

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

*Д. П. Козленко, С. Е. Кичанов¹, Е. В. Лукин, А. В. Руткаускас,
А. В. Белушкин, Г. Д. Бокучава, Б. Н. Савенко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

На модернизированном импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 создана экспериментальная станция для проведения исследований с помощью метода нейтронной радиографии и томографии. Нейтронный пучок сечением 20×20 см формируется системой коллиматоров, для которой значение характеристического параметра L/D может варьироваться от 200 до 2000. Детекторная система базируется на сцинтиляционном экране ${}^6\text{LiF/ZnS}$ с регистрацией изображений высокочувствительной видеокамерой на основе CCD-матрицы высокого разрешения. Представлены результаты первых нейтронных радиографических и томографических экспериментов, проведенных на созданной установке.

A new neutron radiography and tomography facility at a modernized high flux pulsed reactor IBR-2 have been developed. The neutron beam with dimension 20×20 cm is formed by a collimator system, where characteristic L/D ratio can be vary from 200 to 2000. The detector system is based on a scintillator screen ${}^6\text{LiF/ZnS}$ with image registration by means of the high-resolution high-sensitive CCD camera. The first results of a radiography and tomography experiments obtained by means of a new experimental facility are presented.

PACS: 28.20.Pr; 81.70.-q; 81.70.Ex

ВВЕДЕНИЕ

Метод нейтронной радиографии заключается в получении нейтронных изображений исследуемых объектов. За счет разной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через компоненты различного химического состава, плотности и толщины изучаемого образца можно получить информацию о внутреннем строении исследуемых материалов с пространственным разрешением на микронном уровне [1]. Этот метод неразрушающего контроля характеризуется более глубоким проникновением в толщу исследуемого материала по сравнению с комплементарным методом рентгеновской радиографии и обладает преимуществами при исследовании объектов, одновременно содержащих как легкие элементы (например, водород или литий), так и тяжелые.

¹E-mail: ekich@nf.jinr.ru

Все современные и вновь создаваемые источники нейтронов оснащаются сегодня установками для нейтронной радиографии и томографии [2]. Метод нейтронной радиографии в настоящее время находит широкое применение в исследованиях материалов и изделий для ядерных технологий, палеонтологических и геофизических объектов [3], объектов культурного наследия [4]. Следует отметить, что в настоящее время также большое внимание уделяется уникальным исследованиям физических и химических процессов в топливных элементах и батареях [5], процессов, связанных с проникновением водорода или воды в толщу различных материалов. Функциональным развитием метода нейтронной радиографии является нейтронная томография. В этом методе выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта из набора отдельных радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления нейтронного пучка [1, 6].

Появление современных детекторов для получения нейтронных изображений на основе ССD-камер и развитие высокопоточных источников нейтронов дало новый импульс развитию методов нейтронной радиографии и томографии и созданию специализированных экспериментальных установок [2, 7] в мировых нейтронных центрах. Одной из базовых установок Объединенного института ядерных исследований является модернизированный высокопоточный реактор ИБР-2, который входит в число наиболее интенсивных импульсных нейтронных источников в мире. Уже в 1985 г. в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ В. М. Назаровым с коллегами на этом реакторе были выполнены первые работы по нейтронной радиографии. В 2013 г. была создана специализированная станция для исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии [8]. Следует отметить, что импульсный характер работы реактора ИБР-2 открывает широкие перспективы для реализации энергодисперсионной нейтронной радиографии с помощью времяпролетной методики [9], при которой выбор оптимального диапазона энергий падающих нейтронов позволяет усиливать контраст деталей объекта в эксперименте.

В представленной работе подробно описывается конструкция и основные параметры новой экспериментальной установки для исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии, созданной на 14-м канале высокопоточного импульсного реактора ИБР-2. Также представлены результаты первых экспериментов по исследованию различных объектов, проведенных на созданной установке.

1. ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

Схема основных узлов созданной экспериментальной установки для нейтронной радиографии и томографии представлена на рис. 1.

Нейтронный пучок формируется с помощью системы коллиматоров, состоящей из четырех кольцевых цилиндрических вставок, выполненных из борированного полиэтилена, чередующихся с дополнительными стальными кольцами для жесткости конструкции. Внутренние диаметры кольцевых коллиматоров расширяются с 5 см на входе до 23,7 см на выходе нейтронного пучка из системы коллиматоров. Известно [1, 5, 11], что пространственное разрешение радиографических установок, а значит, и качество получаемых нейтронных изображений зависят от характеристического параметра L/D , кото-

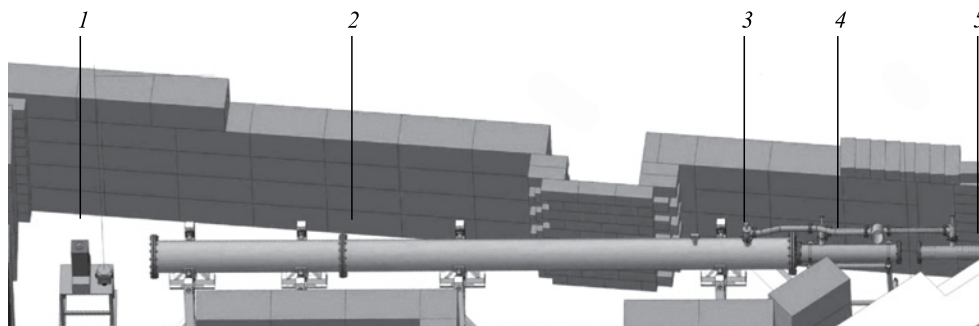


Рис. 1. Схема основных узлов экспериментальной установки для исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии на 14-м канале реактора ИБР-2: 1 — детекторная система и система поворотных и наклонных гониометров для позиционирования исследуемого образца в нейтронном пучке; 2 — вакуумированный кожух системы коллиматоров, формирующих нейтронный пучок; 3 — вакуумный пост для откачки воздуха из кожуха системы коллиматоров; 4 — место расположения монокристаллического висмутового фильтра для нейтронного пучка; 5 — закладная труба для коллиматоров, формирующих пучок от замедлителя реактора

рый определяется отношением расстояния L между входной апертурой коллиматорной системы и положением исследуемого образца к диаметру входной апертуры коллиматоров D . Пространственное разрешение нейтронных изображений тем лучше, чем выше значение этого параметра L/D . Длина L для новой станции нейтронной радиографии и томографии составляет 10 м, а диаметр входного отверстия коллиматора D равен 5 см, что соответствует значению $L/D = 200$. Конструкция системы коллиматоров позволяет уменьшать диаметр входной апертуры до 0,5 см, что дает возможность достигать значения $L/D = 2000$. Такие значения характеристического параметра L/D соответствуют аналогичным параметрам ведущих нейтронных установок для нейтронной радиографии мировых научных центров [2, 7]. Система коллиматоров помещена в вакуумированный кожух для уменьшения потерь в интенсивности из-за рассеяния нейтронов на воздухе.

Интегральный поток тепловых нейтронов в позиции образца измерялся методом активации золотых фольг и составляет $\Phi \sim 5,5(2) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Также с помощью точечного газового ^3He -счетчика измерено спектральное распределение тепловых нейтронов по длинам волн в падающем нейтронном пучке (рис. 2, а). Оно имеет выраженный максимум на $\lambda \sim 1,8 \text{ \AA}$.

Фото детекторной системы на основе CCD-видеокамеры, используемой в экспериментальной установке нейтронной радиографии и томографии, представлено на рис. 2, б. Конвертация нейтронов в фотоны, регистрируемые CCD-видеокамерой, происходит с помощью пластины сцинтиллятора $^6\text{LiF/ZnS}$ толщиной 0,2 мм производства фирмы RC TRITEC Ltd (Швейцария). Для защиты видеокамеры от радиационного излучения свет от сцинтиллятора отражается от поворотного зеркала, наклоненного под углом 45° по отношению к оси падающего нейтронного пучка, и попадает в оптическую систему видеокамеры. Все оптические системы детектора находятся в светозащитном кожухе. Технические параметры высокочувствительной видеокамеры высокого разрешения и ее

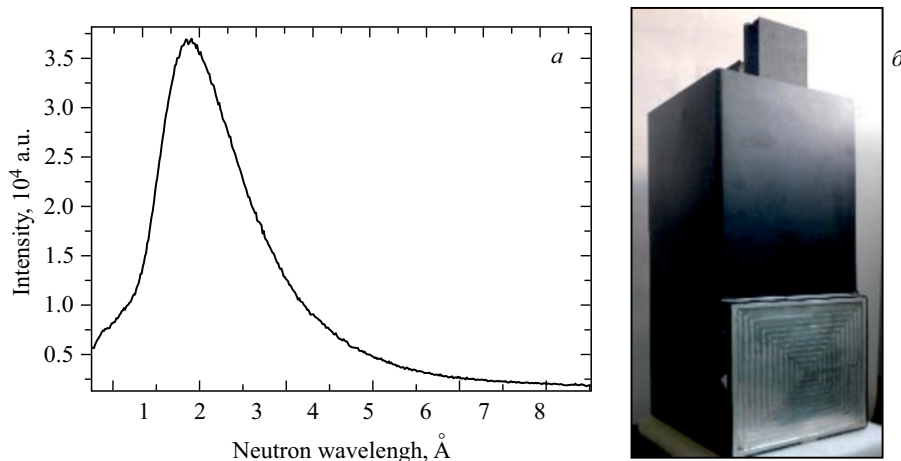


Рис. 2. а) Нейтронный спектр в позиции образца, полученный на установке нейтронной радиографии и томографии на 14-м канале реактора ИБР-2. б) Фото детекторной системы на основе сцинтиллятора и высокочувствительной CCD-видеокамеры

Основные технические параметры экспериментальной установки нейтронной радиографии и томографии

Характеристический параметр коллимации L/D : размер входной апертуры коллиматорной системы D , мм расстояние между апертурой системы и положением образца L , м размеры нейтронного пучка (field-of-view: FOV-станции), см	200–2000 5–50 10 20 × 20
Характеристические параметры регистрирующей видеокамеры: тип высокочувствительной видеокамеры размер CCD-матрицы, пиксель размер CCD-матрицы, мм размер одного пикселя матрицы, мкм охлаждение на основе пельтье-элемента, °С параметры оптической системы видеокамеры	VIDEOSCAN-11002-2001 4008 × 2672 36 × 24 9 × 9 до – 25 На основе объектива «Nikon» с фокусным расстоянием 50 мм и шириной диафрагмы 1 : 1,4D

оптической системы представлены в таблице. Для расчета пространственного разрешения детекторной системы использовался метод размытия изображения [12] края кадмиевой пластины толщиной 0,2 мм. Из профиля краевого изображения этой пластины рассчитывались функции линейного пространственного распределения [13] и итоговое пространственное разрешение детекторной системы. Получено, что размер одного пикселя нейтронного радиографического изображения составляет 81 × 81 мкм, а пространственное разрешение изображений, регистрируемых при размере нейтронного пучка 20 × 20 см, — 324 мкм.

Проведение томографических экспериментов обеспечивает система гониометров HUBER с минимальным углом поворота до $0,02^\circ$ и системой удаленного управления. Высокий поток нейтронов на исследуемом образце определяет короткое время экспозиции — от 10 с при регистрации одного изображения.

Полученные нейтронные изображения корректируются на фоновые шумы детекторной системы и нормализуются на падающий нейтронный пучок с помощью программного пакета ImageJ [14]. Томографическая реконструкция из набора угловых проекций исследуемых объектов осуществляется программой H-PITRE [15]. Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных используется программный комплекс VGStudio MAX 2.2 фирмы «Volume Graphics» (Гейдельберг, Германия).

С точки зрения дальнейшего развития методики можно отметить, что импульсный характер работы реактора ИБР-2 открывает широкие перспективы для реализации энергодисперсионной нейтронной радиографии [10]: полное сечение рассеяния нейтрона в кристаллических материалах имеет сильные скачки при определенных длинах волн (так называемые брегговские края поглощения), поэтому, используя выбор оптимального диапазона энергий нейтронов в эксперименте, можно усиливать контраст составляющих частей объекта из определенного материала для их более детального анализа. Выбор диапазона энергий падающих на образец нейтронов планируется реализовать с помощью времяпролетной методики, что значительно расширит возможности исследований на экспериментальной станции нейтронной радиографии и томографии.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПРОВЕДЕННЫХ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

Технические параметры созданной установки позволяют успешно проводить научные эксперименты по анализу внутреннего строения технологических, инженерных, палеонтологических, астрофизических, геофизических и др. объектов. В качестве иллюстрации возможностей экспериментальной станции ниже приведено несколько полученных результатов.

На рис. 3, *а* представлены обычное фото и нейтронное изображение внутреннего устройства компьютерного жесткого диска.

На нейтронном радиографическом изображении отчетливо различимы ось и шпиндель вращающихся магнитных дисков, элементы считывающей головки и механизмов ее управления, систем электроники и печатных плат. Видно, что пространственного разрешения детекторной системы экспериментальной установки вполне достаточно для визуализации довольно мелких деталей механизма управления кареткой считывающей головки: фиксирующих пружин, подвижной лапки считывающей головки, мелких деталей электронных микросхем.

Также на рис. 3, *б* представлено нейтронное изображение части биметаллического сталь-циркониевого адаптера, который используется в конструкциях энергетических реакторов типа РБМК. Данное соединение двух разнородных металлических деталей выполнено по технологии холодной сварки. Из-за сильного различия в сечениях поглощения нейтронов для стали и циркония наблюдается высокий контраст между внутренними частями резьбы адаптера.

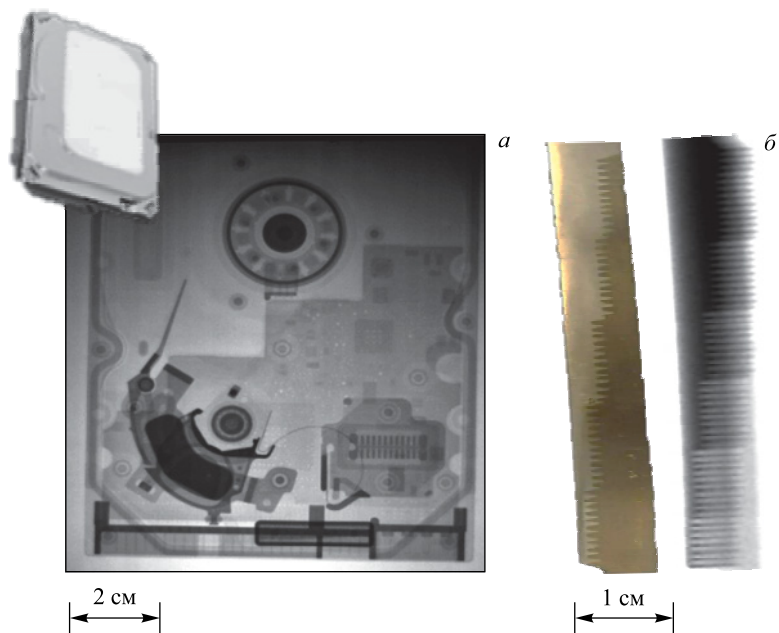


Рис. 3. а) Фото и нейтронное изображение внутреннего устройства жесткого диска компьютера. б) Фото и нейтронная радиография внутренней резьбы биметаллического адаптера. На рисунок нанесены линейки с размерами для демонстрации масштаба объектов

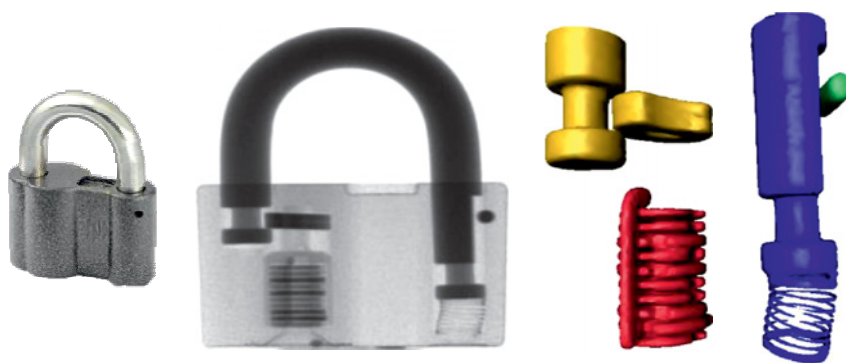


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Фото, нейтронное изображение и восстановленная с помощью нейтронной томографии трехмерная модель внутреннего механизма навесного замка с цветовой сегментацией отдельных частей внутреннего механизма замка

В качестве примера нейтронных томографических исследований инженерных и технологических объектов на рис. 4 представлена восстановленная из томографических данных трехмерная модель навесного замка. Для наглядности выполнена цветовая сегментация отдельных частей замка: пружины, стального фиксирующего затвора, элементов поворотного механизма ключа.

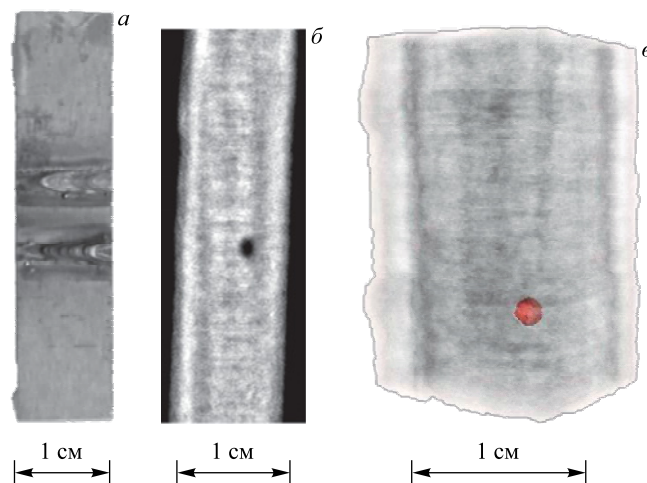


Рис. 5. Фото (а), аксиальный срез (б) полученной с помощью нейтронной томографии трехмерной модели металлического стержня со сварными швами, где явно видна полость в толще металла. Также с увеличением показана трехмерная модель участка стержня в месте шва, где локализован дефект (в). На рисунок нанесены линейки с размерами для демонстрации масштаба полученных изображений и моделей

Еще одним примером прикладных исследований с помощью нейтронной радиографии и томографии является исследование качества сварного шва при электронно-лучевой сварке образцов-свидетелей, используемых для мониторинга радиационного воздействия на материал корпуса ядерного реактора [16].

На рис. 5 представлено фото и нейтронное изображение продольного среза образца-свидетеля со сварными швами. Наблюдаемое на нейтронном изображении темное образование можно идентифицировать как небольшую полость в толще материала. Обнаруженная полость является специфическим видом дефектов при электронно-лучевой сварке, возникающих из-за неполного сплавления корня шва. Дефекты данного типа чаще всего образуются в корневой части сварного шва из-за недостатка жидкого металла при высокой скорости кристаллизации литой зоны малых размеров в пародинамическом канале [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено детальное описание и основные характеристики новой экспериментальной установки нейтронной радиографии и томографии, созданной на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2. Первые результаты, полученные на объектах различного типа, демонстрируют широкие возможности применения нейтронной радиографии и томографии в различных научных и прикладных областях исследований. Дальнейшее методическое развитие установки будет направлено на улучшение ее технических параметров и реализацию энергодисперсионной радиографии и томографии с использованием метода времени пролета.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-22-01001-офи-м и при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-08-06418_а. Авторы благодарны А. А. Кустову за выполнение проектно-конструкторских работ по разработке некоторых узлов установки и ее размещению на реакторе ИБР-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vontobel P. et al.* Neutron Tomography: Method and Applications // *Physica B: Condens. Matter.* 2006. V. 385–386. P. 475–480.
2. *Lehmann E. H., Peetermans S., Betz B.* Instrumentation in Neutron Imaging — A World-Wide Overview // *Neutron News.* 2015. V. 26. P. 6–10.
3. *Perfect E. et al.* Neutron Imaging of Hydrogen-Rich Fluids in Geomaterials and Engineered Porous Media: A Review // *Earth-Science Rev.* 2014. V. 129. P. 120–135.
4. *Radiography of Cultural Material / Eds.: A. Middleton, J. Tum, J. Lang.* 2nd Ed. Routledge, 2005.
5. *Neutron Imaging and Applications: A Reference for the Imaging Community / Eds.: I. S. Anderson, R. L. McGreevy, H. Z. Bilheux.* New York: Springer, 2009.
6. *Practical Neutron Radiography / Ed. J. C. Domanus.* Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1992.
7. *Lehmann E. H., Ridikas D.* Status of Neutron Activities in a Worldwide Context // *Book of Abstracts of the 10th World Conf. on Neutron Radiography, Grindelwald, Switzerland, 2014.* P. 29.
8. *Kozlenko D. P.* Neutron Imaging Facility at IBR-2 High Flux Pulsed Reactor: First Results // *Ibid.* P. 27.
9. *Lehmann E. H. et al.* The Energy-Selective Option in Neutron Imaging // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2009. V. 603. P. 429–438.
10. *Kockelmann W. et al.* Energy-Selective Neutron Transmission Imaging at a Pulsed Source // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2007. V. 578. P. 421–434.
11. *Grunauer F.* Image Reconstruction and Multiple Hole Apertures in Neutron Radiography at FRM-II // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 566. P. 654–66.
12. *Dinca M., Pavelescu M.* Calculus for a Neutron Imaging System Based on a CCD Camera // *Rom. J. Phys.* 2006. V. 51. P. 363–370.
13. *Williams S. H. et al.* Detection System for Microimaging with Neutrons // *J. Instr.* 2012. V. 7. P. 02014.
14. *Schneider C. A., Rasband W. S., Eliceiri K. W.* NIH Image to ImageJ: 25 Years of Image Analysis // *Nature Methods.* 2012. V. 9. P. 671–675.
15. *Chen R. C. et al.* PITRE: Software for Phase-Sensitive X-Ray Image Processing and Tomography Reconstruction // *J. Synchrotron Rad.* 2012. V. 19. P. 836–845.
16. *Bokuchava G. et al.* Residual Stress Studies in Electron Beam Welding Using Neutron Diffraction // *J. Mat. Sci. Technol.* 2014. V. 22. P. 3–11.
17. *Bokuchava G., Papushkin I., Petrov P.* Residual Stress Study by Neutron Diffraction in the Charpy Specimens Reconstructed by Various Welding Methods // *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences.* 2014. V. 67. P. 763–768.

Получено 28 августа 2015 г.