

Т. Л. Еник¹, А. И. Иваньков¹, А. Эльмекави^{1,2},
А. Г. Колесников¹, А. К. Курилкин¹, А. А. Богдзель¹,
А. С. Кирилов¹, С. М. Мурашкевич¹, Т. Б. Петухова¹,
В. В. Ской¹, Т. Н. Муругова¹, А. В. Рогачев^{1,3},
А. Г. Соловьев¹, С. А. Куракин¹, В. В. Круглов¹,
А. В. Власов^{1,3}, Ю. Л. Рижиков^{1,3}, В. В. Дрёмов³,
Ю. С. Ковалев¹, Т. С. Куркин^{3,4}, С. А. Успенский⁴,
А. В. Чураков¹, В. И. Боднарчук¹, А. Х. Исламов¹,
А. И. Куклин^{1,3,*}

**БОРНЫЙ ДЕТЕКТОР ПРЯМОГО ПУЧКА
ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА СПЕКТРА
НЕЙТРОНОВ НА МАЛОУГЛОВОМ
СПЕКТРОМЕТРЕ **ЮМО** РЕАКТОРА **ИБР-2****

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Отдел экспериментальной ядерной физики, Центр ядерных исследований, Египетское управление по атомной энергии, Каир, Египет

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴ Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

* E-mail: alexander.iw.kuklin@gmail.com

Еник Т. Л. и др.

P3-2026-5

Борный детектор прямого пучка для мониторинга и анализа спектра нейтронов на малоугловом спектрометре ЮМО реактора ИБР-2

В статье рассмотрен детектор прямого пучка (ДПП) спектрометра ЮМО (ИБР-2, ЛНФ). Представлены результаты оптимизации и измерений с помощью газового пропорционального многопроволочного детектора прямого пучка с борным конвертером ($^{10}\text{B}_4\text{C}$). Приведены спектры, полученные после недавней модернизации этого детектора (заменен конвертер, оптимизировано напряжение и др.).

ДПП используется для измерения спектра нейтронов, проходящих через образец (получение функции пропускания образца в зависимости от длины волны нейтрона), а также для настройки системы коллимации и рабочего окна прерывателя (синхронизация закрытия окна прерывателя для подавления фоновых нейтронов). Детектор применяется и для нормировки данных при измерениях с образцами, имеющими высокое сечение рассеяния или поглощения.

В результате модернизации счет на детекторе увеличился минимум в два раза. Показано, что нейтронный пучок на спектрометре ЮМО хорошо сколлимирован, детектор отъюстирован и выбрана нужная фаза прерывателя.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2026

Enik T. L. et al.

P3-2026-5

Direct Beam Boron Detector for Monitoring and Analyzing the Neutron Spectrum at the YuMO Small-Angle Spectrometer of the IBR-2 Reactor

This article discusses the direct beam detector of the YuMO spectrometer (IBR-2, FLNP). Optimization and measurement results using a gas proportional multiwire direct beam detector with a boron converter ($^{10}\text{B}_4\text{C}$) are presented. Spectra obtained after a recent upgrade of this detector (converter replacement, voltage optimization, etc.) are described.

The forward beam detector is used to measure the spectrum of neutrons passing through a sample (obtaining the sample transmission function as a function of neutron wavelength), as well as to adjust the collimation system and the chopper operating window (synchronizing the chopper window closure to suppress background neutrons). The detector is also used for data normalization in measurements with samples having a high scattering or absorption cross-section.

As a result of the upgrade, the detector count rate has at least doubled. It is shown that the neutron beam on the YuMO spectrometer is well collimated, the detector is aligned, and the correct chopper phase is selected.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2026

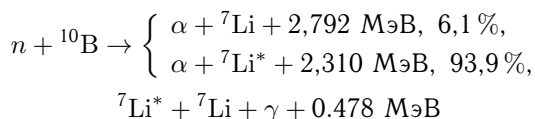
ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) ЮМО [1, 2] на реакторе ИБР-2, запущенном в 1984 г., является использование многодетекторной системы: два детектора для регистрации рассеянных нейтронов и детектор прямого пучка (ДПП) [3, 4]. Отличительной чертой спектрометра является конфигурация прямой видимости замедлителя с позиции образца. Несмотря на наличие прерывателя, спектр содержит много быстрых и тепловых нейтронов, поэтому необходимо исключить эту часть спектра или пропустить без рассеяния, как и реализовано на спектрометре ЮМО. Начиная с малоуглового спектрометра на ИБР-30, эта проблема была решена специальной геометрией детекторов для регистрации рассеянных на образце нейтронов, а именно — центральным отверстием на детекторах рассеяния [2]. Необходимость детектора прямого пучка на 4-м канале реактора ИБР-2 связана с особенностями нормировки и получения сечений рассеяния образца в абсолютных единицах [1, 5].

Особенностью спектрометра, позволяющей практически в реальном времени получать спектры рассеяния в абсолютных единицах, является наличие ванадиевых стандартов перед каждым детектором [6]. Однако в случае высокого сечения рассеяния образца необходимо учитывать пропускание образца как функцию длины волны. Дополнительную информацию о процедуре можно найти в [2, 5]. Как уже было упомянуто, одной из главных характеристик спектрометра ЮМО является отсутствие изогнутого нейтронвода вдоль пути нейтронов, что позволяет получать на ДПП распределение спектра нейтронов по длине волны, что, в свою очередь, позволяет отслеживать как изменения мощности реактора по интегральной интенсивности на ДПП, так и изменения температуры замедлителя по изменению спектра нейтронного пучка [1].

Высокая стоимость ^3He в последние годы увеличила запрос на альтернативы детекторов нейтронов. Что касается эффективности детекторов, то используемый материал должен иметь высокое сечение захвата нейтронов с минимальными проблемами технической эксплуатации. Из нескольких газообразных и твердых материалов карбид бора (B_4C) представляет собой наиболее перспективный материал для изготовления детекторов с конвертером нейтронов [7]. Его физические свойства, такие как высокое сечение поглощения (3800 барн) тепловых нейтронов и большая средняя длина свободного пробега (20 мкм) [8], делают его намного предпочтительнее других материалов, используемых в газовых детекторах, таких как дорогой ^3He или токсичный BF_3 [9–11]. Однако технологические разработки такого

детектора еще продолжают [12–14]. Реализация нашего детектора стала возможной благодаря использованию твердотельного конвертера B_4C и основана на техническом прогрессе пропорциональных газовых детекторов, потому что нейтрон, как нейтральная частица без заряда, может вызвать только косвенную ионизацию в детектирующем газе с использованием принципа преобразования, где твердое борное покрытие используется в качестве преобразователя (конвертера) в непосредственном контакте с детектирующим газом, поскольку при захвате нейтронов ^{10}B преобразуется ядерной реакцией в ^7Li и заряженные α -частицы, которые непосредственно ионизируют детектирующий газ, производя электронный ток, который может быть усилен и зарегистрирован как сигнал от нейтронов [7, 15–19]. Последовательность и каналы возникновения этой реакции следующие:



Существует много исследований, направленных на определение оптимальной толщины слоя конвертера для увеличения отношения коэффициента поглощения от общего потока нейтронов (эффективности захвата), а также для учета угла падения нейтронов [7, 15, 20, 21]. Действительно, несколько лабораторий изучали эффективность или длительность работы детектора нейтронов на основе карбида бора по сравнению с детектором на основе гелия [15, 22, 23].

Первый детектор прямого пучка был создан вместе с малоугловой установкой на ИБР-2 и имел конвертер ^6Li с тонким слоем на входном алюминиевом окне и полупроводниковыми регистраторами α -частиц, образующихся в результате преобразования захваченных нейтронов [6]. С 2011 г. мы использовали новый ДПП с напыленным слоем изотопа $^{10}\text{B}_4\text{C}$. До последней модернизации (2025 г.) конвертер ДПП $^{10}\text{B}_4\text{C}$ спектрометра ЮМО имел несимметричную форму и малую площадь, что позволяло только косвенно оценивать соосность детекторов относительно оси пучка нейтронов. Для дальнейшего повышения эффективности использования детектора и потребовалась модернизация, которая включала в себя изменение формы конвертера на форму круга заведомо большего диаметра, чем падающий на него пучок нейтронов.

УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТОРА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для выбора оптимальной толщины слоя конвертера и рабочего напряжения детектора было проведено сравнение теоретических расчетов с использованием Geant4 (платформа для моделирования взаимодействия элементарных частиц с веществом) [24] и экспериментальных результатов исследования эффективности детектора в зависимости от толщины монослоя конвертера путем применения различной пороговой энергии с учетом различного давления газа. Результат показал, что оптимальная толщина

слоя конвертера должна быть в пределах 1–3 мкм (рис. 1, а). Однако в условиях высокого потока нейтронов во время модернизации был использован слой конвертера толщиной 40 нм и диаметром 8 см. Такой слой был выбран для того, чтобы получить хорошую дискриминацию нейтронов от фонового γ -излучения. Внешний диаметр корпуса детектора составляет 20 см, поэтому анодные проволочки охватывают окружность диаметром 18 см, а расстояние между проволочками составляет примерно 8 мм. Толщина газового дрейфового зазора (расстояние между крышкой детектора и слоем В₄С) составляет ~ 18 мм, при этом рамка анода расположена таким образом, что провода центрируются в газовом зазоре состава Ag/CO₂(97/3) с рабочим давлением 900 мбар. В этом же контексте экспериментальные исследования характеристик счёта на детекторе в зависимости от напряжения показали, что при низком давлении газа приложенное напряжение также следует уменьшить. Зарегистрированный экспериментальный амплитудный спектр для различного давления газа при различном на-

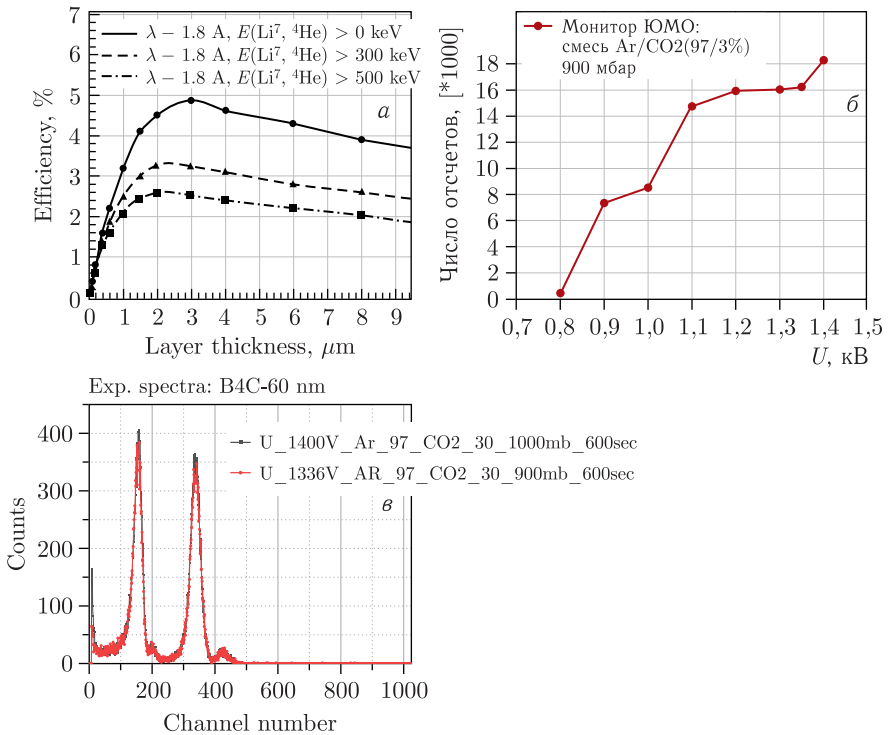


Рис. 1. а) Эффективность однослойного детектора в зависимости от толщины напыления В₄С и при различных порогах по энергии. б) Счетная характеристика ДПП ЮМО в зависимости от напряжения. в) Амплитудный спектр модернизированного конвертера при различных значениях приложенного напряжения с соответствующим ему рабочим давлением

пряжении с использованием источника нейтронов [^{252}Cf] представлен на рис. 1, б и показывает, что рабочее напряжение в нашем детекторе, исходя из давления используемого газа, должно составлять 1336 В.

На рис. 2, а представлены внешний вид детектора, его внутренняя часть (рис. 2, в, г) с установленным конвертером и его строение. В представленной таблице даны основные характеристики детектора.

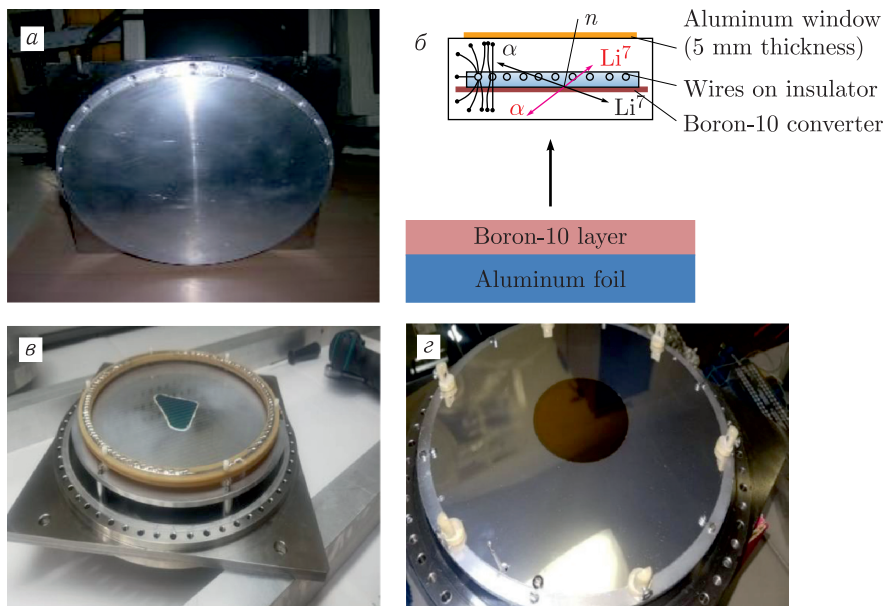


Рис. 2. Общий вид детектора со стороны входного окна (а), схема детектора и принцип его работы (б), детектор изнутри со старым слоем конвертера ^{10}B неправильной формы (в) и новым слоем конвертера B_4C (г)

Таблица. Основные характеристики нового детектора прямого пучка

Эффективность	Не менее 0,1 %
Толщина входного окна, мм	5
Диаметр нитей, мкм	50
Тип напыления	B_4C
Степень обогащения, %	96
Толщина напыления, нм	40
Диаметр конвертера, см	8
Диапазон длин волн измеряемых нейтронов, Å	От 0,5 до 14
Условия работы	Вакуум
Ожидаемый срок службы при эксплуатации	10 лет

ДПП демонстрирует отличные результаты при технической настройке смещения окна прерывателя относительно вспышки нейтронов, неполной коллимации и мониторинге флуктуаций мощности реактора, которые могут привести к ошибкам в процессе нормировки. В следующем разделе мы объясним важность детектора прямого пучка с технической и аналитической точек зрения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДПП ПРИ НОРМИРОВКЕ

Для некоторых случаев детектор прямого пучка играет важную роль при нормализации данных. Для стандартного процесса нормировки макроскопическое сечение рассеяния определяется следующим уравнением:

$$\left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_s = \frac{I_s}{I_{sv} - I_s} \cdot \frac{\Omega_v}{\Omega_s} \cdot T_v \cdot d_v \cdot \left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_v \cdot \frac{1}{d_s},$$

где

$$I_s = I_0(\lambda) \epsilon(\lambda) \left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_s T_s \Omega_s d_s \quad \text{и} \quad I_{sv} = I_s + I_0(\lambda) \epsilon(\lambda) \left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_v T_s T_v \Omega_v d_v$$

Однако для тех случаев, когда разница между значениями рассеяния от нашего образца и рассеяния от образца с ванадиевым стандартом перед каждым детектором рассеяния становится близкой к нулю (значение в знаменателе), в программе первичной обработки данных используется альтернативная процедура нормировки, которая требует знания пропуска образца с использованием ДПП. Соотношение макроскопических сечений будет следующим:

$$\frac{\left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_s}{\left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_v} = \frac{I_s}{I_v} \cdot \frac{\Omega_v}{\Omega_s} \cdot \frac{T_s}{T_v} \cdot \frac{d_s}{d_v}, \quad \text{где} \quad I_v = I_0(\lambda) \epsilon(\lambda) \left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_v T_v \Omega_v d_v.$$

Теперь пропускание образца может быть получено с использованием зарегистрированного на ДПП спектра от образца и от пустого пучка как

$$I_s^d = I \epsilon^d T_s, \quad I_e^d = I \epsilon^d,$$

где I_s^d — интенсивность на ДПП с образцом, I_e^d — интенсивность на ДПП без образца, I — поток в позиции образца, ϵ^d — эффективность ДПП, T_s — пропускание образца.

Таким образом, макроскопическое соотношение может быть выражено в терминах интенсивности, где не требуется знать эффективность детектора:

$$\frac{\left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_s}{\left(\frac{d\Sigma}{d\Omega}\right)_v} = \frac{I_s}{I_v} \cdot \frac{\Omega_v}{\Omega_s} \cdot \frac{1}{T_v} \cdot \frac{I_s^d}{I_e^d} \cdot \frac{d_s}{d_v}.$$

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДПП ДЛЯ МОНИТОРИНГА СПЕКТРА НЕЙТРОННОГО ПУЧКА И НАСТРОЙКИ ОБОРУДОВАНИЯ

Из рис. 3 видно, что ДПП также помогает отслеживать изменения, связанные с колебаниями мощности реактора и состоянием оборудования, такие как режим работы замедлителя (температура ~ 300 и ~ 30 К, рис. 3, *a, б*), колебания его температуры (рис. 3, *б* синяя кривая) и сдвиг окна прерывателя относительно вспышки нейтронов (рис. 3, *a*). Эти изменения также заметны и при использовании детектора рассеяния.

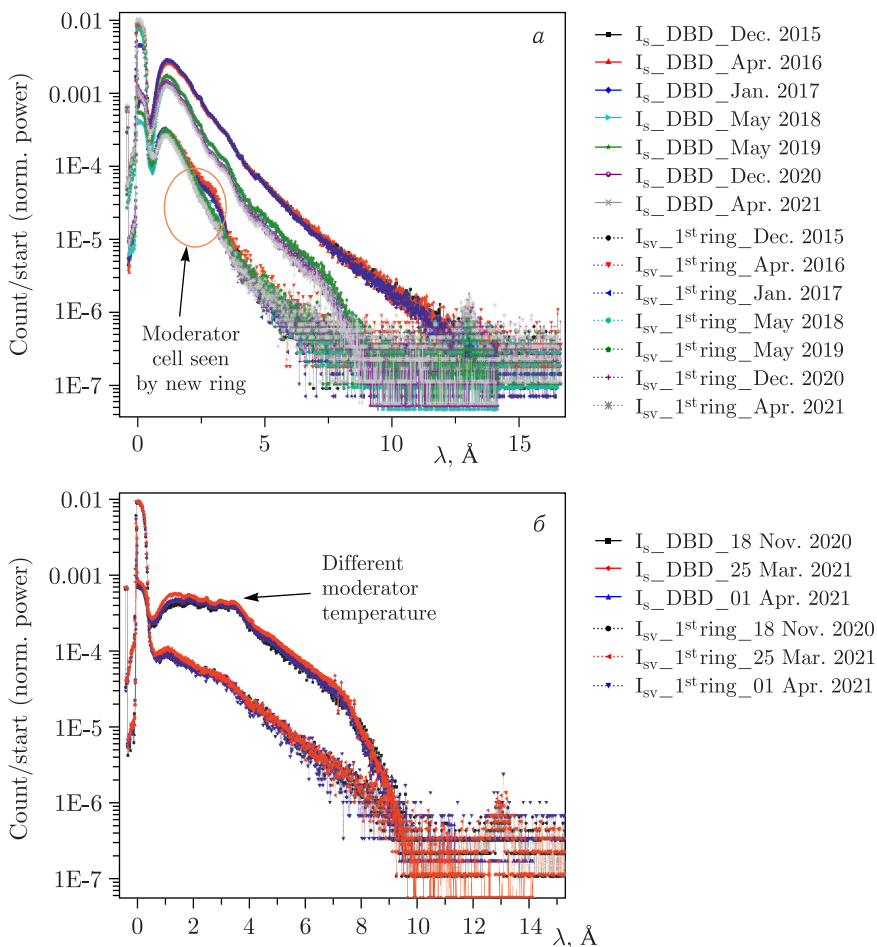


Рис. 3. Спектры рассеяния пустого пучка детектора, зарегистрированные на ДПП (I_s_DBD) и первом кольце детектора ($I_{sv_1^{st}\ ring}$ с ванадиевым стандартом) в период с 2015 по 2021 г., когда замедлитель работал при температурах ~ 300 (*a*) и 30 К (*б*)

Поскольку площадь конвертера модернизированного ДПП имеет диаметр 8 см, что больше, чем диаметр прошедшего пучка нейтронов, при юстировке коллиматора (рис. 4, *а*) можно увидеть, что интегральный поток на детекторе пропорционален площади коллиматора. Также на рис. 4, *б* представлены спектры пучка нейтронов в зависимости от задержки открытия окна прерывателя относительно вспышки реактора ИБР-2. Как видно, чувствительности ДПП достаточно для точной настройки данного параметра.

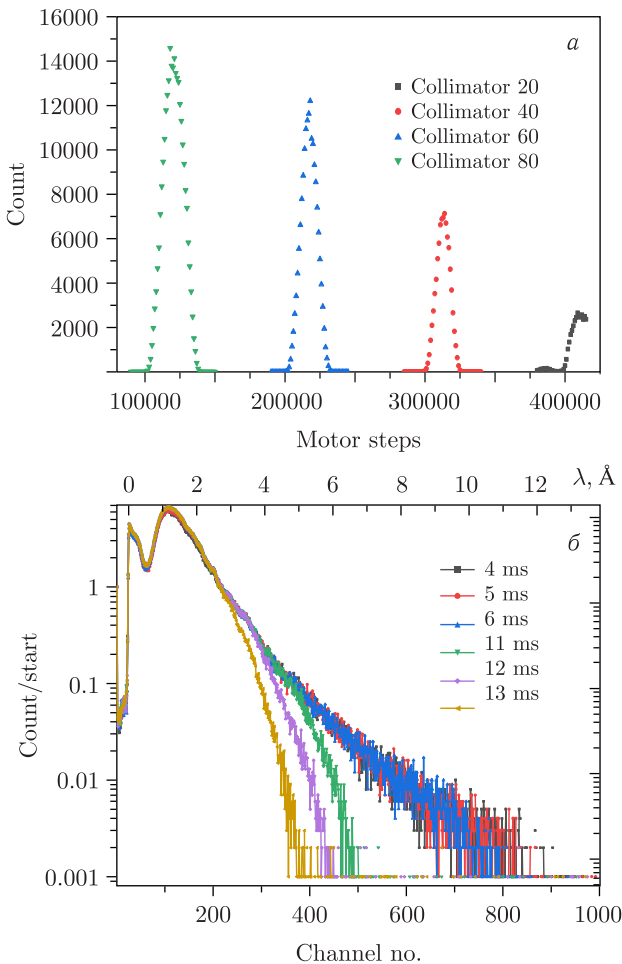


Рис. 4. Интегральная интенсивность рассеяния на ДПП в зависимости от изменения позиции коллиматора (*а*) и спектр нейтронов на ДПП в зависимости от длины волны нейтрона для различных значений задержки открытия окна прерывателя (*б*)

В этом контексте эффективность и стабильность нового конвертера для ДПП были подтверждены путем изучения спектра пустого пучка в разных циклах работы реактора. Он показал отличную стабильность при различных мощностях реактора. Дополнительные пики на рис.5 в районе 13 \AA соответствуют спектру нейтронов при попадании второго крыла отражателя (частота — 10 Гц) в зону отражения нейтронов и появлению дополнительной вспышки нейтронов, значительно меньшей по интенсивности, чем основная.

На модернизированном ДПП проведено измерение поглощения нейтронов образцом пластины с напыленным слоем $^{10}\text{B}_4\text{C}$ старого конвертера,

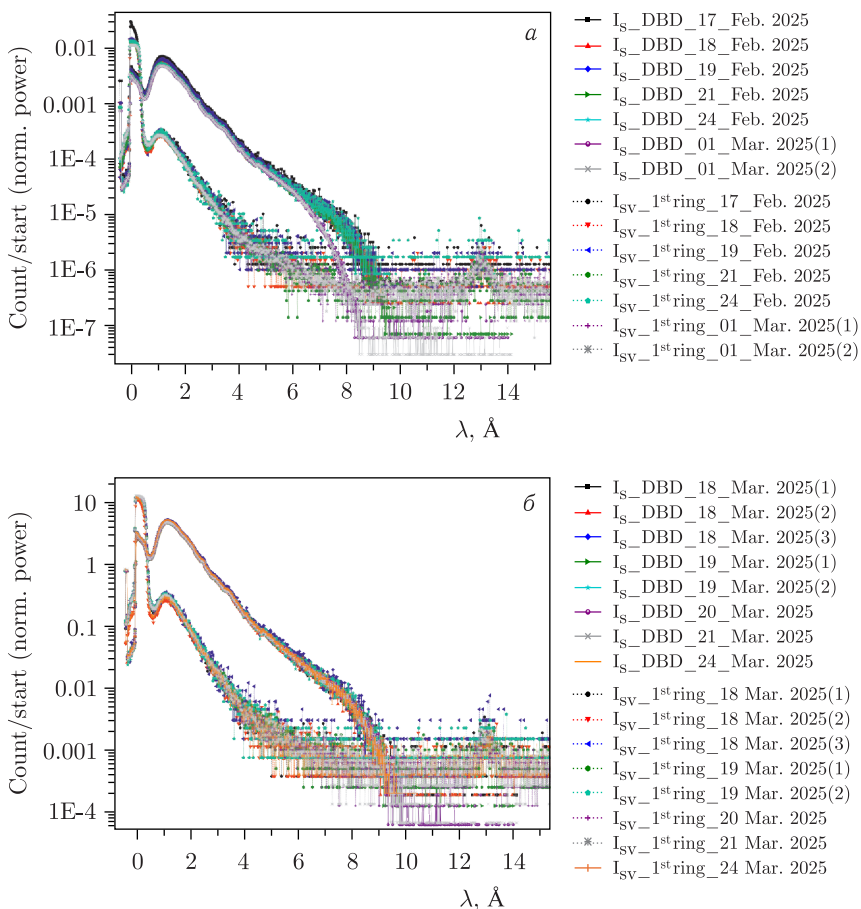


Рис. 5. Спектры нейтронов от пустого пучка, зарегистрированные на ДПП и первом кольце дальнего детектора рассеяния (с ванадиевым стандартом в пучке) в 1-м (а) и 2-м циклах (б) реактора ИБР-2 в 2025 г.

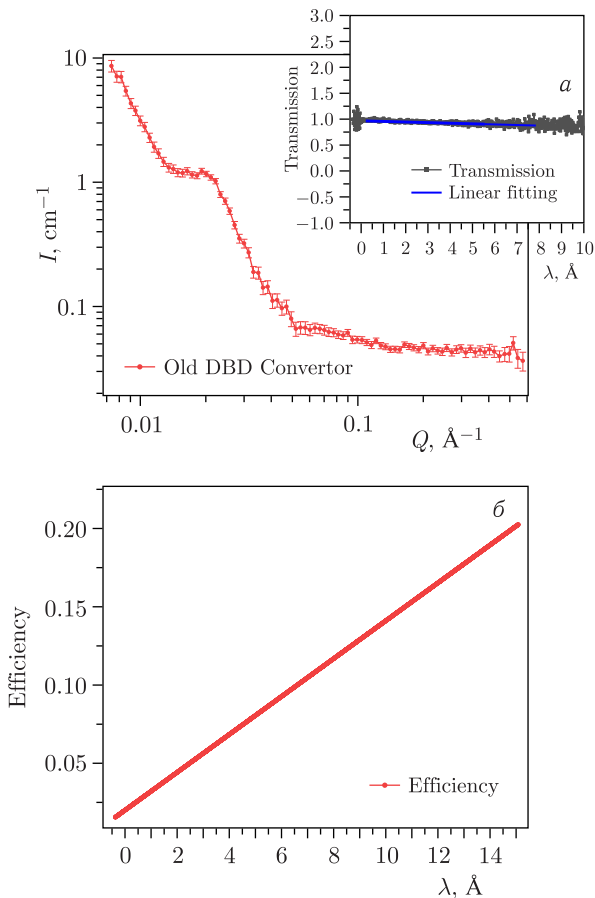


Рис. 6. Кривая малоуглового рассеяния нейтронов и пропускания старого ДПП конвертера с помощью модернизированного ДПП (а) и вычисления эффективности с использованием кривых подгонки по пропусканию (б)

замененного в процессе модернизации. Данные по пропусканию дают нам оценку эффективности старого конвертера при различных длинах волн (рис. 6).

Сравнение нормированного на мощность реактора спектра пустого пучка на старом и новом конвертере ДПП для замедлителя при температурах 300 К (рис. 7, а) и 30 К (рис. 7, б) должно показать изменения эффективности ДПП и общую производительность для обоих случаев.

Сравнивая интенсивность рассеяния на кольцевом детекторе (рис. 7, а, б), мы видим что в разных циклах работы реактора ИБР-2 эффективность детектора и его счетные характеристики идентичны. Мы видим сильное различие в интенсивностях рассеяния, зарегистрированных

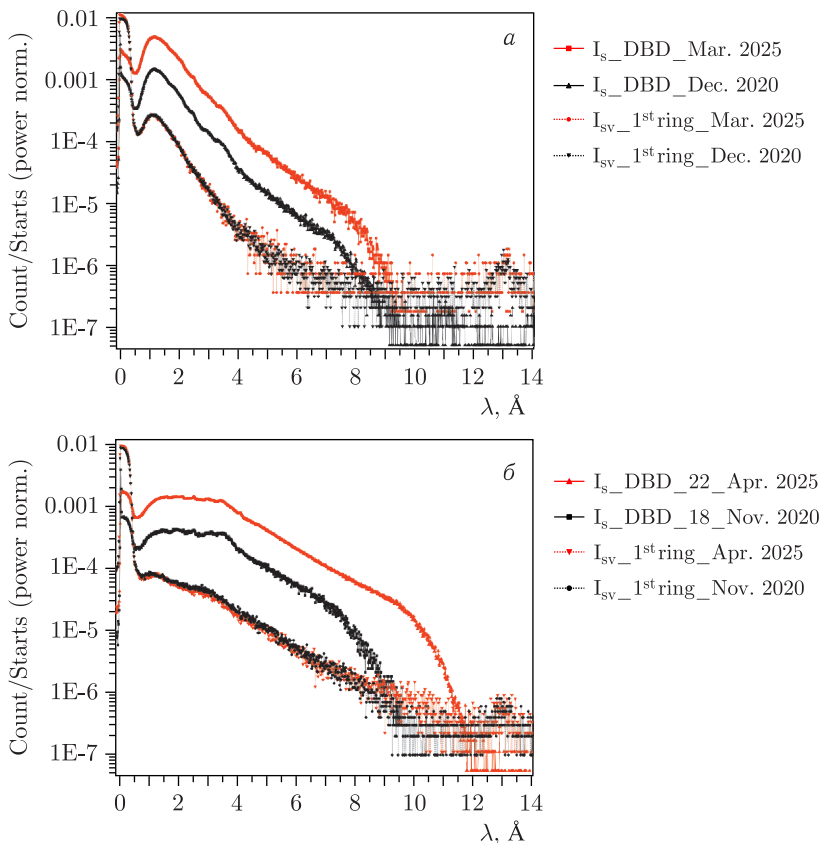


Рис. 7. Спектр пустого пучка, зарегистрированный на старом (черные кривые) и на новом (красные кривые) конвертере ДПП и первом кольце нового детектора (с ванадиевым стандартом) при температурах 300 (а) и 30 К (б)

с помощью ДПП до модернизации (черная кривая) и после нее (красная кривая). При этом основной вклад в увеличение интенсивности дает увеличенная площадь конвертера. Результаты показали, что даже при произвольно выбранных данных спектральное распределение нейтронов с использованием старого и нового конвертера выглядят схожими, что указывает на отличную работу ДПП на протяжении многих лет без изменения эффективности в зависимости от длины волны нейтрона.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ БОРНОГО КОНВЕРТЕРА С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Нами были проведены исследования методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) поверхностного слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$ конвертера ДПП, который использовался до модернизации. Время эксплуатации составило более 10 лет

или свыше 70 недель нейтронного и γ -облучения широкого диапазона энергий [25]. На рис. 8, *а, б* представлены полученные результаты. Можно наблюдать отверстия с размерами порядка нескольких микрон ($\sim 2\text{--}5\text{ мкм}$) и характерными расстояниями около 5 мкм между ними. Эти отверстия, возможно, возникли в результате нейтронного облучения и могут увеличиваться на протяжении всего срока службы детектора.

Такое порообразование схоже с литературными данными исследований, в которых изучались нанослои, изготовленные с использованием современных методов [26]. В них также продемонстрировано наличие отверстий с подобными характеристиками расстояний между ними, но значительно меньшего размера (рис. 8, *в*).

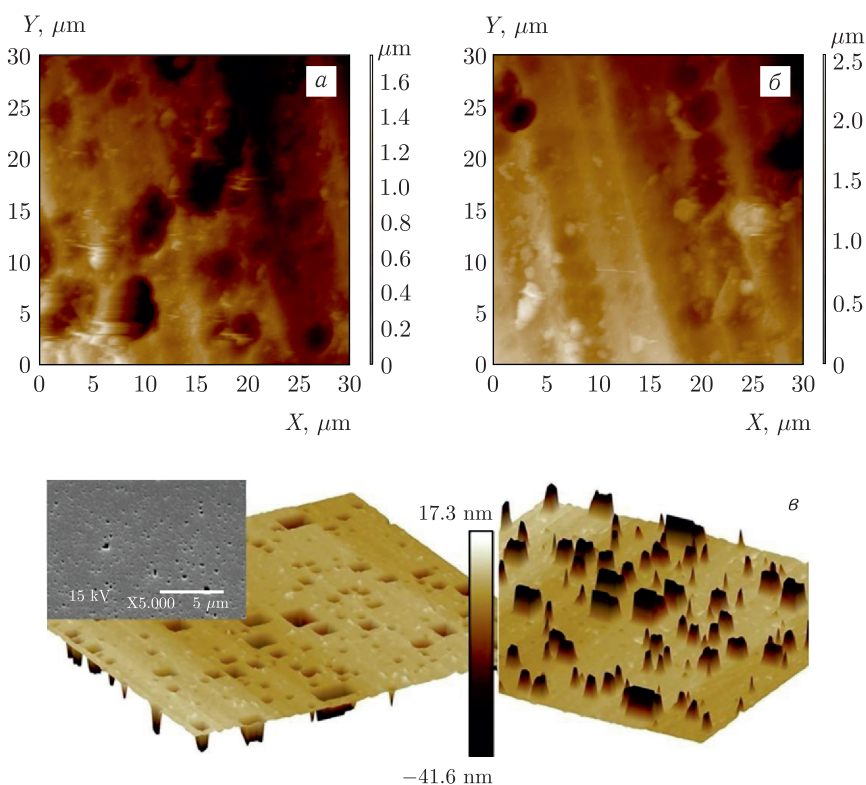


Рис. 8. Фотографии, полученные с помощью АСМ от $^{10}\text{В}$ конвертера детектора прямого нейтронного пучка после 10 лет эксплуатации на спектрометре МУРН ЮМО, ИБР-2, ОИЯИ (*а, б*). Сравнение с изображениями АСМ из литературы, показывающими 1-нм слой бора после 6-минутного травления в тетраметиламмонийном гидроксиде ($3 \times 3\text{ мкм}^2$) (*в*). Вставка — изображение СЭМ той же области. Рисунок (*в*) взят из [26]

Таким образом, слои $^{10}\text{B}_4\text{C}$, подготовленные методом напыления, могут включать слабые области, которые могли послужить источниками отверстий, наблюдаемых на рис. 8, а, б. Более того, мы наблюдали их круглыми и асимметричными, последние могли образовываться в результате роста и соединения двух соседних отверстий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детектор, реализованный на конвертере $^{10}\text{B}_4\text{C}$, показал свою работоспособность в течение более 10 лет, практически без необходимости в обслуживании. Опыт изучения спектров, полученных на старом ДПП за последние годы, использован при модернизации этого же детектора. В процессе модернизации были изменены размер и форма конвертера, подобрано значение высокого напряжения и в целом изменена конфигурация установки. ДПП теперь имеет меньшую чувствительность к гамма-сигналам и нейтронам промежуточных энергий по сравнению с кольцевыми проволочными пропорциональными детекторами рассеяния с гелиевым наполнением, что позволяет проводить измерения в прямом пучке с мощностью реактора почти 2000 МВт в импульсе. Спектральное распределение на ДПП точно повторяет спектры от детекторов рассеяния, что указывает на отсутствие потерь, связанных с мертвым временем детектора. В то же время эффективность достаточна для большинства экспериментов с точки зрения статистической надежности.

Новый ДПП демонстрирует отличную эффективность при мониторинге спектра тепловых и холодных нейтронов. Сравнение спектров, полученных с помощью старого и нового ДПП, показывает, что нейтронный пучок на спектрометре ЮМО хорошо сколлимирован, а узлы установки отъюстированы.

Благодарности. С. Успенский благодарит РНФ за предоставление гранта (№ 25-23-00743).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuklin A. I. et al.* Small-Angle Neutron Scattering at the Pulsed Reactor IBR-2: Current Status and Prospects // *Crystallogr. Rep.* 2021. V. 66, No. 2. P. 231–241.
2. *Ostanevich Y. M.* // *Макромол. Chem., Macromol. Symp.* 1988. V. 15. P. 91–103.
3. *Kuklin A. I., Islamov A. K., Gordeliy V. I.* Two-Detector System for Small-Angle Neutron Scattering // *Neutron News.* 2005. V. 16. P. 16–18.
4. *Куклин А. И. и др.* Оптимизация двухдетекторной системы малоуглового нейтронного спектрометра ЮМО для исследования нанообъектов // *Поверхность.* 2006. № 6. С. 74–83.
5. *Soloviev A. G. et al.* SAS Program for Two-Detector System: Seamless Curve from Both Detectors // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V. 848, No. 1. P. 12020.

6. Вагов В. А. и др. Установка малоуглового рассеяния нейтронов по методу времени пролета на импульсном реакторе ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р14-83-898. Дубна, 1983.
7. Nowak G. et al. Boron Carbide Coatings for Neutron Detection Probed by X-Rays, Ions, and Neutrons to Determine Thin Film Quality // J. Appl. Phys. 2015. V. 117, 034901.
8. Saito Y. et al. Application of High-Frame-Rate Neutron Radiography to Steam Explosion Research // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 424, No. 1. P. 142–147.
9. Aldrich L. T., Nier A. O. The Occurrence of He³ in Natural Sources of Helium // Phys. Rev. 1948. V. 74, No. 11. P. 1590–1594.
10. Binder H. H. Lexikon der chemischen Elemente. Stuttgart; Leipzig: Hirzel, 1999. XIII, 856 S.
11. Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey (USGS). 2008. 199 p.
12. Van Vuure T. L. et al. First Measurements of the Inclined Boron Layer Thermal-Neutron Detector for Reflectometry // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. V. 57, No. 1. Part 2. P. 323–327.
13. Arnaldi R. et al. Resistive Plate Chamber for Thermal Neutron Detection // Nucl. Instr. Meth. B. 2004. V. 213. P. 284–288.
14. Höglund C. et al. B₄C Thin Films for Neutron Detection // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. 104908.
15. Deng C. et al. Applied Sciences Research on a Neutron Detector with a Boron-Lined Multilayer Converter // Appl. Sci. 2024. V. 14, No. 10. P. 4269.
16. Stefanescu I. et al. Development of a Novel Macrostructured Cathode for Large-Area Neutron Detectors Based on the 10B-Containing Solid Converter // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 727. P. 109–125.
17. Ehlers G. et al. Performance Tests of Boron-Coated Straw Detectors with Thermal and Cold Neutron Beams // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 953. P. 163238.
18. Mauri G. et al. Fast Neutron Sensitivity of Neutron Detectors Based on Boron-10 Converter Layers // J. Instrum. 2018. V. 13, No. 3.
19. Takada M. et al. Development of a Real-Time Neutron Beam Detector for Boron Neutron Capture Therapy Using a Thin Silicon Sensor // Appl. Radiat. Isot. 2021. V. 176. P. 109856.
20. Charpak G. Multiwire Chambers, Drift Chambers and Some of Their Applications // Europhys. News. 1979. V. 10, No. 7–8. P. 7–10.
21. Charpak G. Multiwire and Drift Proportional Chambers // Phys. Today. 1978. V. 31, No. 10. P. 23–30.
22. Woo J. C., Moon D. M., Kawaguchi H. Design and Characterization of a Helium-Discharge Ionization Detector for Gas Chromatography // Anal. Sci. 1996. V. 12, No. 2. P. 195–200.
23. Lester L. F., Morris J. R., Rice G. W. Micro GC: Of Detectors and Their Integration. 2014.
24. Agostinelli S. et al. GEANT4 — A Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506, No. 3. P. 250–303.

25. *Kuklin A. I. et al.* Analysis of Neutron Spectra and Fluxes Obtained with Cold and Thermal Moderators at IBR-2 Reactor: Experimental and Computer-Modeling Studies // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2011. V. 8, No. 2. P. 119–128.
26. *Nanver L. K. et al.* Nanolayer Boron-Semiconductor Interfaces and Their Device Applications // *Solid. State. Electron.* 2021. V. 186. P. 108041.

Получено 30 января 2026 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 20.03.2026.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,12. Тираж 125 экз. Заказ № 61279.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru
publish.jinr.ru