

*Д. П. Козленко, Б. Мухаметулы, Е. А. Кенжин, С. Е. Кичанов,
Е. В. Лукин, А. А. Шаймерденов, К. Назаров, Б. Н. Савенко*

Создание экспериментальной установки нейтронной радиографии и томографии на реакторе ВВР-К (ИЯФ, Казахстан)

Методы нейтронного имиджинга — радиографии и томографии, позволяющие получать изображения и объемные трехмерные реконструкции внутреннего строения объектов исследования с пространственным разрешением порядка 100 мкм, в настоящее время получили широкое развитие на современных источниках нейтронов [1]. Значительная глубина проникновения нейтронов дает ряд преимуществ методам нейтронной радиографии и томографии по сравнению с рентгеновским излучением и позволяет использовать их для решения широкого круга междисциплинарных научных задач — от исследования структурных особенностей материалов, применяемых в ядерных технологиях, процессов функционирования электрических аккумуляторов и батарей [2], микроструктуры строительных

и конструкционных материалов [3] до изучения внутреннего строения уникальных палеонтологических и археологических объектов [4, 5].

Методы нейтронной радиографии и томографии на протяжении пяти лет успешно используются в исследованиях на базе импульсного высокопоточного реактора ИБР-2. В Республике Казахстан в Республиканском государственном предприятии «Институт ядерной физики» (Алма-Ата, пос. Алатау) одной из базовых установок является стационарный исследовательский атомный реактор ВВР-К, на котором проводятся фундаментальные ядерно-физические и материаловедческие исследования, производятся радиоизотопы для медицины и промышленности. С учетом актуальности и широких прикладных воз-

*D. P. Kozlenko, B. Mukhametuly, Y. A. Kenzhin, S. E. Kichanov,
E. V. Lukin, A. A. Shaimerdenov, K. Nazarov, B. N. Savenko*

The Development of the Experimental Facility for Neutron Radiography and Tomography at the WWR-K Reactor (INP, Kazakhstan)

The neutron imaging methods: radiography and tomography, allowing one to obtain images and three-dimensional reconstruction of the internal structure of studied objects with a spatial resolution of about 100 μm , are widely developed at modern neutron sources [1]. A significant depth of neutron penetration in comparison with X-ray radiation gives a number of advantages to the neutron radiography and tomography methods and allows them to be used for solving a wide range of interdisciplinary scientific problems: from the study of structural features of materials used in nuclear technologies, the processes in electric batteries and power cells [2], the microstructure of con-

struction and building materials [3] to the studies of the internal structure of unique paleontological and archaeological items [4, 5].

The neutron radiography and tomography methods based on the IBR-2 pulsed high-flux reactor have been successfully used in studies within five years. At the Institute of Nuclear Physics (INP) of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Alatau), one of the basic facilities is the stationary research nuclear reactor WWR-K, which carries out fundamental nuclear physical and material research, and produces radioisotopes for medicine and industry. Taking into account the relevance

возможностей методов нейтронной радиографии и томографии, накопленного сотрудниками ЛНФ ОИЯИ опыта по созданию экспериментальных нейтронных установок [6] и заинтересованности со стороны ИЯФ в развитии экспериментальной базы реактора ВВР-К была сформирована совместная рабочая группа для создания установки для исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии на базе реактора ВВР-К. За сравнительно короткий срок были выполнены работы по проектированию этой новой установки, заказу и приобретению специального оборудования и материалов, размещению основных компонентов установки и элементов биологической защиты в экспериментальном зале реактора ВВР-К. В данном сообщении представлены принципиальная схема установки для нейтронной радиографии и томографии, ее основные технические параметры, а также первые экспериментальные результаты.

Новая установка нейтронной радиографии и томографии располагается на канале №1 ре-

актора ВВР-К. Конструкционные особенности экспериментального зала реактора определили достаточно компактную схему установки с массивной бетонной защитой от ионизирующего радиационного излучения (рис. 1).

Поток тепловых нейтронов на выходе канала №1 был измерен методом активации золотых фольг и составляет $\sim 4,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Нейтронный пучок формируется с помощью системы коллиматоров, помещенных в вакуумированный кожух для уменьшения потерь из-за рассеяния нейтронов на воздухе.

Рис. 1. Схема основных узлов установки для исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии на канале №1 реактора ВВР-К: 1 — шибберная заслонка экспериментального нейтронного канала №1; 2 — вакуумированный кожух системы коллиматоров, формирующих нейтронный пучок; 3 — место расположения детекторной системы и поворотных гониометров для нейтронных томографических экспериментов; 4 — элементы бетонной защиты от ионизирующих излучений при проведении нейтронных экспериментов

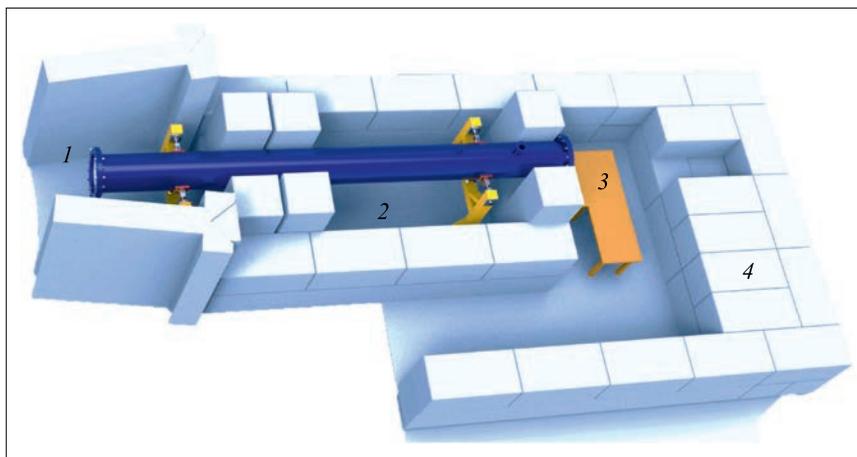


Fig. 1. The scheme of the main components placing at the neutron radiography and tomography facility on beamline No. 1 of the reactor WWR-K: 1 — the shutter of neutron beam of the experimental beamline No. 1; 2 — vacuum casing of the collimator system for forming the neutron beam; 3 — the location of the detector system and goniometers for neutron tomography experiments; 4 — the elements of concrete protection against ionizing radiation

and wide application capabilities of the neutron radiography and tomography methods, the experience of the development of experimental neutron facilities by the staff members of JINR FLNP [6] and the interest of the INP Directorate in the development of the experimental facilities of the WWR-K reactor, a joint working group has been formed to develop a neutron radiography and tomography facility at the WWR-K reactor. In a relatively short time, the design of this new facility, ordering and purchasing of special equipment and materials, and the installation of the main components of the biological protection shell in the experimental hall of the reactor WWR-K were performed. This report presents the scheme of the neutron radiography and tomography facility, its main technical parameters, as well as the first experimental results.

The new neutron radiography and tomography facility is located on the first beamline of the WWR-K reactor. A compact scheme of the facility with a massive concrete

protection against ionizing radiation determines the design of the experimental hall of the reactor (Fig. 1).

The thermal neutrons flux at the output of beamline No. 1 was measured by the method of activation of gold foils and it is $\sim 4.5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The neutron beam is formed by a system of collimators placed in a vacuum casing to reduce losses due to neutron scattering in the air. Collimators form a neutron beam with a diameter of 60 mm at the entrance to 150 mm at the exit of the neutron beam from the collimator system. The quality of the obtained neutron images depends on the parameter L/D [7], which is determined by the ratio of the distance L between the input aperture of the collimator system and the sample

Коллиматоры формируют нейтронный пучок с диаметром 60 мм на входе и 150 мм на выходе пучка из системы коллиматоров. Качество получаемых нейтронных изображений зависит от параметра L/D [7], который определяется отношением расстояния L между входной апертурой коллиматорной системы и положением исследуемого образца к диаметру входной апертуры коллиматоров D . Соответствующие значения для созданной установки составляют $L = 5,2$ м, $D = 6$ см, что соответствует значению параметра $L/D = 87$.

Для получения нейтронных изображений используется специальный детектор на двухзеркальной оп-

тической схеме для защиты видеокамеры от радиационного излучения (рис. 2), разработанный компанией SOL Instruments (Белоруссия). Нейтронное изображение от прошедшего через исследуемый объект нейтронного пучка трансформируется в световой сигнал с помощью сцинтилляционного экрана на основе ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ или $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$. Световой сигнал от сцинтиллятора, отражаясь от двух поворотных зеркал, фокусируется объективом с переменным фокусным расстоянием на CCD-матрицу высокочувствительной видеокамеры на основе матрицы Hamamatsu с разрешением 2048×2048 пикселей.

На созданной станции нейтронной радиографии и томографии проведены первые успешные эксперименты. В качестве примера на рис. 3 представлены нейтронные изображения металлических объектов: будильника, навесного замка и ротора двигателя. На нейтронном изображении отчетливо видны внутренние части будильника: пружины, стальные дужки, зубчатые колесики. В то же время наблюдается хороший нейтронный контраст

Рис. 2. Детекторная система для установки нейтронной радиографии и томографии реактора ВВР-К: 1 — цифровая видеокамера высокого разрешения на основе CCD-матрицы Hamamatsu с воздушным охлаждением; 2 — объектив с переменным фокусным расстоянием TAMRON с пьезодвигателями для удаленного управления фокусом оптической системы; 3 — механическая система юстировки двух поворотных зеркал; 4 — пластина нейтронного сцинтиллятора

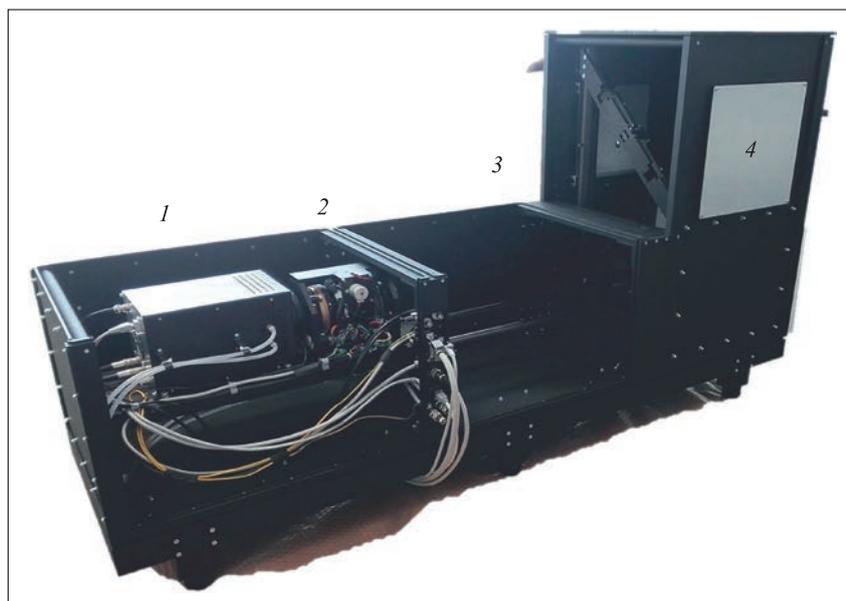


Fig. 2. The detector system for the neutron radiography and tomography facility at the WWR-K reactor: 1 — the high-resolution digital video camera based on air-cooled Hamamatsu CCD chip; 2 — objective lens TAMRON with a variable focal length with the motors for remote control; 3 — the mechanical system for an alignment of two optical mirrors; 4 — the neutron scintillator screen

position to the diameter D of the input aperture of the collimators. The related values for the developed facility are $L = 5.2$ m, $D = 6$ cm, which corresponds to the value of the parameter $L/D = 87$.

A special detector based on a two-mirror optical scheme for radiation protection of the video camera developed by SOL Instruments company (Belarus) is used to obtain neutron images (Fig. 2). The neutron beam passing through the studied object is transformed into the light sig-

nals by means of a scintillation screen from ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ or $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}$ materials. The light signal from the scintillator, reflecting from two mirrors, is focused by a lens with a variable focal length on the CCD matrix based on the Hamamatsu chip of a high-sensitive video camera with a resolution of 2048×2048 pixels.

Recently, the first successful experiments have been performed at the neutron radiography and tomography facility. As an example, the neutron images of metal objects (alarm clock, padlock and engine rotor) are shown in Fig. 3. The internal parts of the alarm clock (springs, steel arms, gears) are clearly visible on the neutron image. At the same time, there is a good neutron contrast between the different parts of the metal lock and the engine parts.

These results demonstrate good prospects for the neutron radiography and tomography facility at the WWR-K reactor for neutron studies in various fundamental and applied areas. Further methodological development of the fa-

между различными частями металлического замка и частями двигателя.

Данные результаты демонстрируют хорошие перспективы использования установки нейтронной радиографии и томографии на реакторе ВВР-К для нейтронных исследований в различных фундаментальных и прикладных областях. Дальнейшее методическое развитие установки будет направлено на улучшение ее технических параметров и развитие метода

Рис. 3. Первые нейтронные изображения, полученные на станции нейтронной радиографии и томографии на реакторе ВВР-К: 1 — будильник; 2 — навесной замок; 3 — ротор маленького двигателя. Нейтронный контраст формируется между стальным корпусом, осью двигателя и латунных щеточек

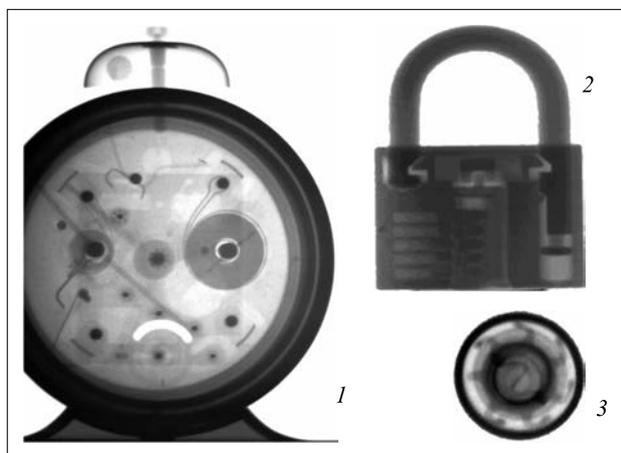


Fig. 3. The first neutron images obtained at the neutron radiography and tomography facility at the WWR-K reactor: 1 — the alarm clock; 2 — the padlock; 3 — the rotor of a small engine. The neutron contrast is formed between the steel body, the motor axis and the brass brushes

cility will be aimed at improving its technical parameters and the development of the neutron tomography method. Work is planned to improve the spatial resolution of the facility and the development of additional radiation protection. The possibilities of varying the diameter D of the input aperture of the collimator system will increase the L/D parameter to 435.

нейтронной томографии, запланированы работы по улучшению пространственного разрешения установки и разработке дополнительной радиационной защиты. Прорабатываются возможности варьирования диаметра D входной апертуры коллиматорной системы, что позволит увеличить параметр L/D до 435.

Список литературы / References

1. Neutron Imaging and Applications: A Reference for the Imaging Community / Eds. I.S.Anderson, R.L.McGreevy, H.Z.Bilheux. New York: Springer, 2009. P.341.
2. Siegel J.B., Lin X., Stefanopoulou A.G. et al. Neutron Imaging of Lithium Concentration in LFP Pouch Cell Battery // J. Electrochem. Soc. 2011. V.158. P.A523.
3. Perfect E., Cheng C.-L., Kang M., Bilheux H.Z., Lamanana J.M., Gragg M.J., Wright D. M. Neutron Imaging of Hydrogen-Rich Fluids in Geomaterials and Engineered Porous Media // Earth-Sci. Rev. 2014. V.129. P.120–135.
4. Abramson M.G., Saprykina I.A., Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Nazarov K.M. A Study of the Chemical Composition of the 3rd Century AD Bosporan Billon Staters by XRF-Analysis, Neutron Tomography and Diffraction // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2018. V.12. P.114–117.
5. Kichanov S.E., Saprykina I.A., Kozlenko D.P., Nazarov K., Lukin E.V., Rutkauskas A.V., Savenko B.N. Studies of Ancient Russian Cultural Objects Using the Neutron Tomography Method // J. Imaging. 2018. V.4. P.25.
6. Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E.V., Rutkauskas A.V., Belushkin A.V., Bokuchava G.D., Savenko B.N. Neutron Radiography and Tomography Facility at IBR-2 Reactor // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V.13. P.346.
7. Williams S.H., Hilger A., Kardjilov N., Manke I., Strobl M., Douissard P.A., Martin T., Riesemeier H., Banhart J. Detection System for Microimaging with Neutrons // J. Instrum. 2012. V.7. P.02014.