

**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF  
EXPERIMENTAL PHYSICS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36>

**ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ДИФРАКТОМЕТРА С ФОКУСИРОВКОЙ ПО  
ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА**

Научная статья

**Литвин В.С.<sup>1,\*</sup>, Бучный Д.А.<sup>2</sup>, Чураков А.В.<sup>3</sup>, Трунов Д.Н.<sup>4</sup>, Аксенов С.Н.<sup>5</sup>, Бербенцев В.Д.<sup>6</sup>, Марин В.Н.<sup>7</sup>,  
Мешков И.В.<sup>8</sup>, Садыков Р.А.<sup>9</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5242-4249;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0002-1966-083X;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0002-3702-778x;

<sup>8</sup> ORCID : 0000-0002-0238-9182;

<sup>9</sup> ORCID : 0000-0002-3986-0994;

<sup>1,8</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация

<sup>1,2,4,5,7,9</sup> Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Троицк, Российская Федерация

<sup>3</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

<sup>4</sup> Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Гатчина, Российская Федерация

<sup>6</sup> Институт физики высоких давлений имени Л.Ф. Верещагина Российской Академии Наук, Троицк, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (vlitvin[at]inr.ru)

**Аннотация**

В работе демонстрируются возможности установки МНС (многофункциональный нейтронный спектрометр) на импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН после дооборудования двухкоординатным детектором нейтронов (ПЧД) для нейтронной дифракции при малых углах. Цифровая обработка полученного с ПЧД массива данных с помощью разработанных нами программ позволяет получать из данных одного измерения дифрактограммы и профили пучка с возможностью варьировать разрешение и интенсивность дифрактограмм. Также демонстрируется метод обработки массива данных, позволяющий получить дифрактограммы одновременно высокого разрешения и интенсивности, аналогично методу временной фокусировки. Измерения проведены на образцах жаропрочного сплава MoTiC (Mo – основной, Ti – 10%, C – 3%), на нейтронном дифрактометре МНС на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН.

**Ключевые слова:** нейтронная дифракция, двухкоординатный детектор нейтронов, времяпролетный метод, временная фокусировка, немагнитные сплавы.

**2D NEUTRON DETECTOR FOR TIME OF FLY FOCUSING DIFFRACTOMETER**

Research article

**Litvin V.S.<sup>1,\*</sup>, Buchnii D.A.<sup>2</sup>, Churakov A.V.<sup>3</sup>, Trunov D.N.<sup>4</sup>, Aksenov S.N.<sup>5</sup>, Berbentsev V.D.<sup>6</sup>, Marin V.N.<sup>7</sup>, Meshkov  
I.V.<sup>8</sup>, Sadikov R.A.<sup>9</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-5242-4249;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0002-1966-083X;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0002-3702-778x;

<sup>8</sup> ORCID : 0000-0002-0238-9182;

<sup>9</sup> ORCID : 0000-0002-3986-0994;

<sup>1,8</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>1,2,4,5,7,9</sup> Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russian Federation

<sup>3</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

<sup>4</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina, Russian Federation

<sup>6</sup> L.F. Vereshchagin Institute for High Pressure Physics of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russian Federation

\* Corresponding author (vlitvin[at]inr.ru)

**Abstract**

The article demonstrates the capabilities of the MNS (multifunctional neutron spectrometer) installation at the IN-06 pulsed neutron source at the IN-06 Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences after retrofitting with a 2D NEUTRON DETECTOR for small angle neutron diffraction (SANS). Digital processing of the data array obtained from the ND using the programmes developed by us allows to obtain diffractograms and beam profiles from the data of one measurement with the possibility to vary the resolution and intensity of the diffractograms. We also demonstrate a method of data array processing that allows to get diffractograms of high resolution and intensity simultaneously, similar to the method of time focusing. The measurements were carried out on samples of heat-resistant alloy MoTiC (Mo – basic, Ti – 10%, C – 3%), on a neutron diffractometer MNS on a pulsed neutron source IN-06 INR RAS.

**Keywords:** neutron diffraction, 2D NEUTRON DETECTOR, time of fly method, time focusing, non-magnetic alloys.

## Введение

Двухкоординатные детекторы нейтронов широко применяются в современных дифрактометрах. Например, в дифрактометре GEM [1] на импульсном источнике нейтронов ISIS (Великобритания) установлены двухкоординатные детекторы на углы  $2\theta = 1,2-3,2^\circ$  и  $2\theta = 5,3-12,7^\circ$ . В дифрактометре среднего разрешения NOMAD на импульсном источнике SNS (Окридж, США) используются двухкоординатные детекторы в виде массива однокоординатных линейных детекторов, на углы  $2\theta = 3-7^\circ$  [2]. Аналогичный массив обеспечивает регистрацию нейтронов, рассеянных на углы  $2\theta = 154-175^\circ$ .

Также двухкоординатные детекторы незаменимы для установок малоуглового рассеяния нейтронов [3], [4], [5], [6] и др.

В качестве ПЧД в основном применяются заполненные  $^3\text{He}$  пропорциональные камеры (многопроволочные, стриповые, падовые [11], [12], [13]), сцинтилляционные, а также типа ImagePlate. Для детектирования нейтронов необходим конвертер, который захватывает нейтроны и испускает заряженные частицы или гамма-кванты. Наиболее распространенные конвертеры – изотопы  $^3\text{He}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^6\text{Li}$  а также Cd Gd.

Одной из наиболее распространенных схем ПЧД является многопроволочная пропорциональная камера с конвертером  $^3\text{He}$  в составе газовой смеси. Этот тип детекторов отличается высокой эффективностью регистрации нейтронов, простотой конструкции и электроники. К недостаткам следует отнести необходимость заполнения и перезарядки дорогостоящим  $^3\text{He}$ , толстое входное окно, на котором неизбежно рассеяние нейтронов, вызванное высоким давлением ограничением чувствительной площади детектора. Кроме того, пространственное разрешение ограничено расстоянием между проволочками, временное – толщиной чувствительного слоя, а максимальная нагрузка – расстоянием между анодом и катодом. Однако для малоуглового рассеяния и дифракции нейтронов, а также для нейтронной рефлектометрии, достаточно разрешения детектора 1-2 мм по координатам и 10 мкс по времени. Существенной проблемой дифрактометров является противоречие между высоким разрешением и большим телесным углом детектора, а следовательно и интенсивностью. Одним из способов решения этой проблемы для импульсных источников является временная фокусировка. На импульсных источниках установки работают по времяпролетной методике. Суть этого метода заключается в определении длины волны нейтрона по времени между моментом образования нейтронов – импульсом источника и временем регистрации нейтрона детектором. Длина волны нейтрона определяется соотношением (1). При этом на образец падает весь спектр нейтронов, монохроматоры не применяются, а детекторы остаются не подвижными.

$$\lambda = \frac{h}{m_n} \frac{t}{L} \quad (1)$$

где  $m_n$  – масса нейтрона,  $t$  – время пролета нейтрона,  $L$  – пролетная база, т.е. расстояние от источника нейтронов до детектора. Суть метода временной фокусировки заключается в использовании детектора с плоскостью, ориентированной не перпендикулярно, а под таким углом, что различие в углах рассеяния для разных участков чувствительной области детектора компенсируется пролетной базой, а следовательно временем пролета. Расстояние от образца до детектора определяется соотношением:

$$L_2(2\theta) = \frac{L_1 + L_2(\pi)}{\sin(\theta)} - L_1 \quad (2)$$

где  $L_1$  – расстояние от источника до образца,  $L_2$  – расстояние от образца до источника,  $\theta = 2\theta$  – угол рассеяния. В качестве примеров можно привести Установки МНС на ИН-06 [14] и ФСД на ИБР-2 [15]. Как правило, детекторы с временной фокусировкой применяются при углах рассеяния больше 90 град. При использовании детекторов с временной фокусировкой при углах менее 90 град. угол между плоскостью детектора и осью рассеянного пучка становится очень маленьким, а следовательно требуется большие чувствительные площади детекторов при меньших телесных углах. Так, уже при угле дифракции  $2\theta = 90$  град. этот угол не превышает 5 град [17]. Предложенный в данной работе подход с использованием ПЧД позволяет решить эту проблему. Разрешение дифрактометров ограничено шириной (в горизонтальной плоскости) счетчиков, как правило, это 10-18 мм (СНМ-18 – 18 мм, сцинтилляционный счетчик нашей разработки – 10 мм), тогда как пространственное разрешение ПЧД составляет 1-2 мм.

## Методы и принципы исследования

**Образцы.** Образец жаропрочного сплава MoTiC (Mo – основной, Ti – 10%, C – 3%) был изготовлен методом литья в изложнице. Для дифракционных измерений образцы были выполнены в виде стержней диаметром 12 мм. Подробно методика изготовления и исследование структуры этого сплава описано в [18].

Дифракционные измерения были проведены на установке МНС, на II канале импульсного источника ИН-06 в ИЯИ РАН.

**Установка.** Многофункциональный дифрактометр МНС расположен на II канале импульсного источника ИН-06 (рис. 1)

Идея установки заключается в одновременном исследовании структуры вещества методом нейтронной дифракции в широком диапазоне – от атомного до нанометрового, что дает возможность исследовать *in situ* процессы синтеза, кристаллизации и т. п. [14]. Для этого проектом установки предусмотрены детекторы рассеяния на различные углы: обратные — для дифракции с высоким разрешением; на углы, близкие к  $90^\circ$  — для фазового анализа; на углы от 5 до 90 град. — для исследования больших кристаллических ячеек и магнитной решетки; а также на малые углы ( $< 5^\circ$ ) для исследования надатомной структуры вещества, в масштабах 1-100 нм, например кристаллитов, дефектов, наноструктур, биологических объектов и т.п.

В настоящее время установка оснащена детектором высокого разрешения с временной фокусировкой для углов рассеяния  $2\theta = 156-165^\circ$ . Этот детектор расположен относительно образца согласно (2). Также проектом установки

предусмотрена опция малоугловой дифракции, для которой и был изготовлен двухкоординатный детектор нейтронов. Дифракционные измерения в рамках данной работы проводились с помощью этого детектора, который был установлен на расстоянии 720 мм от образца на углы рассеяния  $2\Theta = 44-64^\circ$ .

Поскольку источник нейтронов импульсный, измерения проводятся по времяпролетной методике. Хотя с помощью каждого детектора, при любом угле  $2\Theta$ , может быть получена дифрактограмма, каждый детектор оптимален для своего диапазона межплоскостных расстояний  $d$ . Это объясняется тем, что спектр нейтронов источника имеет максимум (для источника ИН-06 это 1,3 А [16]), поэтому максимальная интенсивность пиков брегга может быть получена только при  $\lambda$ , близких к максимуму спектра. Кроме того, разрешение детектора в дифрактометре растет с углом как  $\text{ctg } \Theta$ . Преимуществом времяпролетного метода является возможность измерений в широком диапазоне длин волн, а, следовательно, исследовать в широком диапазоне структуру веществ.

**Двухкоординатный детектор.** Для регистрации нейтронов использовался двухкоординатный нейтронный детектор, изготовленный в ЛНФ ОИЯИ. Детектор выполнен на основе многопроволочной пропорциональной камеры с размером чувствительного окна  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ . Герметичный корпус детектора с наружными размерами  $380 \times 380 \times 60 \text{ мм}^3$  (без учета габарита разъемов и предусилителей) изготовлен из дюралюминия. На корпусе детектора закреплены 1 анодный и 4 катодных предусилителя, а также фильтр высокого напряжения. В передней части детектора сделана выемка для входного окна с размерами  $230 \times 230 \text{ мм}^2$ . Для компенсации краевых эффектов выделено по 15 мм с каждого края, поэтому размер выемки превышает размер чувствительной области в  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ . Толщина входного окна в чувствительной области составляет 7 мм. Электродная система состоит из двух катодных, двух дрейфовых и одного анодного электродов. Дрейфовые электроды, находясь под отрицательным потенциалом ограничивают чувствительную толщину детектора в 33 мм. Передний дрейфовый электрод наклеен на входное окно детектора без газового промежутка. Анодный и катодные электроды представляют собой текстолитовую рамку окном, в котором натянуты тонкие проволоки из позолоченного вольфрама. Дрейфовые электроды выполнены из металлизированной полиамидной пленки. На анод подается высокое напряжение величиной +4 кВ, катод находится под нулевым потенциалом. Толщина анодных проволочек 10 мкм, катодных – 50 мкм. Анодные проволочки расположены на рамке с шагом 1 мм и соединены общей шиной, катодные проволочки – также с шагом в 1 мм, но объединены по две и выведены на линию задержки, каждое звено которой задерживает сигнал на 2,9 нс. Катодные предусилители подключаются к катодам детектора напрямую, анодный предусилитель – через разделяющую емкость, расположенную в корпусе фильтра. Герметичный объем детектора заполнен смесью, состоящей из газа-конвертера нейтронов  $^3\text{He}$  и гасящего газа  $\text{CF}_4$ . Гасящий газ необходим для уменьшения длины пробега заряженных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтронов с конвертером, а так же для подавления вторичных эффектов. Полное давление газовой смеси 4,5 атмосфер. Измеренное координатное разрешение не хуже, чем  $2 \times 2,5 \text{ мм}^2$  по всей чувствительной области. Координатное разрешение определялось как ширина пика на полувысоте при облучении детектора пучком с истинными размерами не более 0,3 мм. Расчетная эффективность регистрации тепловых нейтронов составляет порядка 65%. При этом чувствительность детектора к гамма-излучению довольно мала ( $\sim 10^{-7}$ ). Сбор данных осуществляется с помощью анализатора DelIDAQ2, выполненного в виде блока NIM. Для управления и передачи данных в компьютер служит оптоволоконный интерфейс. Данные с блока накапливаются на жестком диске компьютера в виде 3-мерной матрицы —  $x$ ,  $y$  - координаты и время пролета  $t$ , элементы которой являются интенсивностью в соответствующей точке и времени пролета.

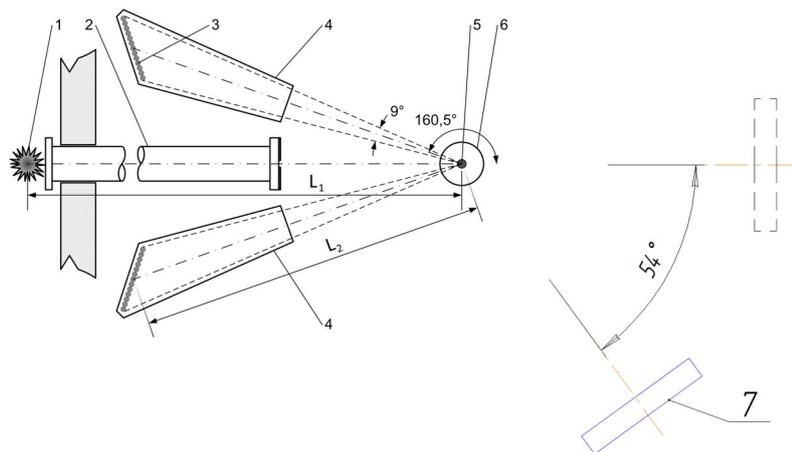


Рисунок 1 - Схема установки МНС  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.1>

*Примечание:* 1 – замедлитель; 2 – нейтронный пучок; 3 – детектор высокого разрешения с временной фокусировкой; 4 – вакуумный кожух детектора; 5 – образец; 6 – стол образца; 7 – ПЧД

### Основные результаты

С помощью описанного выше ПЧД были получены профили прямого пучка. Во время измерений источник работал на малых токах и интенсивность нейтронного пучка на образце не превышала  $10^3 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Путем интегрирования двумерного профиля по вертикали и по времени пролета полностью и при энергиях нейтрона ниже 0,5 эВ получены горизонтальные профили пучка (рис. 2 и 3). Виден эффект от поглощения тепловых нейтронов ( $E_n < 0,5 \text{ эВ}$ ) кадмиевой маской перед образцом – синее поле на двумерной картине и прямоугольная подложка у пика на красной кривой на рис. 3. При этом синяя кривая, которая описывает интенсивность тепловых нейтронов, не имеет такой подложки, а имеет лишь небольшие «крылья» слева и справа от пика. Также видна тень от образца – зеленое поле на рис. 2 и провал в центре пика на рис 3. Из рисунка видно, что нейтронный пучок хорошо проходит через образец сплава MoTiC диаметром 12 мм. Это демонстрирует возможность исследования массивных образцов. В частности, возможности проведения радиографических и томографических исследований деталей машин, объектов культурного наследия и т.п., в диапазоне энергий нейтронов от 0,025 эВ до 0,5 МэВ.

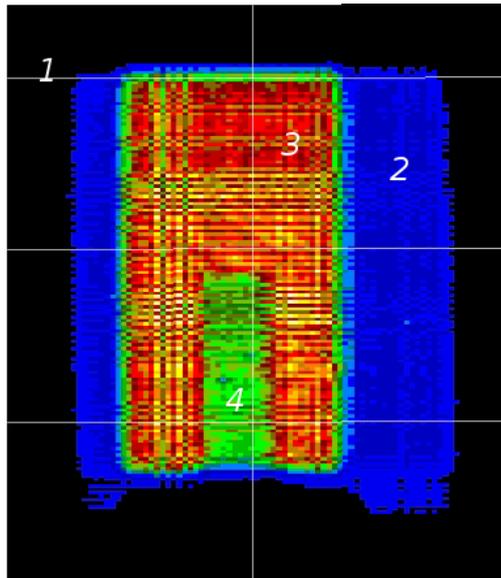


Рисунок 2 - Двумерный профиль прямого пучка  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.2>

Примечание: цифрами обозначены: 1 — фон; 2 — выходная аппаратура нейтронновода; 3 — окно в кадмиевой маске; 4 — тень образца

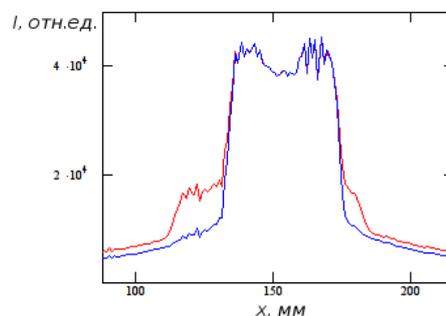


Рисунок 3 - Профиль прямого пучка нейтронов: только тепловых (синий) и всех (красный)  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.3>

В качестве образца для дифракционных измерений был выбран сплав MoTiC с твердостью 57 HRC, ранее его структура исследовалась на рентгеновском дифрактометре StadyMP и на нейтронном дифрактометре «Геркулес» на том же импульсном источнике ИН-06 в ИЯИ РАН [18]. Сперва трехмерный массив данных интегрировался по  $u$ . Полученная  $x$ -диаграмма времяпролетной нейтронной дифракции на образце приводится на рис. 4. Диагональные полосы соответствуют пикам Брегга, пятно в левой части — быстрым нейтронам в начале импульса. Из формулы Вульфа-Брегга следует, что для одного и того же пика при увеличении угла дифракции, а следовательно, и координаты  $x$ , длина волны увеличивается пропорционально. Следовательно, время пролета  $t$  также должно увеличиваться пропорционально. Этим объясняется наклон полос на рис. 4.

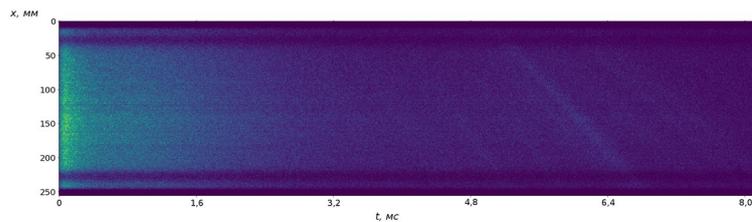


Рисунок 4 - Двумерная x-t-диаграмма нейтронной дифракции на образце сплава MoTiC с твердостью 57 HRC, полученная с помощью ПЧД  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.4>

Для получения времяпролетных спектров массив данных делился на 20 областей интегрирования – вертикальных полос шириной от 5 до 20 мм, в каждой из которых суммировались все точки, соответствующие одному времени пролета. Дифракционные спектры, полученные с помощью ПЧД, при различных толщинах областей интегрирования, представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, более узким областям интегрирования соответствуют более узкие пики и низкий фон, но меньшая интенсивность.

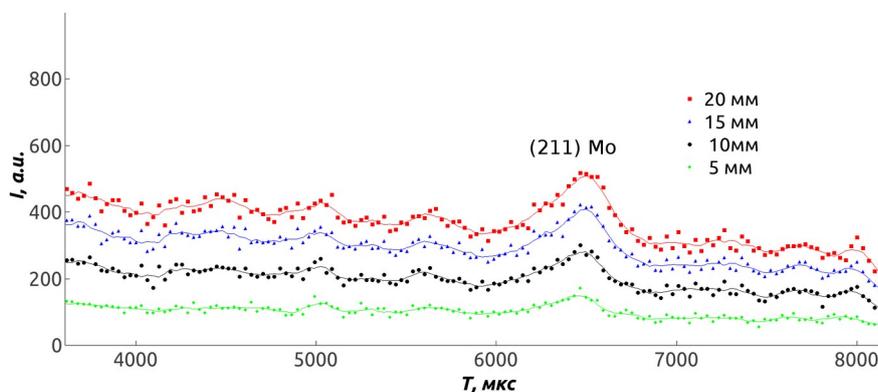


Рисунок 5 - Нейтронные дифрактограммы, полученные с помощью ПЧД, при ширине областей интегрирования 5, 10, 15 и 20 мм  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.5>

*Примечание: отчетливо виден пик (211) ОЦК Мо*

Также данный детектор позволяет применить «программную» временную фокусировку. Суть этого подхода заключается в следующем. Из 2-мерного массива данных с элементами  $N_{x,t}$  выделяется по  $x$  полоса шириной  $s$  с центром в  $x_0$ , что соответствует углу  $2\theta_0$ , затем суммируется согласно соотношению:

$$I(t) = \sum_{i=-s/2}^{s/2} N_{x_0+i,t/\sin(\theta_0+i/2D)} \quad (3)$$

где

$x$  – координата по горизонтали

$t$  – время пролета

$D$  – расстояние образец-детектор

$s$  – ширина полосы интегрирования по  $x$

Другими словами, для каждого элемента массива вычисляется соответствующая его координате  $x$  (а следовательно, и углу дифракции  $\theta$ ) поправка ко времени  $t$ , так чтобы элементам массива с одним индексом соответствовало одно и то же межплоскостное расстояние  $d$ . Затем элементы с одинаковыми индексами складываются. Благодаря такому подходу можно получить дифрактограммы с большого телесного угла без потери разрешения, как это делается в дефлекторах с временной фокусировкой. Был выбран угол  $2\theta = 61$  град. т.к. при нем пик (211) ОЦК Мо (пространственная группа симметрии Im-3m) приходится на максимум спектра прямого пучка. Полученная дифрактограмма приводится на рис. 6. Для сравнения также приведена дифрактограмма того же образца, полученная на нейтронном дифрактометре «Геркулес» при угле  $2\theta = 60$  град. (рис. 7). Более высокая интенсивность пиков объясняется тем, что установка имеет более короткую пролетную базу – 10 м и концентрирующий трапецевидный нейтронный канал, увеличивающий плотность потока тепловых нейтронов в 2,5 раза [18].

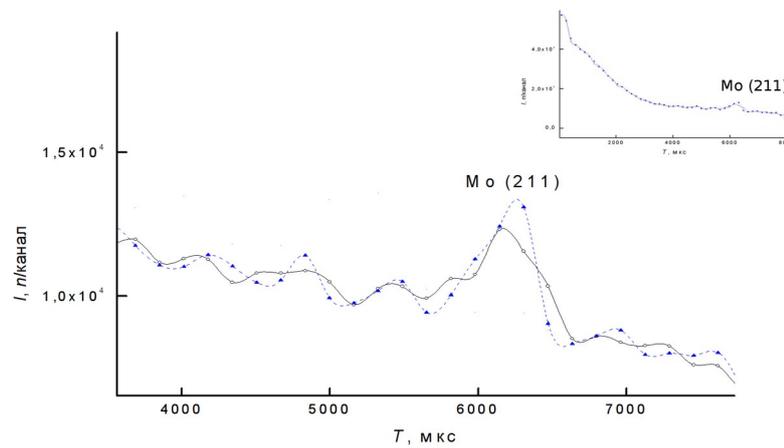


Рисунок 6 - Нейтронные дифрактограммы, полученные на образце сплава MoTiC с твердостью 57 HRc с помощью ПЧД, при ширине областей интегрирования 50 мм, путем простого интегрирования по полосе (черный) и с применением «программной временной фокусировки» (синий)  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.6>

Примечание: отчетливо виден пик (211) ОЦК Мо; на вставке — та же дифрактограмма целиком

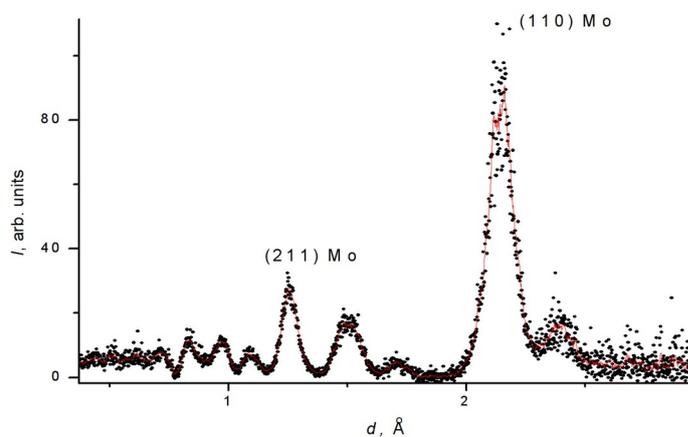


Рисунок 7 - Дифрактограмма того же образца, полученная на установке «Геркулес»  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.36.7>

Примечание: источник [18]

Также для ПЧД на установке МНС требуется усиления защиты. Из сравнения дифрактограмм, полученных путем простого интегрирования по полосе и с помощью «фокусировки», видно, что последний дает в 1,45 большую интенсивность при меньшей (на 18%) ширине пика (см. рис. 6).

#### Заключение

Оснащение нейтронографической установки МНС двухкоординатным позиционно-чувствительным детектором нейтронов (ПЧД) существенно расширяет ее возможности, в частности в дифракции позволяет обнаружить текстуру образца. Использование математической обработки массива данных ПЧД позволяет в различных вариантах представлять данные и варьировать соотношение интенсивности пиков и разрешения. Также есть возможность интегрирования в широкой полосе углов с поправкой ко времени пролета, что позволяет получать высокую интенсивность одновременно с высоким разрешением, так же как и в детекторах с временной фокусировкой. При этом в данной работе детектор стоял под углами  $2\theta = 44-62^\circ$ , тогда как детекторы с временной фокусировкой располагаются,

как правило, под углами  $> 90^\circ$ . Благодаря этому методу нам удалось в условиях данного эксперимента достигнуть увеличения интенсивности в 1,45 раза с более узким (на 18%) пиком.

### Финансирование

Госзадание ИЯИ РАН, Шифр темы: FFWS-2022-0003 и  
Госзадание ФИАИ, Шифр темы: FFMR-2024-0018.

### Funding

The State task of the Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, the cipher of the topic: FFWS-2022-0003 and the State Task of the FIAN, the cipher of the topic: FFMR-2024-0018.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Day P. Scientific Reviews: GEM: The General Materials Diffractometer at ISIS-Multibank Capabilities for Studying Crystalline and Disordered Materials / P. Day, J. Enderby, W. Williams [et al.] // Neutron News. — 2004. — Vol. 15-1. — P. 19-23. — DOI: 10.1080/00323910490970564
2. Beal J.D. The NOMAD instrument neutron detector array at the SNS / J.D. Beal, K.D. Berry, R.A. Riedel [et al.] // NIM A. — 2021. — Vol. 1018. — p. 165851. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165851
3. Heenan R.K. SANS at Pulsed Neutron Sources: Present and Future Prospects / R.K. Heenan, J. Penfold, S.M. King [et al.] // J. Appl. Cryst. — 1997. — V. 30. — P. 1140-1147.
4. sans2d // UKRI, 2024 . — URL: <http://www.isis.stfc.ac.uk/instruments/sans2d> (accessed: 6.05.2024)
5. NIMROD // UKRI, 2024 . — URL: <http://www.isis.stfc.ac.uk/instruments/nimrod> (accessed: 6.05.2024)
6. Research Neutron Source Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) Technical University of Munich. — URL: <http://www.frm2.tum.de/en/science/diffractometer/sans-1/index.html> (accessed: 6.05.2024)
7. Radulescu A. KWS-2, the high intensity / wide Q-range small-angle neutron diffractometer for soft-matter and biology at FRM II / A. Radulescu [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2012. — v. 351. — p. 012026 DOI: 10.1088/1742-6596/537/1/012001
8. ЮМО // ЛНФ им. И.М. Фрака ОИЯИ 2023, Дубна, Россия. — URL: <https://flnp.jinr.int.ru/glavnaya/ustanovki/ibr-2/yumo> (дата обращения: 6.05.2024)
9. Extended Q-Range Small-Angle Neutron Scattering Diffractometer // Oak Ridge National Laboratory. — USA, 2024. — URL: <https://neutrons.ornl.gov/eqsans> (accessed: 6.05.2024)
10. D11 - Lowest momentum transfer & lowest background small-angle neutron scattering instrument // Institut Laue-Langevin, France, 2024. — URL: <https://www.ill.eu/users/instruments/instruments-list/d11/description/instrument-layout> (accessed: 6.05.2024)
11. Кашук А.П. Позиционно-чувствительные детекторы тепловых и холодных нейтронов с газовым конвертором  $^3\text{He}$  (обзор) / А.П. Кашук, О.В. Левицкая // Журнал технической физики. — 2020. — том 90. — №4. — С. 519 - 539. — DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49074.84-19
12. Fried J. Advanced two-dimensional thermal neutron detectors for scattering studies / J. Fried, J.A. Harder, G.J. Mahler [et al.] // Nucl. Instr. Meth. — 2002. — A478. — P. 415-419. — DOI:10.1117/12.456300
13. Toh K. Performance evaluation of high-pressure MWPC with individual line readout under Cf-252 neutron irradiation / K. Toh, T. Nakamura, K. Sakasai [et al.] // J. Physics: Conf. Ser. — 2014. — Vol. 528. —
14. Kuznetsov S.P. Multifunctional pulsed neutron spectrometer IN-06 of INR RAS / S.P. Kuznetsov, I.V. Meshkov, R.A. Sadykov [et al.] // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2013. — Vol.40 (9). — P. 245. — DOI: 10.3103/S1068335613090017
15. ФСД // Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, 2023 ОИЯИ, Россия. — URL: <https://flnp.jinr.int.ru/glavnaya/ustanovki/ibr-2/fsd> (дата обращения: 6.05.2024)
16. Алексеев А.А. Спектры нейтронов прямых пучков экспериментальных каналов импульсного источника ИН-06 ИЯИ РАН / А.А. Алексеев, Р.А. Садьков, Е.С. Клементьев // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. — 2015. — №3. — с. 5-10. — DOI:10.7868/S0207352814120026
17. Кузнецов С.П. Дифрактометр высокого разрешения на импульсном источнике ИН-06 ИЯИ РАН / С.П. Кузнецов, В.С. Литвин, В.Н. Марин // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. — 2018. — № 5. — с. 29-35. — DOI: 10.7868/S0207352818050037
18. Трунов Д.Н. Исследование жаропрочных объемных композитов  $\text{MoTiC}$  и  $\text{MoTiC-W}$  / Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, В.С. Литвин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №10. — С. 136. — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.2

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Day P. Scientific Reviews: GEM: The General Materials Diffractometer at ISIS-Multibank Capabilities for Studying Crystalline and Disordered Materials / P. Day, J. Enderby, W. Williams [et al.] // Neutron News. — 2004. — Vol. 15-1. — P. 19-23. — DOI: 10.1080/00323910490970564

2. Beal J.D. The NOMAD instrument neutron detector array at the SNS / J.D. Beal, K.D. Berry, R.A. Riedel [et al.] // NIM A. — 2021. — Vol. 1018. — p. 165851. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165851
3. Heenan R.K. SANS at Pulsed Neutron Sources: Present and Future Prospects / R.K. Heenan, J. Penfold, S.M. King [et al.] // J. Appl. Cryst. — 1997. — V. 30. — P. 1140-1147.
4. sans2d // UKRI, 2024 . — URL: <http://www.isis.stfc.ac.uk/instruments/sans2d> (accessed: 6.05.2024)
5. NIMROD // UKRI, 2024 . — URL: <http://www.isis.stfc.ac.uk/instruments/nimrod> (accessed: 6.05.2024)
6. Research Neutron Source Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) Technical University of Munich. — URL: <http://www.frm2.tum.de/en/science/diffractometer/sans-1/index.html> (accessed: 6.05.2024)
7. Radulescu A. KWS-2, the high intensity / wide Q-range small-angle neutron diffractometer for soft-matter and biology at FRM II / A. Radulescu [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2012. — v. 351. — p. 012026 DOI: 10.1088/1742-6596/537/1/012001
8. YUMO // LNF im. I.M. Fraka OIYAI 2023, Dubna, Rossiya [I.M. Frank LNF JINR 2023, Dubna, Russia]. — URL: <https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/ustanovki/ibr-2/yumo> (accessed: 6.05.2024) [in Russian]
9. Extended Q-Range Small-Angle Neutron Scattering Diffractometer // Oak Ridge National Laboratory. —USA, 2024. — URL: <https://neutrons.ornl.gov/eqsans> (accessed: 6.05.2024)
10. D11 - Lowest momentum transfer & lowest background small-angle neutron scattering instrument // Institut Laue-Langevin, France, 2024. — URL: <https://www.ill.eu/users/instruments/instruments-list/d11/description/instrument-layout> (accessed: 6.05.2024)
11. Kashchuk A.P. Pozicionno-chuvstvitel'nye detektory teplykh i holodnykh nejtronov s gazovym konvertorom  $^3\text{He}$  (obzor) [Position-sensitive thermal and cold neutron detectors with a  $^3\text{He}$  gas converter (overview)] / A.P. Kashchuk, O.V. Levickaya // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics]. — 2020. — Vol. 90. — №4. — P. 519 - 539. — DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49074.84-19 [in Russian]
12. Fried J. Advanced two-dimensional thermal neutron detectors for scattering studies / J. Fried, J.A. Harder, G.J. Mahler [et al.] // Nucl. Instr. Meth. — 2002. — A478. — P. 415-419. — DOI:10.1117/12.456300
13. Toh K. Performance evaluation of high-pressure MWPC with individual line readout under Cf-252 neutron irradiation / K. Toh, T. Nakamura, K. Sakasai [et al.] // J. Physics: Conf. Ser. — 2014. — Vol. 528. —
14. Kuznetsov S.P. Multifunctional pulsed neutron spectrometer IN-06 of INR RAS / S.P. Kuznetsov, I.V. Meshkov, R.A. Sadykov [et al.] // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2013. — Vol.40 (9). — P. 245. — DOI: 10.3103/S1068335613090017
15. FSD // Laboratoriya Nejtronnoj Fiziki im. I.M. Franka, 2023 OIYAI, Rossiya [I.M. Frank Neutron Physics Laboratory, JINR 2023, Russia]. — URL: <https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/ustanovki/ibr-2/fsd> (accessed: 6.05.2024) [in Russian]
16. Alekseev A.A. Spektry nejtronov pryamykh puchkov eksperimental'nykh kanalov impul'snogo istochnika IN-06 IYAI RAN [Neutron spectra of direct beams of experimental channels of the IN-06 pulsed source of the Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences] / A.A. Alekseev, R.A. Sadykov, E.S. Klement'ev // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhronnye i nejtronnye issledovaniya [The surface'. X-ray, synchronous and neutron studies]. — 2015. — №3. — p. 5-10. — DOI:10.7868/S0207352814120026 [in Russian]
17. Kuznecov S.P. Difraktometr vysokogo razresheniya na impul'snom istochnike IN-06 IYAI RAN [A high-resolution diffractometer based on an IN-06 pulsed source of the Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences] / S.P. Kuznecov, V.S. Litvin, V.N. Marin // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhronnye i nejtronnye issledovaniya [The surface'. X-ray, synchronous and neutron studies]. — 2018. — № 5. — p. 29-35. — DOI: 10.7868/S0207352818050037 [in Russian]
18. Trunov D.N. Issledovanie zharoprochnykh ob'emnykh kompozitov MoTiC i MoTiC-W [Investigation of heat-resistant composite materials motik and motik-V] / D.N. Trunov, S.N. Aksenov, V.S. Litvin [et al.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]. — 2023. — №10. — P. 136. — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.2 [in Russian]