОВКИ
СБОРОК ТЕПЛО-ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ВОДО-ВОДЯНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

№ 4

Москва 2016

С.К.Манкевич, Е.П.Орлов

**Метод бесконтактного контроля установки сборок
тепловыделяющих элементов в водо-водяном энергетическом реакторе**

АННОТАЦИЯ

Предложен метод бесконтактного определения повысотных отметок сборок тепловыделяющих элементов с целью контроля их установки для повышения безопасности эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000. Метод включает сканирование верхних площадок сборок световым пучком специальной формы, регистрацию отраженного сигнала телевизионной камерой и обработку полученной информации в ЭВМ. Разработанное на основе метода измерительное устройство может регистрировать перепад высот площадок 0,1 мм с точностью 1% при допустимом разбросе высот 1,0 – 1,5 мм. Время сканирования всех сборок и выдачи информации об их повысотных отметках составляет 10 – 15 минут. Измерительное устройство, предназначенное для работы в водной среде зоны загрузки ядерного реактора, выполняется на основе радиационно-стойких элементов, выпускаемых промышленностью.

S.K.Mankevich, E.P.Orlov

**Noncontact control method for mounting the fuel assembly in
water-moderated water cooled reactor**

ABSTRACT

A noncontact control method for determining the positions of the upper platforms of the fuel assembly in the nuclear power reactor is suggested. This method may be used in nuclear power engineering for improving the safety of water-moderated water cooled reactors such as WMWC-440, WMWC-1000. This holds the means for scanning the upper platforms of the fuel assembly by the light beam of a special form, the registration of reflected signal by TV camera and information data processing by a computer. The measuring device developed on the base of this method can register the level difference of the upper platforms of 0.1 mm with an accuracy of 1% at the permissible spread of positions 1.0 – 1.5 mm. The time of scanning of all the fuel assembly and the time of information processing is 10 – 15 minutes. This device intended for working in water medium of a nuclear reactor is manufactured on the basis of radiation-resistant elements currently produced by the industry.

С.К.Манкевич, Е.П.Орлов

**Метод бесконтактного контроля установки сборок
тепловыделяющих элементов в водо-водяном энергетическом реакторе**

Важным этапом в работе ядерного реактора является первичная загрузка, а после выгорания ядерного топлива перезагрузка новыми сборками тепловыделяющих элементов. Последние называются далее тепловыделяющими сборками (ТВС), которые представляют собой специальные кассеты, в которых расположены собственно тепловыделяющие элементы, содержащие ядерное делящееся вещество. ТВС устанавливаются в рабочей зоне ядерного реактора эквидистантно в несколько рядов. Особенностью процесса загрузки и перезагрузки является требование высокой точности установки ТВС в рабочей загрузочной зоне в соответствии с действующим регламентом. Для обеспечения безопасной и надежной работы ядерного реактора в течение длительного рабочего периода после осуществления загрузки ТВС с помощью перегрузочной машины требуется контроль положения установленных в рабочей зоне реактора ТВС относительно внутренней системы координат ядерного реактора. Данный контроль осуществляется путем измерения в этой системе координат геометрического положения верхних площадок ТВС, так называемых повысотных отметок (ПО).

В настоящей работе предлагается метод контроля, представляющий собой модификацию метода бесконтактных оптических измерений качества поверхности механических изделий, разработанного академиком В.П.Линником и отмеченного Сталинской премией в 1946 году [1]. Суть модифицированного метода излагается на примере разработанного на его основе авторами [2] устройства бесконтактного измерения ПО ТВС в автоматическом режиме в зоне загрузки реакторов водо-водяного типа (ВВЭР). Это устройство представляет собой оптический бесконтактный измеритель, выполненный на основе телевизионной передающей камеры, адаптированной к радиации, и помещенной в водонепроницаемый бокс, поскольку определение ПО ТВС осуществляется непосредственно в рабочей зоне ядерного реактора в водной среде с температурой 50 градусов на глубине порядка 5 метров в условиях значительного уровня радиации.

Блок-схема устройства приведена на рис.1. На нём изображена зона загрузки ядерного ВВЭР, в которой с помощью перегрузочной машины ядерного реактора установлены ТВС 1 и 2. Устройство для определения ПО ТВС содержит прикреплённую к нижней части штанги 3 перегрузочной машины горизон-

тальную раму 4, на которой установлены источник оптического излучения 5 и передающая телевизионная камера 6, помещенные в водонепроницаемые боксы 9 и 10, снабженные оптически прозрачными окнами. Расстояние от телевизионной камеры до плоскости верхних площадок ТВС 11 составляет величину порядка 0,5 метра. Источник оптического излучения 5 содержит осветитель на основе лампы накаливания или лазера 7, и блок формирования диаграммы направленности 8. Оптические оси источника оптического излучения и передающей телевизионной камеры пересекаются в точке O_0 плоскости верхних площадок 11 ТВС. Устройство содержит также эталонную пластину 12, установленную на второй вертикальной штанге 13 перегрузочной машины ядерного реактора.

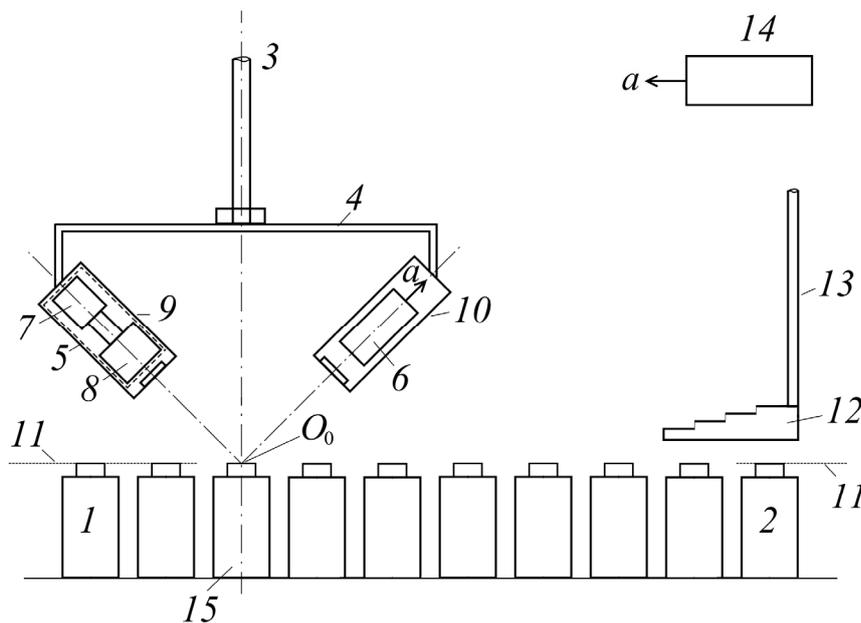


Рис.1. Блок-схема устройства бесконтактного измерения вертикальных координат верхних площадок тепловыделяющих сборок.

Верхние площадки ТВС в стандартном рабочем состоянии должны располагаться в некоторой условной плоскости 11. Отклонение высоты площадок ТВС от указанной плоскости 11 не должно превышать $\Delta h = 1,0 - 1,5$ мм. В противном случае после установки верхней крышки реактора в ТВС, площадка которой выступает за указанные пределы, могут возникнуть излишние напряжения, способные вызвать в процессе эксплуатации аварийную ситуацию. Задачей предлагаемого метода является оперативное определение ПО ТВС, площадки которых выступают за указанные допустимые пределы. Определение ПО ТВС осуществляется сразу после первичной установки ТВС при загрузке ядерного

реактора с помощью перегрузочной машины, а также после переустановки ТВС с выступающими по высоте площадками для окончательного контроля.

Определение ПО ТВС осуществляется следующим образом. Источник оптического излучения 5 с блоком формирования оптической диаграммы направленности 8 формирует с помощью узкой щели подсвечивающий световой пучок прямоугольного сечения, который при падении на верхнюю площадку ТВС 15 образует узкую световую полосу. Передающая телевизионная камера 6 формирует и регистрирует изображение верхней площадки данной освещаемой ТВС 15 совместно со световой полосой, которая ориентирована перпендикулярно плоскости чертежа и пересекается с ней в точке O_0 . Угол между оптической осью источника оптического излучения и оптической осью передающей телевизионной камеры 6 составляет фиксированную величину. Поэтому положение изображения световой полосы в структуре телевизионного раstra передающей телевизионной камеры 6 будет зависеть от вертикальной координаты площадки ТВС. При изменении вертикального положения площадки ТВС изменяется положение световой полосы. Информация об этом изменении в виде телевизионного сигнала передается по кабелю от передающей телекамеры 6 в блок обработки информации 14, расположенный вне ядерного реактора. В блоке обработки информации осуществляется обработка полученного видеосигнала, в результате чего определяется величина вертикальной координаты площадки ТВС 15, на которой в данный момент расположена световая полоса. Далее с помощью перегрузочной машины ядерного реактора, на штанге 3 которой укреплен горизонтальная рама 4 с измерительным устройством, осуществляется перемещение измерительного устройства для измерения координат верхней площадки следующего ТВС.

На рис.2 показаны величины, которые используются при определении ПО ТВС. Оптические оси передающей телевизионной камеры 6 и источника оптического излучения 5 с блоком формирования 8 диаграммы направленности светового пучка образуют угол $\alpha + \beta$ и пересекаются в некоторой точке O_0 , расположенной в плоскости 11 верхних площадок ТВС. Данная плоскость, обозначенная на рис.2 линией A_0 , представляющей собой след плоскости 11 в плоскости рис.2, является некоторой заданной стандартной плоскостью положения верхних площадок ТВС. Отклонение положения верхних площадок ТВС от данной плоскости A_0 является предметом измерения и контроля в предлагаемом методе.

Световая полоса, образованная световым пучком, сформированным блоком формирования 8 оптической диаграммы направленности, перпендикулярна

плоскости рис.2 и параллельна плоскости 11. При точном расположении верхней площадки ТВС, освещаемой в данный момент времени, в плоскости A_0 падение узкого светового пучка на поверхность данной площадки ТВС произойдет таким образом, что световая полоса пересечет плоскость чертежа в точке O_0 , как показано на рис.2. При этом изображение световой полосы будет располагаться точно в центре фоточувствительного слоя передающей телевизионной камеры б, так как точка O_0 лежит на её оптической оси.

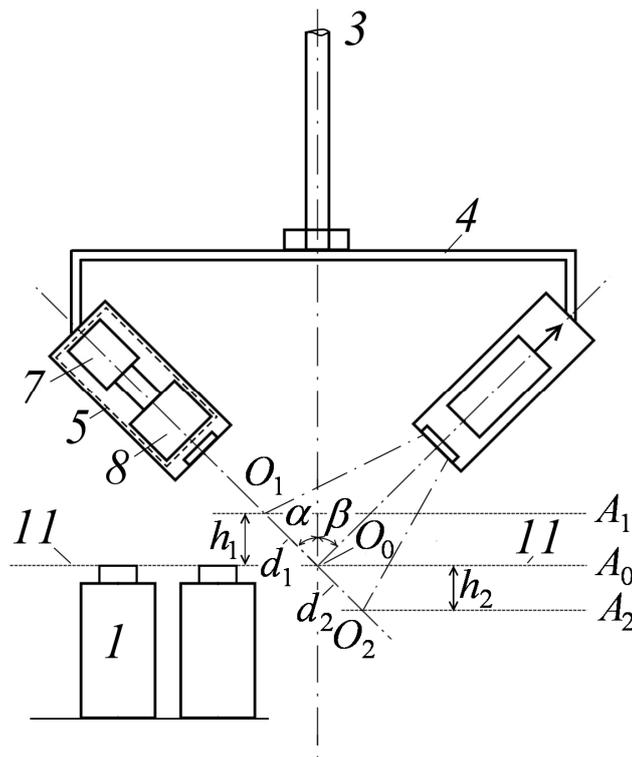


Рис.2. Схема считывания информации.

Если площадка ТВС расположена выше плоскости A_0 на величину $h = h_1$, как это показано на рис.2, световая полоса сместится и будет пересекать плоскость рис.2 в точке O_1 , являющейся в то же время точкой пересечения оптической оси источника оптического излучения с новым положением A_1 плоскости верхней площадки ТВС. При этом смещение изображения световой полосы относительно оптической оси телевизионной камеры б, составит величину $d = d_1$. Соответственно, при расположении площадки ТВС ниже плоскости A_0 на величину $h = h_2$, световая полоса будет располагаться в точке пересечения O_2 оптической оси источника оптического излучения с новым положением плоскости A_2 верхней площадки ТВС. Смещение световой полосы относительно оси переда-

ющей телекамеры b произойдет в другую сторону и составит величину $d = d_2$. Согласно схеме, представленной на рис.2, отношение h к d равно $\cos \alpha$ при условии перпендикулярности оптических осей источника оптического излучения и передающей телевизионной камеры. Отсюда имеем

$$h = d \cos \alpha . \quad (1)$$

Далее объектив, входящий в состав передающей телевизионной камеры b , осуществляет формирование изображения смещенного положения световой полосы на фоточувствительном слое телевизионной камеры. При соответствующем выборе параметров оптической схемы и осуществлении специальной обработки зарегистрированных видеосигналов предлагаемый метод позволяет обеспечить измерение весьма малых смещений наблюдаемой поверхности с высокой точностью. Так например, анализ оптической схемы, аналогичной схеме на рис.1, в указанных работах академика Линника [1, 3] показал возможность измерения смещения плоскости A_0 с минимальной измеряемой величиной смещения по высоте $h = 0,02$ мм и точностью измерения 5 – 10%. В измерении таких малых смещений поверхности площадок ТВС в ядерном реакторе нет необходимости. Достаточно ограничиться минимальной величиной измеряемого смещения порядка десятых долей миллиметра и точностью 10 – 15%.

Такие требования к параметрам измерений могут быть обеспечены при использовании стандартных современных оптических средств и объективов с разрешающей способностью 30 – 40 линий/мм [4]. Информация о координате верхней площадки ТВС получается следующим образом. Объектив телекамеры b переносит предметную плоскость $O_1 - O_2$ на фоточувствительный слой телекамеры с некоторым масштабным коэффициентом $M = 1/2 - 1/3$, который обусловлен параметрами объектива и водной среды. Отсюда $Md = k$, где k – координата изображения световой полосы на фоточувствительном слое телекамеры. Фоточувствительный слой телекамеры, представляющий собой площадку прямоугольной формы со сторонами $a \times b$, имеет фиксированные размеры. На этой площадке осуществляется развертка телевизионного раstra, имеющего стандартные параметры 600×800 элементов разрешения. На более длинную сторону b приходится 800 пикселей, что соответствует числу элементов разрешения в одной строке. Соответственно, на сторону a площадки телекамеры приходится 600 телевизионных строк развертки. Величина смещения плоскости A_0 , равная h , связана со смещением своего изображения на фоточувствительном слое телекамеры согласно (1) следующим соотношением

$$h = d \cos \alpha = k \cos \alpha / M . \quad (2)$$

Измеряемой величиной является координата k в плоскости фоточувствительного слоя телекамеры b , которая измеряется числом пикселей, отсчитываемых либо от центра площадки фотослоя телекамеры b , соответствующей точке O_0 , либо от любой другой заданной точки площадки фотослоя, например, от крайней точки площадки фотослоя, где начинаются строки развертки телевизионного раstra. Размер одного пикселя фотослоя телекамеры $p = b/800$, где b – размер телевизионного раstra, т.е. той стороны площадки фотослоя телекамеры, вдоль которой осуществляется развертка считывающего электронного луча. Тогда формула (2) приобретает следующий вид

$$h = np \cos \alpha / M, \quad (3)$$

где n – число пикселей соответствующих k , $\alpha = \beta = 45^\circ$. Величина n определяется в блоке обработки информации 14 в процессе обработки видеосигналов, поступающих в этот блок от телевизионной передающей телекамеры b . Измерение и определение координаты k в структуре телевизионного раstra осуществляется по переднему фронту импульса тока телекамеры b , возникающего при пересечении края световой полосы, или максимума её интенсивности считывающим электронным лучом. Величина минимального измеряемого смещения поверхности ТВС определяется размером одного пикселя фотослоя телекамеры p , пересчитанного с помощью (3) в величину смещения h . При использовании стандартной телекамеры с размером $b = 25$ мм, размер одного пикселя $p = 0,03$ мм. Если сумма величин максимальных смещений $|h_1^{\max}| + |h_2^{\max}| = H = 40$ мм и этот диапазон полностью проецируется на фотослой телекамеры с числом пикселей в одной строке, равном, как отмечено выше, 800, то одному пикселю будет соответствовать смещение по высоте, равное $H/800 = 0,05$ мм. Таким образом, минимальное измеряемое смещение верхней площадки ТВС, определяемое двумя пикселями, $\delta h = 0,1$ мм.

Так как относительная погрешность измерения углов α и β не превышает 5% и они не меняются вследствие жесткого крепления источника излучения и передающей телекамеры на горизонтальной раме 4 , а параметр M является фиксированным, то относительная погрешность однократного измерения $W_1 = 2/n \approx 15 - 20\%$, где в диапазоне $\Delta h = 1,0 - 1,5$ мм $n = \Delta h / \delta h \approx 10 - 15$. Она может быть существенно уменьшена путём измерения смещения в точках световой полосы, отвечающих различным строкам развертки телевизионного раstra,

с последующим усреднением. В этом случае величина смещения поверхности ТВС определяется в блоке обработки информации по формуле

$$h = \frac{\rho \cos \alpha}{M} \frac{\sum n_j}{N}, \quad (4)$$

где $N = 600$ – число строк телевизионного растра, на каждой из которых определяется величина n_j , j – номер соответствующей строки, $j = 1, \dots, N$. В результате усреднения относительная погрешность w измерения смещения световой полосы

уменьшается: $w = \frac{\Delta n_{\text{ср}}}{\langle n \rangle} = \frac{1}{\langle n \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (n_j - \langle n \rangle)^2}{N(N-1)}} \approx \frac{W}{\sqrt{N}}$, где W – погреш-

ность измерения смещения световой полосы при измерении на одной строке телевизионного растра, равная W_1 . В результате такого метода обработки телевизионных сигналов точность определения координат площадок ТВС может быть доведена до 1%.

Таким образом, представленная на рис.1 измерительная система способна обеспечить определение ПО ТВС в диапазоне 40 мм (± 20 мм) с точностью 0,1 мм и относительной погрешностью 1% в допустимом диапазоне отклонения $\Delta h = 1,0 - 1,5$ мм площадок ТВС от заданного уровня. Отметим, что величина $H = 40$ мм является диапазоном измерения самого измерительного устройства, смонтированного на штанге 3 перегрузочной машины. Для реализации большего диапазона измерений осуществляется перемещение штанги 3 по вертикали с помощью специальных устройств перегрузочной машины.

Для достоверности определения ПО ТВС предлагается осуществлять тестирование его работы с помощью специальной эталонной пластины 12, показанной на рис.1. и на рис.3 в двух видах *a*) и *b*). Она смонтирована в нижней части второй вертикальной штанги 13 перегрузочной машины и представляет собой металлический брусок, в котором с высокой точностью сделаны ступеньки высотой, например, от 0,1 до 0,3 – 0,5 мм. Для тестирования непосредственно в зоне загрузки ядерного реактора положение эталонной пластины 12 с помощью штанги 13 фиксируется в некотором участке зоны загрузки, например, над плоскостью верхних площадок 11 ТВС, рис.1. При этом она должна быть повернута на 90 градусов вокруг оси вертикальной штанги 13 относительно первоначального положения, показанного на рис. 1. Далее с помощью штанги 3 и загрузочной машины реактора осуществляется проход измерительного устройства над плоскостью эталонной пластины 12 и измерение перепадов высот эталонных ступенек.

На рис.3 *b*) показано последовательное смещение изображений световой полосы в передающей телевизионной камере *b* при падении светового пучка на ступенчатую структуру *16 – 19* эталонной пластины. Стрелки $c_1 – c_4$ указывают на строки телевизионного растра. Начало строк телевизионного растра обозначено линией $c – d$. В блоке обработки информации *14* осуществляется определение вертикальных координат ступенек эталонной пластины и сравнение их разностей с известными высотами ступенек эталонной пластины.

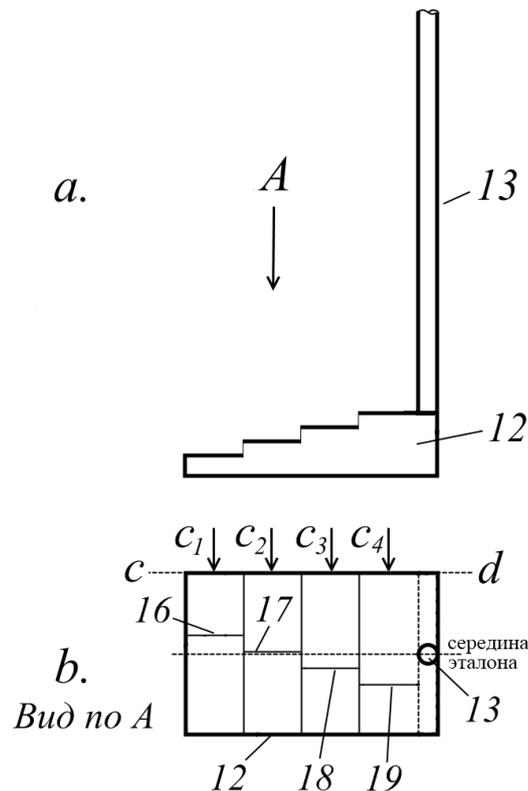


Рис.3. Схема калибровки измерений с помощью эталонной пластины.

На основании этого сравнения осуществляется калибровка измерительного устройства непосредственно в рабочей зоне загрузки ядерного реактора практически без остановки рабочего цикла определения ПО ТВС. Эталонная пластина *12* может быть установлена постоянно в любом месте зоны загрузки ядерного реактора. В этом случае необходимость в использовании второй штанги *13* перегрузочной машины отпадает.

При разработке предлагаемого метода был создан экспериментальный образец измерительного устройства и проведены его испытания вне ядерного реактора на материале с поверхностными свойствами аналогичными свойствам площадок реальных ТВС. В результате были экспериментально подтверждены рассчитанные выше параметры и точности измерений.

Высокая точность и информативность устройства позволяют использовать его для контроля состояния поверхностей различного оборудования, размещенного в зоне загрузки и в других отсеках ядерного реактора. Для контроля и анализа состояния поверхностей элементов и оборудования в ядерном реакторе измерительное устройство осуществляет построение рельефа наблюдаемой поверхности путем сканирования её узким световым пучком. При этом в блоке обработки информации регистрируется с разрешением порядка 0,1 мм рельеф поверхности, наличие впадин и трещин, возникших в процессе эксплуатации. При необходимости точность определения характера и дефектов поверхности может быть улучшена до величины порядка 0,01 мм, указанной в работах [1, 3]. Отметим, что с помощью описываемого метода могут быть исследованы не только горизонтальные поверхности в ядерном реакторе, но и вертикальные поверхности элементов ядерного реактора, а также поверхности, расположенные под любым другим углом. На рис.4 показано крепление измерительного устройства к штанге 3 перегрузочной машины, позволяющее обследовать вертикальные элементы 20 зоны загрузки ядерного реактора и определять их смещение и отклонение от вертикали, а также определять состояние поверхностей этих элементов.

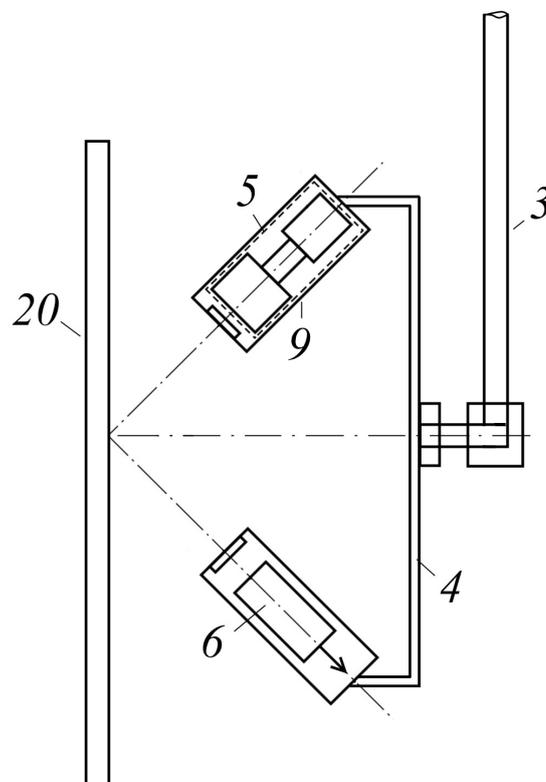


Рис.4. Схема измерения качества поверхности вертикальных объектов.

Заключение

Предлагаемый метод бесконтактного измерения координат верхних площадок (повысотных отметок) тепловыделяющих сборок (ТВС) в ядерном энергетическом реакторе водо-водяного типа позволяет довести минимальный уровень определения повысотных отметок до 0,1 мм при относительной погрешности 1% в диапазоне допустимых отклонений повысотных отметок от заданного уровня. Время определения повысотных отметок всей зоны загрузки ядерного реактора составляет 10 – 15 минут и ограничивается только скоростью передвижения штанги перегрузочной машины реактора. Это даёт возможность с высокой точностью и быстродействием формировать на центральном пульте АЭС картину состояния перепада верхних площадок ТВС в зоне загрузки реактора, как перед установкой блока защитных труб, так и после его снятия в конце эксплуатационной кампании реактора.

Метод апробирован на экспериментальном образце измерительного устройства, испытания которого подтвердили представленные выше параметры и точности измерений. Устройство может быть выполнено на основе радиационно-стойких элементов, выпускаемых промышленностью. Достигнутая точность измерения высот площадок ТВС в настоящее время может быть обеспечена только описанным методом. При использовании, например, локационного метода для измерений высот площадок ТВС с указанной точностью 0,1 мм, потребовалось бы аппаратура для приема и обработки локационных сигналов в фемтосекундном диапазоне. Такой аппаратуры пока не существует.

Предлагаемый метод может быть использован на реакторных установках типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000 для повышения надежности сборки, получения информации о состоянии и дефектах поверхностей ТВС и других объектов, находящихся в рабочей зоне ядерного реактора под воздействием радиации, что, в конечном счёте, ведёт к повышению безопасности эксплуатации ядерного энергетического реактора.

Литература

1. Линник В.П. *Современный микроскоп и некоторые новые возможности его применения*. Известия АН СССР. 1937, № 4 – 5.
2. Манкевич С.К., Филичкина Л.Л., Чувствина Л.В. *Устройство для контроля точности установки сборок тепловыделяющих элементов в ядерном реак-*

торе. Заявка на изобретение РФ № 2015136357 от 27.08.2015 г. Опубликовано 10.01.2016г. Бюл. Изобретений, 2016. № 1.

3. Левин Б.М. *Оптические методы определения характера профиля поверхностей*. Оптико-механическая промышленность. 1938, № 10 – 11.
4. Афанасьев В.А. *Оптические измерения*. Москва, Высшая школа, 1981. 229 с.

Работа выполнялась по заказу ВНИИАЭС

Сергей Константинович МАНКЕВИЧ

Евгений Прохорович ОРЛОВ

**Метод бесконтактного контроля установки сборок тепло-выделяющих
элементов в водо-водяном энергетическом реакторе**

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 140 экз. Заказ № 18

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН

119991 Москва, Ленинский проспект 53