



Система для эндоскопического контроля тепловыделяющих сборок

С. М. Бечаснов, В. Д. Бармасов, А. И. Попов,
М. А. Завьялова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск, Россия

Описана система для эндоскопического контроля внутренней поверхности направляющих каналов тепловыделяющих сборок водно-водяных энергетических реакторов. Представлены основные структурные элементы системы, в том числе оптическая схема блока приема и обработки изображения. Данный блок обеспечивает угол обзора видеосистемы не менее 90°, дискретность показаний системы вертикального позиционирования 1 мм и длительность однократного полного цикла осмотра направляющих каналов 10 мин.

Ключевые слова: тепловыделяющие сборки (ТВС), тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), эндоскопический контроль

Статья получена: 24.12.2022

Статья принята: 19.02.2023

ВВЕДЕНИЕ

Эндоскопический контроль (далее – ЭК) обладает высокой информативностью и широко используется во многих отраслях промышленности. Так, внутренний осмотр различных деталей и узлов позволяет выявить дефекты и повреждения в местах, недоступных глазу наблюдателя. Зачастую эндоскопия является единственным методом, позволяющим определить состояние ответственных деталей и узлов.

В атомном энергопромышленном комплексе с помощью ЭК решаются задачи повышения эксплуатационного ресурса и надежности тепловыделяющих сборок (ТВС) и тепловыделяющих эле-

System for Endoscopic Control of Heat-eating Assemblies

S. M. Bechasnov, V. D. Barmasov, A. I. Popov,
M. A. Zavialova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The system is described for endoscopic control of the inner surface of the guide channels of the heat-eating assemblies of water-watering energy reactors. The main structural elements of the system are presented, including the optical scheme of the image and processing unit. This block provides an angle of viewing of a video system of at least 90°, discretion of the indications of the vertical positioning system of 1 mm and the duration of a single complete inspection of the guide channels 10 minutes.

Key words: fuel assemblies (FA), fuel elements (FE), endoscopic control

Received on: 24.12.2022

Accepted on: 19.02.2023

INTRODUCTION

The endoscopic control procedure (hereinafter referred to as the EC) is highly informative method widely used in many industries. Thus, an internal inspection of various parts and assemblies makes it possible to identify any defects and damage in the inaccessible places. Endoscopy is often the only method that allows to verify the condition of critical parts and assemblies.

In the nuclear power generation complex, EC is used to solve the issues of increasing the service life and reliability of fuel assemblies (FAs) and fuel elements (FEs) [1, 2]. Thus, the main cause of FE depressurization includes the defects resulting from interaction of the shell with foreign matters

ментов (ТВЭЛов) [1, 2]. Так, основной причиной разгерметизации ТВЭЛов являются дефекты, образующиеся в результате взаимодействия оболочки с посторонними предметами в теплоносителе реактора. Кроме того, встречаются дефекты оболочки в результате ее взаимодействия с дистанционирующей решеткой (ДР), а также связанные с нарушением технологии изготовления ТВЭЛов. Установлено, что в 60% случаев сквозное повреждение оболочек происходит за счет взаимодействия с посторонними предметами, попадающими в пучок ТВЭЛов из теплоносителя. В свою очередь, в сам теплоноситель могут быть занесены остатки материала, образующегося при производстве ТВЭЛов и ТВС.

Таким образом, эндоскопический контроль качества оболочек ТВЭЛов является важной стадией процесса производства топлива для атомных реакторов. Он позволяет проводить осмотр внутренней поверхности направляющих каналов ТВС и фиксировать состояние их внутренней поверхности. В работе представлены результаты разработки и исследования многоканального эндоскопического комплекса для осмотра внутренней поверхности направляющих каналов ТВС водно-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) (далее – Комплекс).

ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА

Комплекс предназначен для одновременного осмотра внутренней поверхности 19 направляющих каналов (далее – НК) и трубы центральной ТВС ВВЭР оператором на предмет обнаружения посторонних предметов и видеофиксации состояния внутренней поверхности.

Общий вид Комплекса представлен на рис. 1. Он состоит из следующих блоков:

- рабочее место оператора-контролера ОТК;
- блок приема и обработки видеoinформации (далее – БПО), располагаемый на крюке кранбалки с проводной системой передачи данных на рабочее место оператора-контролера ОТК;
- система вертикального позиционирования положения блока приема и обработки видеoinформации относительно торца головки ТВС.
- общая подвеска с 19 видеосистемами для осмотра внутренней поверхности направляющих каналов, центрально трубы центральной и ее дна. Кабели передачи данных и электропитания каждой видеосистемы располагаются внутри жесткой оболочки. Подвеска крепится

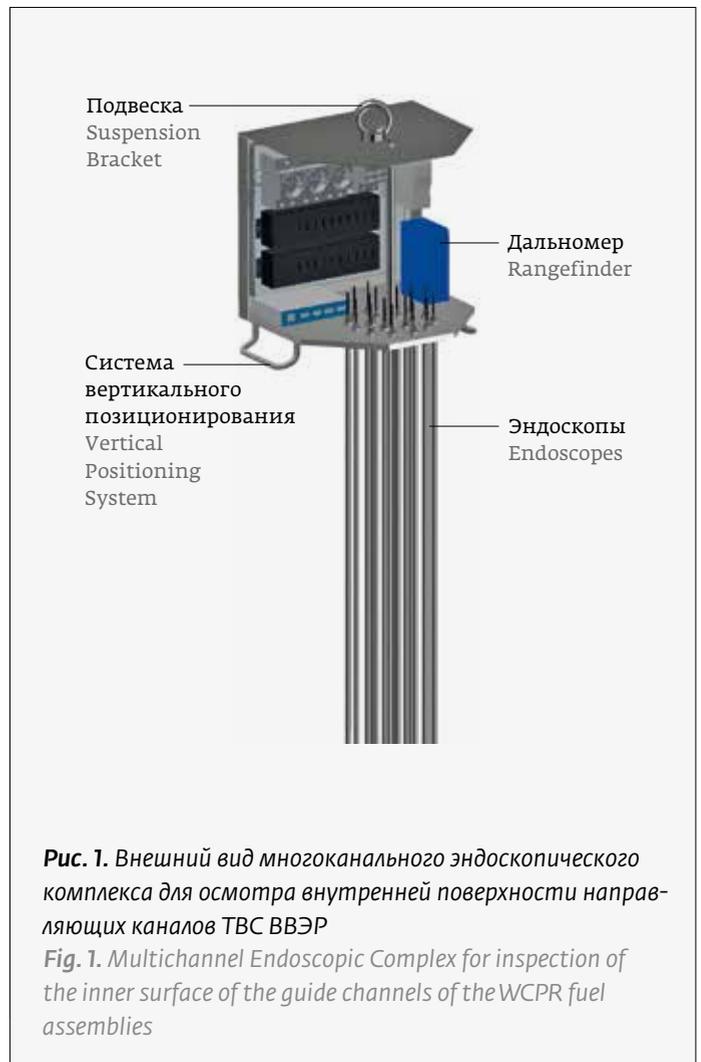


Рис. 1. Внешний вид многоканального эндоскопического комплекса для осмотра внутренней поверхности направляющих каналов ТВС ВВЭР

Fig. 1. Multichannel Endoscopic Complex for inspection of the inner surface of the guide channels of the WCPR fuel assemblies

in the reactor coolant. In addition, there are also shell defects as a result of its interaction with the spacer grid (SG), as well as those related to the irregularities in the FE production process. It has been determined that in 60% of cases, the shell through damage occurs due to interaction with the foreign matter entering the FE bundle from the coolant. In turn, the coolant can contain the remaining material generated during the FE and FA production.

Thus, endoscopic quality control of the FE shells is an important stage in the fuel production process for nuclear reactors. It allows to inspect the inner surface of the FA guide channels and register their inner surface condition. The paper presents the results of development and research of a multichannel endoscopic unit for the internal guide surface inspection of the fuel assemblies in the water-cooled power reactors (WCPR) (hereinafter referred to as the unit).

к блоку обработки фото- видео- информации и в крайнем нижнем положении опирается на торец головки ТВС (непосредственно или через технологическое кольцо);

- технологические кольца под различные типы ТВС для ограничения глубины погружения видеоканалов.

Оптическая схема БПО представлена на рис. 2. С помощью светодиодного осветителя формируется кольцо на внутренней поверхности труб. Отраженный пучок собирается с помощью объектива на камере, данные с которой обрабатываются с помощью специального программного обеспечения (ПО). Функционал ПО и методика обнаружения дефектов будут описаны в следующем разделе.

Данный блок предназначен для осмотра внутренней поверхности направляющих каналов ТВС ВВЭР, получения ее цифровых изображений и передаче их на рабочее место оператора-контролера по кабелю Ethernet.

19 видеосистем и система вертикального позиционирования размещены на подвеске. Максимальная длина погружной части видеоканалов от торца головки ТВС до торца видеокамеры составляет 4410 мм. Наружный диаметр видеоголовки равен 8,2 мм. Дискретность показаний системы вертикального позиционирования достигает 1 мм.

Система вертикального позиционирования относительно торца головки ТВС представляет собой оптоэлектронный бесконтактный измери-

UNIT DESCRIPTION

The unit is designed for simultaneous inspection of the internal surface of 19 guide channels (hereinafter referred to as the GCs) and the central WCPR FA pipe by an operator to detect foreign matters and perform video recording of the internal surface condition.

The general view of the unit is shown in Fig. 1. It consists of the following modules:

- workplace of the QCD controlling operator;
- video data collection and processing unit (hereinafter referred to as the CPU), located on the overhead crane hook with a wired data transmission system to the workplace of the QCD controlling operator;
- vertical positioning system for the position of a video data collection and processing unit relative to the end face of the fuel assembly head;
- general suspension module with 19 video systems for the internal surface inspection of the guide channels, the central pipe and its bottom. The data and power transmission cables for each video system are located inside the rigid shell. The suspension is attached to the photo and video data processing unit and, in its lowest position, rests on the end face of the fuel assembly head (directly or through the process ring);
- process rings for various types of fuel assemblies to limit the immersion depth of video channels.

The optical circuit of the CPU is shown in Fig. 2. A LED light is used to make a ring on the internal surface of the pipes. The reflected beam is clustered using a lens on the camera, the data from which is processed using the special software (SW). The software functions and defect location routine will be described in the next section.

This unit is designed to inspect the internal surface of the guide channels of WCPR fuel assemblies, obtain its digital images and transfer them to the workplace of the controlling operator via an Ethernet cable.

19 video systems and a vertical positioning system are suspended. The maximum length of the submersible part of video channels from the end of the fuel assembly head to the end of the video camera is 4,410 mm. The outer diameter of the video head is 8.2 mm. The

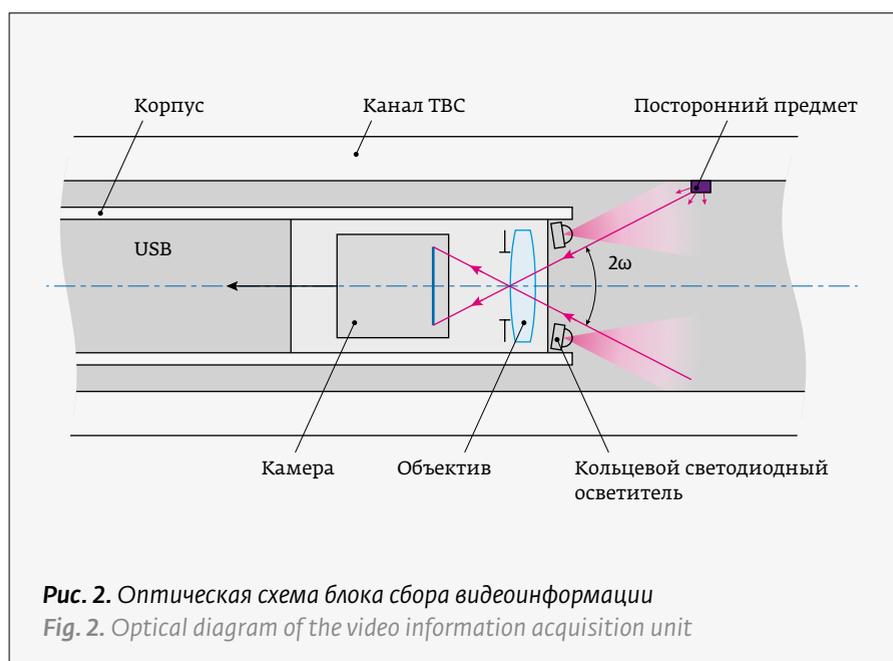


Рис. 2. Оптическая схема блока сбора видеoinформации
Fig. 2. Optical diagram of the video information acquisition unit

тель расстояния глубины погружения подвески в каналы ТВС, выполненный на лазерном дальнотемере FLS-C10 фирмы DIMETIX.

При проведении осмотра ТВС Комплекс выполняет следующие функции:

- проверка работы каналов осмотра;
- проверка работы системы вертикального позиционирования;
- опрос видеоканалов и сохранение снимков;
- вывод снимков и глубины погружения подвески на экран монитора;
- поиск подозрительных мест в ТВС;
- осмотр дна всех ТВС в отдельности.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА

Программное обеспечение Комплекса работает в нескольких режимах:

- режим администрирования, предназначенный для изменения параметров работы Комплекса и настроек программы, просмотра локального протокола;
- режим осмотра, предназначенный для вывода изображения от 19 видеосистем на рабочее место оператора с возможностью выделения выбранного канала и масштабирования изображения;
- информационно-советующий режим, предназначенный для обработки изображения от 19 видеосистем с целью выделения сомнительных участков, их локализации и предоставления информации оператору-контролеру.

Пример изображений видеосистем в режиме «Осмотр» показан на рис. 3.

Осмотр заканчивается при достижении подвеской стопорного технологического кольца.

В режиме администрирования оператор дает команду на прием и сохранение результатов осмотра из БПО. В нем выполняется обработка принятых данных, на экран монитора выводятся изображения всех 19-ти видеоканалов выбранной глубины погружения.

Оператор имеет возможность выполнить просмотр изображе-

reading discreteness of the vertical positioning system reaches 1 mm.

The vertical positioning system relative to the end face of the fuel assembly head is an optoelectronic non-contact measuring device for the suspension immersion depth into the fuel assembly channels, made using the FLS-C10 laser ranging device by DIMETIX.

When inspecting the fuel assemblies, the unit performs the following functions:

- functional check of the inspection channels;
- functional check of the vertical positioning system;
- scanning of video channels and saving the images;
- displaying images and the suspension immersion depth on the monitor;
- search for suspicious points in the fuel assemblies;
- bottom inspection of all fuel assemblies in a separate way.

UNIT SOFTWARE

The unit software can be operated in several modes:

- administration mode designed to change the unit operation parameters and program settings and view the local protocol;
- inspection mode designed to display the images from 19 video systems at the operator's workplace

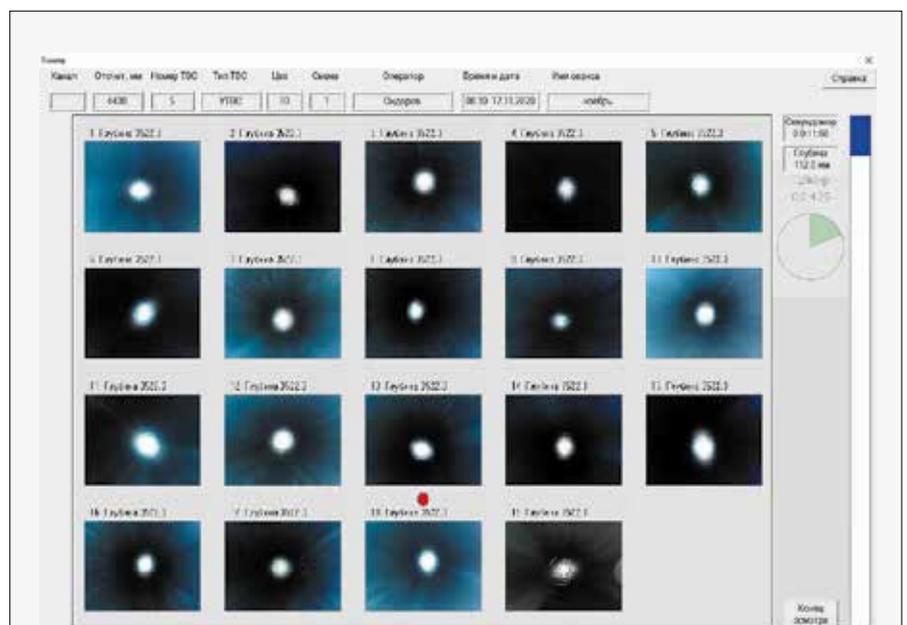


Рис. 3. Пример изображений видеосистем в режиме Осмотр

Fig. 3. Example of images of video systems in the Inspection mode

ний с увеличением масштаба и выделением интересующих «окон».

По команде «Поиск сомнительных участков» выполняется обработка изображений с целью выявления посторонних предметов. В результате формируется протокол осмотра внутренней поверхности направляющих каналов.

В режиме просмотра файлов из архива выполняется обработка данных из выбранного архивного файла.

Пример просмотра изображений видеосистем из архива представлен на рис. 4.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ

Используется два вида обработки изображений: обработка изображения стенок внутренней поверхности направляющих каналов и обработка изображения дна направляющих каналов.

Обработка изображения стенок внутренней поверхности направляющих каналов выполняется с использованием градиента изображения – вектора, показывающего направление наискорейшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой (скалярного поля) [3, 4]. В данном случае градиент для каждой точки изображения (функция яркости) – двумерный вектор, компонентами которого являются производные яркости изображения по горизонтали и вертикали:

$$\text{grad}I(x, y) = (dI/dx, dI/dy).$$

В каждой точке изображения градиентный вектор ориентирован в направлении наибольшего увеличения яркости, а его длина соответствует величине изменения яркости.

Для обнаружения посторонних предметов на стенках внутренней поверхности направляющих каналов вычисляется длина градиентного вектора в каждой точке изображения и сравнивается с некоторым предельно допустимым значением (задается оператором при настройке приложения). Превышение допустимого значения считается обнаружением в точке постороннего предмета.

with the ability to highlight the selected channel and zoom the image;

- informative and advising mode designed to process images from 19 video systems in order to identify the ambiguous areas, locate them and provide information to the controlling operator.

An example of video system images in the inspection mode is shown in Fig. 3.

The inspection is completed when the suspension reaches the retaining processing ring.

In the administration mode, the operator gives a command to receive and save the inspection results from the CPU. It processes the received data and displays the images of all 19 video channels with the selected immersion depth on the monitor.

The operator is able to view the zoomed-in images and highlight the relevant “openings”.

The “search for suspicious areas” command helps to perform the image processing procedure in order to identify foreign matters. As a result, an inspection report relating to the internal surface of the guide channels is generated.

In the archival file viewing mode, data from the selected archive file is processed.

An example of video system archival image viewing is shown in Fig. 4.

IMAGE PROCESSING TO DETECT FOREIGN MATTERS

Two types of image processing are used: image processing of the internal surface walls of the guide



Рис. 4. Пример просмотра изображений видеосистем из архива
Fig. 4. Example of viewing images of video systems from the archive

Проверка дна каналов на наличие посторонних предметов выполняется методом сравнения полученного изображения дна канала с эталонным изображением из базы эталонных изображений. Для этого используется хэш-функция (функция свертки), осуществляющая преобразование изображения (массива входных данных произвольной длины) в выходную битовую строку установленной длины (хэш) [5, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в разработанном многоканальном эндоскопическом комплексе для осмотра внутренней поверхности направляющих каналов ТВС ВВЭР достигнуты следующие технические характеристики:

- угол обзора объектива видеосистемы – не менее 90°;
- дискретность показаний системы вертикального позиционирования 1 мм.
- видеосистема обеспечивает просмотр (четкое изображение) на всю глубину канала ТВС.
- время снятия/установки видеосистемы не более 30 мин;

channels and image processing of the guide channel bottom.

The image processing of the internal surface walls of the guide channels is performed using an image gradient, namely a vector indicating the fastest increase direction of a certain value that is changed from one space point to another (scalar field) [3, 4]. In this case, the gradient for each image point (brightness function) is a two-dimensional vector which components are the horizontal and vertical derivatives of the image brightness:

$$\text{grad} I(x, y) = (dI/dx, dI/dy).$$

At each image point, the gradient vector is oriented in the direction of the greatest increase in brightness, and its length corresponds to the brightness variation value.

To detect foreign matters on the internal surface walls of the guide channels, the gradient vector length at each image point is calculated and compared with a certain maximum allowable value (to be set by the operator during the application setting). Excess



Металлообработка. Сварка – Урал

международная выставка технологий,
оборудования, материалов для машиностроения,
металлообрабатывающей промышленности
и сварочного производства



12–15 марта 2024
Екатеринбург

крупнейший
специализированный
региональный проект в России

(342) 264-64-27
egorova@expoperm.ru
metal-ekb.expoperm.ru





- длительность однократного полного цикла осмотра направляющих каналов (с учетом транспортных операций и архивированием видеoinформации) составляет не более 10 мин.

Комплекс является автономным изделием технологической цепочки в составе оборудования участка контроля и упаковки ТВС ВВЭР в публичном акционерном обществе «Новосибирский завод химконцентратов».

Разработка данного комплекса позволяет значительно повысить скорость и объективность проведения эндоскопического контроля каналов ТВС ВВЭР.

БЛАГОДАРНОСТИ

Финансовая поддержка работы осуществлялась Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

REFERENCES

1. Pavlov S. V. Ul'trazvukovoy metod obnaruzheniya negermetichnykh teplovydelyayushchih elementov yadernykh reaktorov. *Izv. vuzov. Yadernaya energetika*. 2011; 5: 23–38. (In Russ.).
2. Pavlov S. V., Sagalov S. S., Amosov S. V. Sistema nerazrushayushchego kontrolya obluchennykh tvelov dlya stenda inspekcii teplovydelyayushchih sborok VVER. *Izv. vuzov. Yadernaya energetika*. 2010; 3: 5–11. (In Russ.).
3. Mezhenin A. V. *Metody i sredstva raspoznavaniya obrazov i vizualizatsii*. – SPb., 2012; 129 p. (In Russ.).
4. Gonsales R., Vuds R. *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij*. – M.: Tekhnosfera. 2006. 1072 p. (In Russ.).
5. Solovejchik Yu. G., Royak M. E., Persova M. G. *Metod konechnykh elementov dlya skalyarnykh i vektornykh zadach*. – Novosibirsk: NGTU. 2007. 896 p. (In Russ.).
6. Bryus Sh. *Prikladnaya kriptografiya. Protokoly, algoritmy, iskhodnye teksty na yazyke C++*. – M.: Triumf. 2002. 816 s. ISBN 5-89392-055-4. (In Russ.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов С. В. Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. *Иzv. вузов. Ядерная энергетика*. 2011; 5: 23–38.
2. Павлов С. В., Сагалов С. С., Амосов С. В. Система неразрушающего контроля облученных твэлов для стенда инспекции тепловыделяющих сборок ВВЭР. *Иzv. вузов. Ядерная энергетика*. 2010; 3: 5–11.
3. Меженин А. В. *Методы и средства распознавания образов и визуализации*. – СПб., 2012; 129 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. – М.: Техносфера. 2006. 1072 с.
5. Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Персова М. Г. *Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач*. – Новосибирск: НГТУ. 2007. 896 с.
6. Брюс Ш. *Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си*. – М.: Триумф. 2002. 816 с. ISBN 5-89392-055-4.

ОБ АВТОРАХ

Бечаснов Сергей Михайлович, руководитель группы КТИ НП СО РАН, Новосибирск, Россия.
Бармасов Виктор Дмитриевич, ведущий электроник КТИ НП СО РАН, Новосибирск, Россия.
Попов Анатолий Иванович, ведущий программист КТИ НП СО РАН, Новосибирск, Россия.
Завьялова Марина Андреевна, к. т. н, старший научный сотрудник КТИ НП СО РАН, Новосибирск, Россия.
ORCID: 0000-0003-2000-6226

of the allowable value is considered to be the detected foreign matter at such a point.

The channel bottom inspection for the availability of foreign matters is performed by comparing the obtained channel bottom image with a reference image from the certain database. For this purpose, a hash function (convolution function) is used that converts an image (input data array with arbitrary length) into an output bit string of a set length (hash) [5, 6].

CONCLUSION

Thus, the following technical specifications are obtained in the developed multichannel endoscopic unit for the internal guide surface inspection of the fuel assemblies in the water-cooled power reactors:

- viewing angle of the video system lens – not less than 90°;
- reading discreteness of the vertical positioning system – 1 mm.
- the video system provides viewing (clear image) to the entire depth of the FA channel;
- the video system removal/installation time is not more than 30 minutes;
- the duration of a single full inspection cycle for the guide channels (including any transportation activities and video data archivation) is no more than 10 minutes.

The unit is an autonomous process flow tool as a part of the control and packaging equipment for the WCPR fuel assemblies at the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant Public Joint Stock Company.

The development of this unit makes it possible to significantly increase the velocity and credibility of endoscopic inspection of the WCPR FA channels.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support for the paper was provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

ABOUT AUTHORS

Bechasnov Sergey Mikhailovich, team leader, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
Barmasov Viktor Dmitrievich, Leading Electronic Engineer, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
Popov Anatolii Ivanovich, programming supervisor, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
Zavialova Marina Andreevna, Cand. of Scien. (Techn.), senior researcher, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.
ORCID: 0000-0003-2000-6226

20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям

City Park Hotel, СОЧИ
12-15 СЕНТЯБРЯ 2023



На HOLOEXPO 2023 вас ждет

10+ тематических секций

Пленарное заседание

Семинары, круглые столы

Секция стендовых докладов

Демозона и выставка голограмм

Нетворкинг с коллегами

Приветственный коктейль

Конкурс «Лучший доклад»

*Торжественный ужин
в честь юбилея HOLOEXPO*

Экскурсия



HOLOEXPO
science & practice

Подать доклад и зарегистрироваться → www.holoexpo.ru