

*С. Е. Кичанов, Е. В. Лукин, Д. П. Козленко, В. Н. Швецов,
С. А. Куликов, Б. А. Абдурахимов, М. Ю. Ташметов,
Б. С. Юлдашев, Н. Б. Исматов, А. Р. Саидов, А. Нормуродов*

Создание новой станции нейтронного имиджинга в Институте ядерной физики (Узбекистан): трансфер знаний и опыта ОИЯИ странам-участницам

Развитие приборной базы реконструированных исследовательских ядерных реакторов является устойчивой тенденцией последних лет в ряде стран. Технические параметры таких реакторов достаточны для реализации экспериментальных возможностей исследований методами рассеяния нейтронов в различных междисциплинарных научных областях, включая физику конденсированного состояния, материаловедение, неразрушающую структурную диагностику, археологию, палеонтологию и др. [1, 2].

Одним из относительно простых и эффективных методов рассеяния нейтронов является нейтронный

имиджинг (нейтронная радиография и томография). За последние годы в Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) ОИЯИ накоплен достаточно большой опыт как в области применения этих методов в междисциплинарных исследованиях, так и в области разработки и создания соответствующих экспериментальных установок [3]. Этот опыт стал предметом особого интереса со стороны государств-членов ОИЯИ, имеющих собственные недавно реконструированные исследовательские реакторы, требующие развития научной инфраструктуры. Хорошим примером является станция нейтронной радиографии и томографии, созданная

*S. E. Kichanov, E. V. Lukin, D. P. Kozlenko, V. N. Shvetsov,
S. A. Kulikov, B. A. Abdurakhimov, M. Yu. Tashmetov,
B. S. Yuldashev, N. B. Ismatov, A. R. Saidov, A. Normurodov*

Development of New Neutron Imaging Facility at the Institute of Nuclear Physics (Uzbekistan): Transfer of JINR Expertise to Member States

Development of neutron scattering instrumentation of the reconstructed or updated nuclear reactors is an ongoing trend in several countries. The parameters of such reactors are potentially sufficient for experimental studies of condensed matter by neutron scattering methods in the interdisciplinary fields, including condensed matter physics, materials science, nondestructive structural diagnostics, archeology, paleontology, etc. [1, 2].

One of relatively simple and effective neutron scattering techniques is the neutron imaging (radiography and tomography). At FLNP JINR, the proficient expertise in research using neutron imaging methods and development of relevant instrumentation have been gained during the recent years [3]. This expertise has become a subject of spe-

cific interest from the JINR Member States, having their own recently renewed reactors, requiring development of neutron scattering instrumentation. A good example is the neutron radiography and tomography facility, which was developed on the WWR-K research reactor at the Institute of Nuclear Physics (Almaty, Republic of Kazakhstan) jointly by the FLNP JINR and INP staff [4].

Recently, the Directorate of the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (INP AS RUz) expressed interest in collaboration with FLNP JINR for development of the neutron imaging facility at the WWR-SM reactor.

The WWR-SM water-moderated research reactor is located in the Ulugbek settlement 30 km from Tashkent.

и запущенная в эксплуатацию на исследовательском реакторе ВВР-К в Институте ядерной физики (Алма-Ата, Республика Казахстан) совместно сотрудниками ЛНФ ОИЯИ и ИЯФ [4].

Дирекция Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан (ИЯФ АН РУз) выразила заинтересованность в сотрудничестве с ЛНФ ОИЯИ по разработке и созданию установки нейтронного имиджинга на реакторе ВВР-СМ.

Исследовательский реактор ВВР-СМ с водным охлаждением расположен в поселке Улугбек в 30 километрах от Ташкента. Он возобновил работу в 2017 г., и теперь этот реактор используется для исследований в широком спектре научных направлений, таких как ядерная физика, нейтронно-активационный анализ,

облучение минералов, а также производство радиоизотопов для медицины. В связи с растущей тенденцией запросов научного сообщества в междисциплинарных прикладных исследованиях [2, 3] в области техники, растениеводства, геофизики, астрофизики, археологии и палеонтологии было принято решение о создании новой экспериментальной установки нейтронного имиджинга на базе реактора ВВР-СМ. Проектирование новой установки, заказ и производство необходимого оборудования, монтаж основных узлов экспериментальной станции были выполнены совместной рабочей группой ЛНФ ОИЯИ – ИЯФ АН РУз в довольно короткие сроки. Установка нейтронного имиджинга, созданная на 5-м канале реактора ВВР-СМ (рис. 1), введена в эксплуатацию в 2020 г.

Рис. 1. Схема установки нейтронного имиджинга на 5-м канале реактора ВВР-СМ [5]. Показаны коллимационная система в вакуумированной трубе (1), бетонная биологическая защита (2), детекторная система и положение гониометра (3). На фотографии детекторной системы представлены поворотный гониометр (4), позиция сцинтилляционного экрана (5) и светонепроницаемый бор-полиэтиленовый кожух с CCD-камерой и объективом (6)

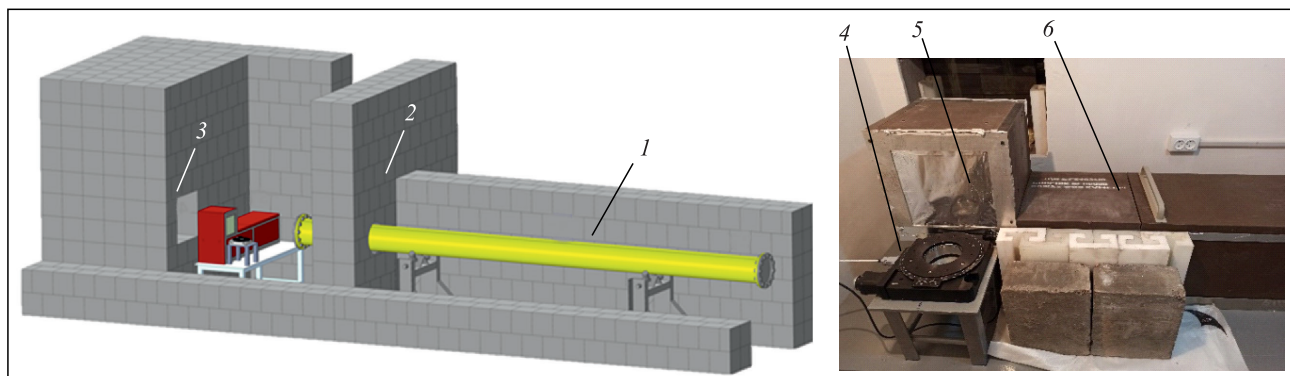


Fig. 1. The layout of the neutron imaging facility at the 5th beamline of the WWR-SM reactor [5]. The collimator system in the evacuated tube (1), the concrete biological shielding (2), detector system and goniometer position (3) are shown. The rotation goniometer (4), the scintillation screen position (5), and light-tight boron-containing polyethylene box with CCD-camera and optical lens (6) are shown in photo of the detector system of the neutron imaging facility

It resumed operation in 2017, and now this reactor is used in a wide range of scientific areas like nuclear physics, neutron activation analysis and irradiation of minerals, as well as for the production of radioisotopes for nuclear medicine. Taking into account growing trend of requests from the scientific community in interdisciplinary applied studies [2, 3] in engineering and plant science, geophysics, astrophysics, archeology and paleontology, it was decided to develop a new neutron imaging experimental facility based on the WWR-SM reactor. In a relatively short time, the design of the new facility, ordering and construction of necessary equipment and the installation of main components were performed by joint JINR – INP AS RUz working team. The neutron imaging facility, installed at the 5th beamline of the WWR-SM reactor (Fig. 1), was put into operation in 2020.

The neutron beam is formed using a composite collimation system, which consists of several layers: the paraffin part with the length of 300 mm, boron-containing polyethylene of 100 mm, cadmium foil of 1 mm, and lead layer with the dimension of 100 mm. It provides protection against both gamma radiation and fast neutrons, which are present in the incident neutron spectrum. The characteristic parameter of the L/D ratio, characterizing neutron beam divergence of the facility, is 600. The scintillation screen ${}^6\text{LiF/Zn(Cd)S:Ag}$ manufactured by RC TRITEC Ltd (Switzerland) is used as a neutron converter. Thickness of the scintillator is 0.2 mm. The light is reflected out of the beam by two mirrors and focused on CCD chip of the ProLine PL-09000 camera manufactured by Finger Lakes Instrumentation (New York, USA). The spatial resolution of the neutron imaging facility is 280 μm .

Пучок нейтронов формируется с помощью композитной коллимационной системы, состоящей из нескольких чередующихся слоев: парафиновой части длиной 300 мм, бор-полиэтилена толщиной 100 мм, миллиметровой кадмиевой фольги и свинцового слоя толщиной 100 мм. Такой коллиматор обеспечивает защиту как от гамма-излучения, так и от быстрых нейтронов, присутствующих в спектре нейтронов. Параметр соотношения L/D , характеризующий расходимость пучка нейтронов, равен 600. В детекторной системе используется сцинтилляционный экран ${}^6\text{LiF}/\text{Zn}(\text{Cd})\text{S}:\text{Ag}$ производства RC TRITEC Ltd (Швейцария). Толщина сцинтиллятора составляет 0,2 мм. Свет от сцинтил-

лятора отражается от двух зеркал и фокусируется на CCD-сенсоре камеры ProLine PL-09000 производства Finger Lakes Instrumentation (Нью-Йорк, США). Пространственное разрешение станции нейтронного имиджинга составляет 280 мкм.

Примером первых экспериментальных результатов, полученных на новой установке, может быть нейтронное изображение навесного замка в металлическом корпусе (рис. 2). Внутренний механизм замка и его стальные элементы хорошо различимы на нейтронном радиографическом изображении. Наблюдается хороший контраст между различными частями исследуемого замка. На рисунке также представлено

Рис. 2. Слева: фотография и нейтронное изображение металлического замка. Справа: фотография ростка кукурузы и нейтронное изображение корней исследуемого растения в пластиковом контейнере



Fig. 2. Left: photo and neutron imaging of the metal padlock. Right: photo of the corn and the neutron radiographic image of the roots of the corn plant in the plastic container

Рис. 3. Бронзовая курильница в форме оленя. Представлены восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель курильницы и несколько виртуальных срезов этой модели. Цветовая схема соответствует коэффициентам затухания нейтронного пучка от низкого (зеленый) до высокого (красный) уровня

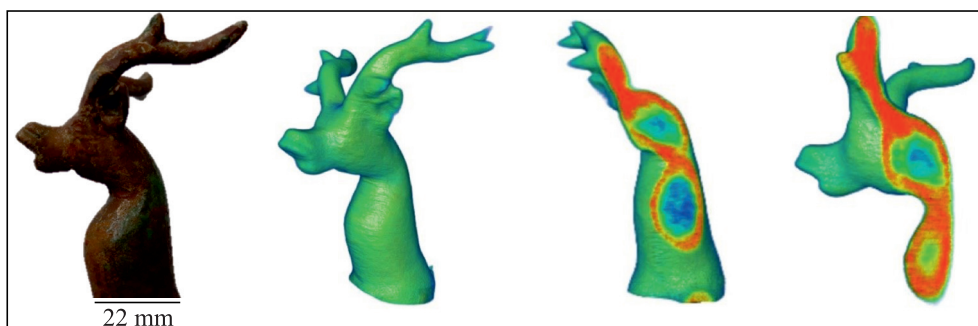


Fig. 3. Bronze deer-shaped incense burner. The 3D model after tomographic reconstruction procedure and different virtual slices of the obtained 3D data are given. The rainbow-like coloring shows the attenuation coefficients of the neutron beam from low (green) to high (red) level

As an example of the first neutron radiography experiments on the new facility, the neutron image of a metal casing padlock is shown in Fig. 2. The inner lock gears and steel arc are visible and well distinguishable. There is a good neutron contrast between the different parts of the metal lock. Also, the neutron radiographic image of the

complex system of the corn roots is shown. The neutrons easily penetrate the plastic container and provide visual data about hidden organic matter.

The ancient Uzbekistan cultural place was an important trading center on the Silk Route [6], and the Uzbek nation is a rich mixture of different cultures as a result of the

нейтронное радиографическое изображение системы корней ростка кукурузы. Нейтроны легко проникают через пластиковый контейнер и почву и визуализируют структуру органического вещества.

Исторически Узбекистан являлся важным торгово-промышленным регионом на Великом шелковом пути [6], а его культурное наследие, формировавшееся в течение нескольких тысячелетий, обусловлено сочетанием множества этнических культур. Неразрушающий характер методов нейтронной радиографии и томографии имеет хорошие перспективы для изучения структурной организации уникальных археологических объектов культурного наследия региона. Подобные исследования будут являться одним из ключевых направлений планируемых экспериментальных работ на созданной установке [2, 7]. Первым изученным археологическим объектом стала бронзовая курильница в форме оленя (рис. 3), датируемая III–IV вв. н. э. и найденная на археологических раскопках в районе поселения Дальверзинтепа Сурхандарьинской обл. Республики Узбекистан. Нейтронные эксперименты выявили скрытые внутренние полости в объеме металлического корпуса курильницы.

Представленные первые экспериментальные результаты указывают на значительный потенциал для

clash of civilizations. The nondestructive character of the neutron radiography and tomography method has prompted the rising interest in studying rare archeological items. One of the important research directions that will be developed at the new neutron facility is the nondestructive neutron studies of the cultural heritage objects [2, 7]. The first studied cultural object was the bronze deer-shaped incense burner (Fig. 3), dated to the III–IV centuries A.D. and found at an archeological site around the Dalvarzintepa settlement of the Surkhandarya region of Uzbekistan. The neutron experiments revealed inner empty space inside metal body of the incense burner.

These first results demonstrate a significant potential for research in various multidisciplinary areas, including engineering and materials sciences, archeology, plant cultivation, etc. The joint work provides an opportunity to bring cooperation between the institutions to a new level. Based on the experience of FLNP JINR, further activities will be focused on the improvement of the technical parameters and the realization of an extensive scientific program at the constructed neutron imaging facility.

использования методов нейтронного имиджинга в различных междисциплинарных областях исследований, включая инженерные науки и материаловедение, археологию, растениеводство и др. Совместное создание установки позволило вывести сотрудничество между участвующими научными организациями на новый качественный уровень. На основе опыта ЛНФ ОИЯИ дальнейшая деятельность совместной группы будет направлена на улучшение технических параметров созданной установки нейтронного имиджинга и реализацию обширной научной программы с помощью методов нейтронной радиографии и томографии.

Список литературы / References

1. *Lehmann E. H., Peetermans S., Betz B.* Instrumentation in Neutron Imaging — A World-Wide Overview // *Neutron News*. 2015. V. 26. P. 6–10.
2. *Podurets K. M., Kichanov S. E., Glazkov V. P., Kovalenko E. S., Murashev M. M., Kozlenko D. P., Lukin E. V., Yatsishina E. B.* Modern Methods of Neutron Radiography and Tomography in Studies of the Internal Structure of Objects // *Crystallogr. Rep.* 2021. V. 66, No. 2. P. 254–266.
3. *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.
4. *Nazarov K. M., Muhametuly B., Kenzhin E. A., Kichanov S. E., Kozlenko D. P., Lukin E. V., Shaimerdenov A. A.* New Neutron Radiography and Tomography Facility TITAN at the WWR-K Reactor // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2020. P. 164572.
5. *Abdurakhimov B. A., Tashmetov M. Yu., Yuldashev B. S., Kichanov S. E., Lukin E. V., Kozlenko D. P., Kulikov S. A., Shvetsov V. N., Ismatov N. B., Saidov A. R., Normurodov A. B., Rutkauskas A. V.* New Neutron Imaging Facility at the WWR-SM Reactor: Design and First Results // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 989. P. 164959.
6. *Kilic-Schubel N.* Timurid Empire // *The Encyclopedia of Empire*. 2016. P. 1–11.
7. *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, No. 2. P. 25.