

УДК 53.08

## КОНЦЕПЦИЯ МАЛОУГЛОВОГО ДИФРАКТОМЕТРА В КЛАССИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ НА ХОЛОДНОМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕ РЕАКТОРА ИБР-2

© 2018 г. М. В. Авдеев<sup>1,2,\*</sup>, Р. А. Еремин<sup>3</sup>, В. И. Боднарчук<sup>1</sup>, И. В. Гапон<sup>1,4,5</sup>,  
В. И. Петренко<sup>1,4</sup>, Р. В. Эрхан<sup>1,6</sup>, А. В. Чураков<sup>1</sup>, Д. П. Козленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, 443086 Самара, Россия

<sup>4</sup>Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, 01033 Киев, Украина

<sup>5</sup>Институт проблем безопасности АЕС НАН Украины, 02000 Киев, Украина

<sup>6</sup>National Research Institute of Physics and Nuclear Engineering “Horia Hulubej” (IFIN HH), Bucharest–Magurele, Romania

\*E-mail: avd@nf.jinr.ru

Поступила в редакцию 12.01.2018 г.

На основе численных расчетов изучены возможные концепции реализации на реакторе ИБР-2 малоуглового времяпролетного дифрактометра, оптимизированного для двух режимов работы замедлителя нейтронов – холодного (температура 30 К) и теплового (температура 300 К). В холодном режиме максимум энергетического спектра нейтронов в пучке смещен в область низких энергий (больших длин волн), что расширяет диапазон чувствительности установки в отношении размеров исследуемых объектов (1–100 нм и выше). Рассмотрена классическая схема отделения тепловых/холодных нейтронов ( $E \sim 10^{-3} - 10^{-2}$  эВ) от фона (сформированного, главным образом, быстрыми нейтронами) на основе изогнутых нейтронно-оптических устройств. Из-за ограничений, накладываемых геометрией канала, на котором планируется поместить установку, предпочтительной является конфигурация с коротким многоканальным зеркальным устройством отклонения пучка. Выполнены моделирование и оптимизация предполагаемой малоугловой установки с учетом реальной геометрии канала и доступного места в экспериментальном зале реактора. Проведено сравнение с установкой на основе изогнутого нейтронвода и установкой с прямой видимостью замедлителя.

**Ключевые слова:** дифрактометр малоуглового рассеяния нейтронов, моделирование, малоугловое рассеяние нейтронов, программный пакет Vitess.

DOI: 10.7868/S0207352818070016

### ВВЕДЕНИЕ

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) – один из широко используемых методов исследования нанообъектов – систем, свойства которых определяются структурными особенностями на уровне 1–100 нм. Такие системы включают в себя комплексные растворы, наноматериалы, полимеры, биологические макромолекулы и мембраны и другие объекты. В каждом современном нейтронном центре сегодня действует, по крайней мере, одна установка МУРН. Более того, можно говорить о тенденции создания в одном центре нескольких малоугловых дифрактометров, оптимизированных для задач разных типов, что позволяет наиболее эффективно использовать метод МУРН.

На импульсном реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ (Дубна) успешно действует времяпролетная установка малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО [1], которая ориентирована на работу с тепловым замедлителем ( $T = 300$  К) и использует коллимацию с прямой видимостью замедлителя [2]. В настоящее время активно ведется разработка холодных замедлителей ( $T = 30$  К) для каналов реактора ИБР-2 [3–7], использование которых позволяет, с одной стороны, расширить диапазон сканирования по длине волны и улучшить разрешение установок по рассеянию нейтронов, а с другой стороны, дает возможность существенно подавлять фон быстрых нейтронов с помощью изогнутых нейтронно-оптических устройств, отклоняющих с высокой эффективностью только

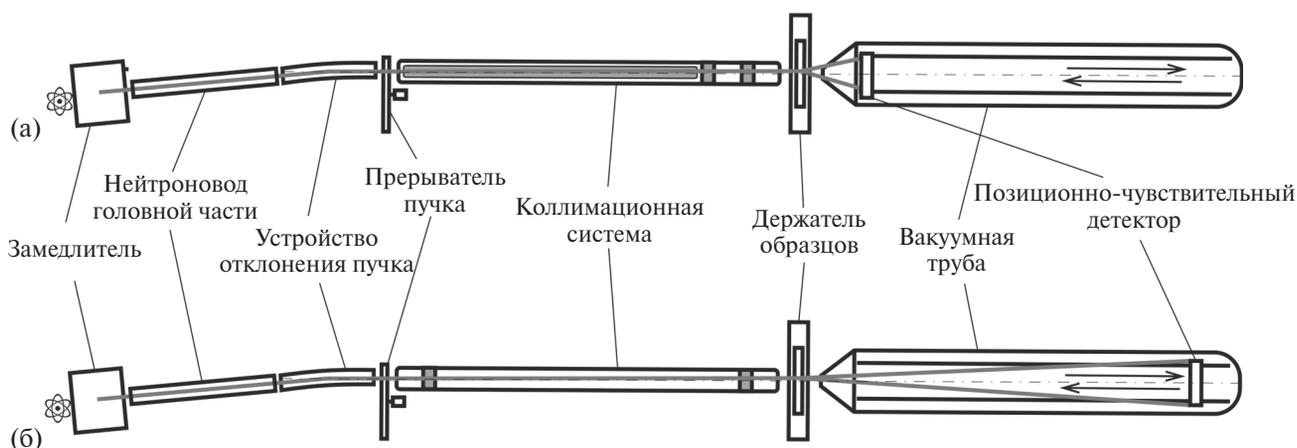
тепловые и холодные нейтроны от направления прямой видимости замедлителя. Сегодня опция холодного режима работы замедлителя доступна на каналах 7, 8, 10 реактора ИБР-2, на которых действуют дифрактометры ЭПСИЛОН-МДС, СКАТ для исследования текстур [8], спектрометр неупругого рассеяния НЕРА [9] и нейтронные рефлектометры РЕМУР [10] и ГРЭИНС [11].

В этой связи высокую актуальность приобретает вопрос возможности реализации на ИБР-2 малоуглового времяпролетного дифрактометра, оптимизированного для работы с холодным замедлителем с использованием классической конфигурации для разделения быстрых и тепловых нейтронов. В настоящей работе на основе метода Монте-Карло проведены численное моделирование и оптимизация такой установки, включая расчеты потоков, их спектральных распределений и расходимости пучка. Так как на практике работа вышеуказанного замедлителя на ИБР-2 осуществляется в двух режимах – холодном (температура 30 К) и тепловом (температура 300 К), оба они рассмотрены при оптимизации параметров модельного дифрактометра. В качестве места расположения выбран свободный канал 10а, который предоставляет сегодня максимальные возможности по габаритам установки в экспериментальных залах реактора. Из-за ограничений по размерам в качестве основной рассмотрена и оптимизирована конфигурация с использованием короткого многоселевого многоканального устройства отклонения пучка. Также проведено численное сравнение с другими возможными конфигурациями, включая установку на основе изогнутого нейтронновода и установку с прямой видимостью замедлителя.

## ОПИСАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Виртуальную установку для оптимизации задавали исходя из возможностей размещения дифрактометра на канале 10а реактора ИБР-2. Ее габариты ограничиваются размерами экспериментального зала, геометрией и размерами расположенных рядом установок и их биологической защитой. Наилучшей в данных условиях видится конфигурация с использованием относительно короткого устройства отклонения пучка, размещаемого на расстоянии 8–10 м от замедлителя и отклоняющего пучок на  $8^{\circ}$ – $10^{\circ}$ . В этом случае максимально возможная длина установки, начиная с замедлителя, составляет примерно 35 м. Потери в пропускании из-за относительно большой кривизны должны быть скомпенсированы многоканальной конструкцией на основе отражающих пластин (толщина 1 мм), расположенных параллельно друг другу и образующих узкие зеркальные каналы. При такой конфигурации становится возможной реализация прибора с достаточно большой коллимационной длиной (расстоянием между апертурами-формирователями)  $\sim 10$  м. Согласно оптимальному соотношению для достижения максимального разрешения коллимационная длина должна быть равна пролетной базе образец–детектор, что позволяет достигать минимального размера прямого пучка на детекторе и разрешать рассеянный под малыми углами пучок. Таким образом, при максимальной коллимационной длине на обсуждаемой установке достаточно места для реализации оптимального по двум пролетным базам условия  $10 \text{ м} + 10 \text{ м}$ .

Принципиальная схема установки с предельными (минимальным 1 м и максимальным 10 м) расстояниями между апертурами-формирователями (круглые отверстия в поглощающих экранах) представлена на рис. 1. Параметры, используемые при



**Рис. 1.** Схема основной модельной конфигурации малоуглового дифрактометра на основе устройства отклонения пучка с предельными положениями апертур-формирователей и расстояниями образец–детектор, рассматриваемых при оптимизации коллимационной длины: а – 1; б – 10 м.

**Таблица 1.** Параметры моделирования виртуальной установки МУРН

№ п/п	Параметр	Значение
1	Поток на поверхности замедлителя, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$10^{12}$
2	Интервал длин волн нейтронов, нм	0.1–1
3	Расстояние замедлитель–головная часть, м	2.27
4	Нейтроновод в головной части: поперечный размер, мм длина, м отражательная способность $m$	$60 \times 60$ (квадратное сечение) 5.84 2
5	Устройство отклонения пучка: поперечный размер, мм отклоняющий угол, град отражательная способность $m$	$60 \times 60$ (квадратное сечение) 8 2, неполяризующий, многоканальный (вертикальная организация каналов, отражающее покрытие горизонтальных граней)
6	Расстояние отклоняющее устройство– коллимационная система, м	1
7	Нейтроноводная вкладка: поперечный размер, мм длина, м отражательная способность $m$	$40 \times 40$ (квадратное сечение) 0–10 2
8	Расстояние апертура I – апертура II, м	1–10
9	Диаметр апертуры I, мм	25
10	Диаметр апертуры II, мм	12
11	Расстояние апертура II – образец, м	0.2
12	Расстояние образец–детектор, м	1–10

моделировании, представлены в табл. 1. Расчеты (интегральные потоки, спектральные распределения потоков, расходимость пучка) в рамках метода Монте-Карло проводили на основе программного пакета Vitess 2.11 [12]. Исходный спектр нейтронов от замедлителя моделировали в виде максвелловского распределения, соответствующего температуре замедлителя. Для оптимизации установки в отношении двух режимов работы замедлителя – холодного (30 К) и теплового (300 К) – применяли следующий подход. Сначала, помимо основных температурных режимов, был рассмотрен промежуточный режим с температурой 100 К, при котором формируется спектр, содержащий характерные особенности как холодного, так и теплового режимов. После выбора оптимальной модификации устройства отклонения пучка при данной температуре на следующем этапе были проведены расчеты для рабочих температур замедлителя 30 и 300 К с последующим анализом возможности работы установки в двух режимах.

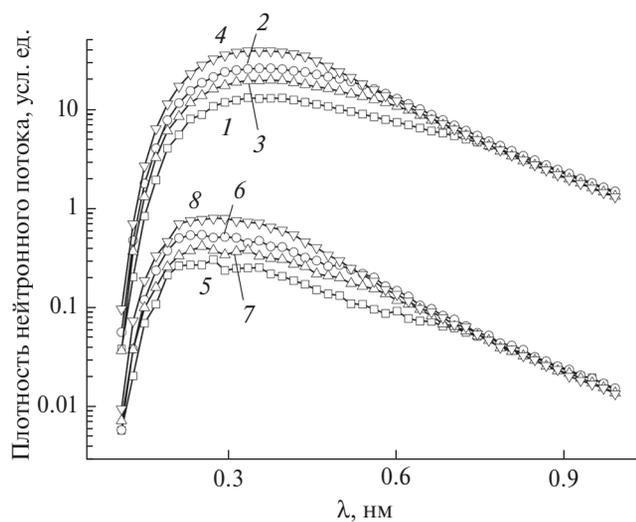
#### ВОЗМОЖНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ

**Установка на основе устройства отклонения пучка.** При оптимизации рассмотрено несколько модификаций устройства отклонения пучка

нейтронов при температуре замедлителя 100 К, которые представлены в табл. 2. Варьировали количество зеркальных каналов и длину устройства. На рис. 2 представлены соответствующие результаты расчета спектрального распределения потока нейтронов с указанием значений интегрального потока для двух предельных конфигураций установки (рис. 1) с разными положениями апертур-формирователей. Использование устройства отклонения пучка с меньшей кривизной (сравнение модификаций mod1 и mod2) приводит к увеличению потока в спектральном интервале от 1 до 8 Å: интегральный поток увеличивается на 60% после устройства отклонения пучка и на 80% на образце при обоих предельных расстояниях между апертурами-формирователями. Использование устройства длиной 1 м и увеличение числа зеркальных каналов до 30 (сравнение модификаций mod1–mod3) обеспечивает меньший прирост светосилы, который составляет ~40% в случаях обоих предельных расстояний между апертурами-формирователями. Как и следовало ожидать, максимальное увеличение потока на образце наблюдается при использовании более длинного устройства и увеличении в нем числа зеркальных каналов (сравнение модификаций mod1–mod4).

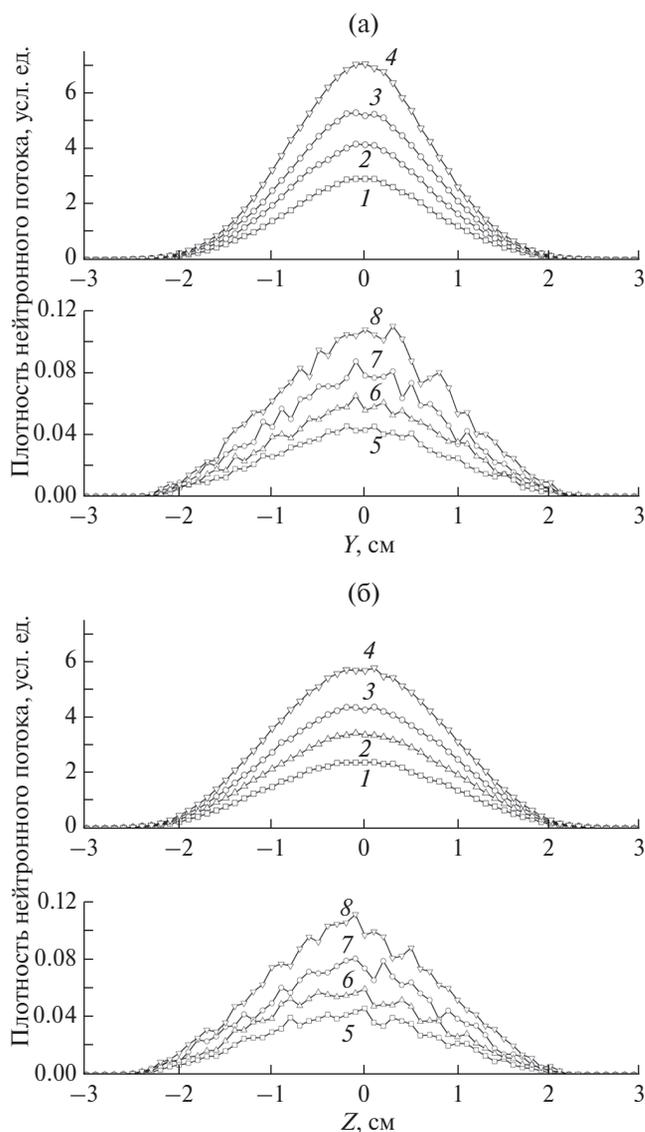
**Таблица 2.** Варианты модификации устройства отклонения пучка, для которых проводился расчет

№ п/п	Количество зеркальных каналов в устройстве	Длина устройства, м	Радиус кривизны устройства, м
mod1	20	1	7.16
mod2	20	2	14.32
mod3	30	1	7.16
mod4	30	2	14.32



**Рис. 2.** Расчетные спектральные распределения нейтронного пучка на образце при температуре замедлителя 100 К для вариантов модельной модификации малоуглового дифрактометра на основе устройства отклонения пучка mod1 (1, 5), mod2 (2, 6), mod3 (3, 7), mod4 (4, 8) (табл. 2) и расстояний между апертурами-формирователями 1 (1–4) и 10 м (5–8). Расчетные значения интегрального потока: 1 –  $3.09 \times 10^7$ ; 2 –  $5.55 \times 10^7$ ; 3 –  $4.34 \times 10^7$ ; 4 –  $7.17 \times 10^7$ ; 5 –  $1.49 \times 10^6$ ; 6 –  $2.7 \times 10^6$ ; 7 –  $4.72 \times 10^6$ ; 8 –  $36.2 \times 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Угловая расходимость нейтронного пучка по направлениям  $Y$  (горизонталь) и  $Z$  (вертикаль) после коллимационной системы для исследованных модификаций практически одна и та же при одинаковых положениях апертур-формирователей. Профили нейтронных пучков на образце с хорошей точностью воспроизводят параметры второй апертуры-формирователя. Полученные профили пучка на детекторе (рис. 3) дают диаметр пучка в центре детектора на уровне 6 см. В этом случае при максимальной длине волны нейтронов  $\lambda = 1 \text{ нм}$  имеем минимально разрешаемое значение модуля вектора рассеяния  $q_{\min} = 0.02 \text{ нм}^{-1}$ , что является приемлемым для установки достаточно высокого класса. Наблюдаемая несимметричность распределений нейтронных потоков на детекторе по оси  $Z$  обусловлена гравитационным эффектом.



**Рис. 3.** Расчетные профили нейтронного пучка на плоском детекторе по горизонтальному  $Y$  (а) и вертикальному  $Z$  (б) направлениям в логарифмическом масштабе при температуре замедлителя 100 К для вариантов модельной модификации малоуглового дифрактометра на основе устройства отклонения пучка mod1 (1, 5), mod2 (2, 6), mod3 (3, 7), mod4 (4, 8) (табл. 2) и расстояний между апертурами-формирователями 1 (1–4) и 10 м (5–8).

**Таблица 3.** Расчетный интегральный поток ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в разных точках вдоль пучка для разных температур замедлителя и разном расстоянии между апертурами-формирователями для оптимального варианта модификации устройства отклонения пучка (mod2 в табл. 2)

Температура замедлителя	30 К	100 К	300 К
Перед устройством отклонения	$10^9$	$4.3 \times 10^8$	$1.8 \times 10^8$
После устройства отклонения	$3.9 \times 10^8$	$8.5 \times 10^7$	$1.4 \times 10^7$
Положение образца (коллимационная длина 1 м)	$2.3 \times 10^8$	$5.6 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$
Положение образца (коллимационная длина 10 м)	$7.4 \times 10^6$	$2.7 \times 10^6$	$7.2 \times 10^5$

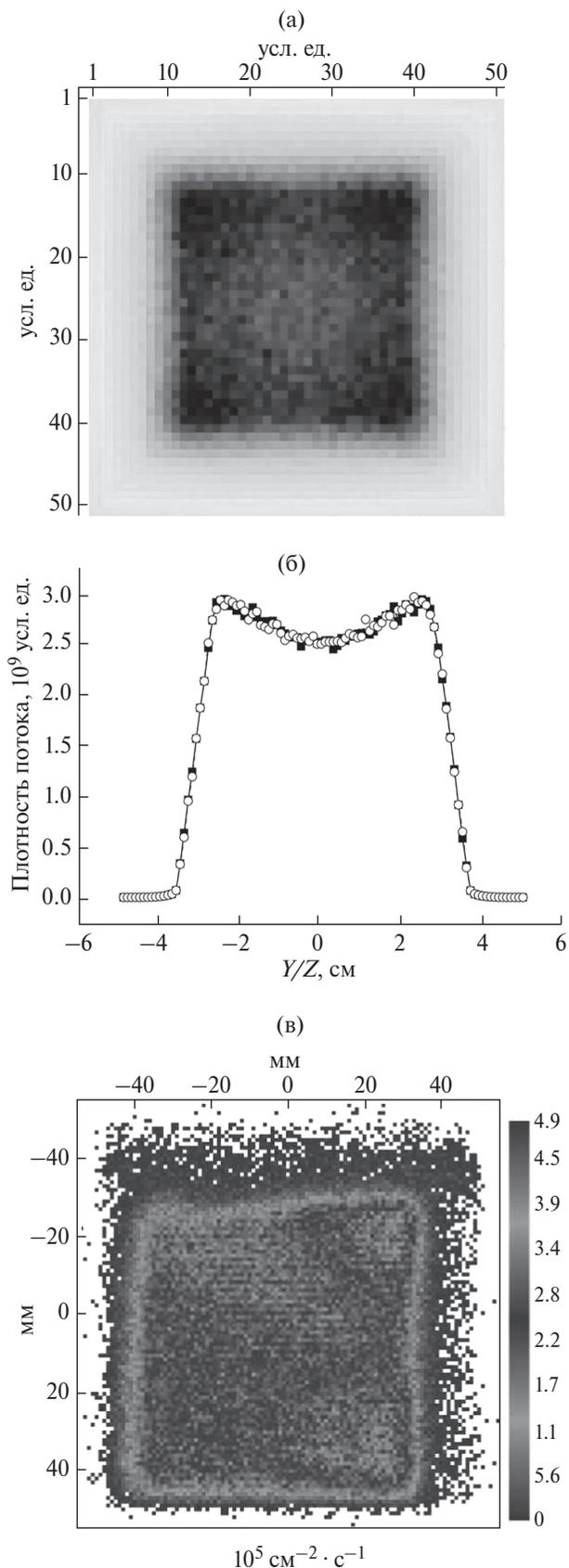
На основе полученных данных в качестве оптимальной выбрана модификация mod2 (количество зеркальных каналов 20, длина 2 м с отклонением  $8^\circ$ ). Данные параметры являются достаточными с точки зрения достижения разумных значений потоков. Увеличение числа зеркальных каналов и длины отклоняющего устройства представляет собой технически сложную и крайне дорогостоящую процедуру. Соответствующие модификации (как видно из рис. 2) не приводят к существенному улучшению характеристик потока.

Следующими шагами были расчеты спектров, интегральных потоков на образце, а также профилей пучка на детекторе для модификации mod2 и двух предельных расстояний между апертурами-формирователями при рабочих температурах замедлителя 30 К (холодный режим) и 300 К (тепловой режим). Расчетные интегральные потоки в разных точках вдоль оси установки для разных температур и расстояний между апертурами-формирователями собраны для сравнения в табл. 3. Видно, что начальное соотношение перед устройством отклонения пучка составляет примерно 5.5 в пользу холодного режима (характерная длина волны  $\lambda_0 = 5.6 \text{ \AA}$ ) в сравнении с тепловым режимом (характерная длина волны  $\lambda_0 = 1.8 \text{ \AA}$ ). На образце в холодном режиме имеем приблизительно 20-кратное (коллимационная длина 1 м) и десятикратное (коллимационная длина 10 м) превышение по данному параметру по сравнению с тепловым режимом.

Полученные профили пучка на образце и на детекторе не меняются с температурой замедлителя. Диаметр пучка на детекторе сохраняется в обоих режимах. Из полученных данных видно, что выбранная конфигурация дифрактометра удовлетворяет с запасом минимальному потоку на образце ( $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) при максимальной коллимационной длине 10 м для реализации полноценных экспериментов при работе замедлителя в холодном режиме. При попеременной работе замедлителя в двух режимах (холодном и тепловом) критическим вопросом реализации является возможность обеспечения достаточного потока на

образце в тепловом режиме. Для оценки реальной ситуации были рассчитаны и измерены с помощью позиционно-чувствительного мониторингового детектора [13, 14] двумерные зависимости плотности нейтронных потоков для температуры замедлителя 300 К на выходе (50 см) из нейтропровода головной части канала 10а реактора ИБР-2. Полученные результаты приведены на рис. 4. Наблюдается заметная (до 16% по усредненным профилям) неоднородность нейтронного пучка с повышенной плотностью потока в окрестности углов нейтропровода (рис. 4а, б). Экспериментальный профиль пучка (рис. 4в) показывает, что на практике имеется дополнительная сильная неоднородность по координате Y, связанная с неоднородностью источника. Предсказанные неоднородности в окрестностях углов квадратного сечения пучка наблюдаются преимущественно с одной стороны. Экспериментальное значение интегрального потока составило  $\sim 5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , что существенно (более чем в три раза) ниже расчетного значения. Причинами такого расхождения являются: наклон (около  $30^\circ$ ) оси пучка канала к нормали плоскости замедлителя, отклонения реального спектра пучка от максвелловского распределения, его сильная чувствительность к температуре замедлителя [7], а также неоднородность пучка, которая может приводить к эффективному занижению оценки интегральной характеристики.

**Установка на основе изогнутого нейтропровода.** Для сравнения были проведены расчеты интегрального потока для установки с изогнутым нейтропроводом вместо рассматриваемого в предыдущем разделе короткого многощелевого устройства отклонения пучка. В общем случае данный вариант существенно проще и дешевле при изготовлении, однако требует достаточно протяженного оптического пути. В случае ограничений на габаритные размеры установки необходимо увеличивать кривизну нейтропровода и таким образом сдвигать характеристическую длину в сторону больших значений, что приводит к подавлению тепловой части спектра. По сравнению со схемой на рис. 1 вместо прямого нейтропровода в головной



части и устройства отклонения пучка располагался нейтронный канал с квадратным сечением  $6 \times 6$  м и кривизной 8 м, чтобы обеспечить оптимальный путь пучка в рамках заданного направления и габаритов с реализацией предельной (10 м + 10 м) конфигурации. Характеристический угол для такого нейтронного канала составил  $\gamma^* = 0.033$  ( $1.91^\circ$ ) с соответствующей характеристической длиной волны  $\lambda^* = \gamma^*/m/0.00173 = 0.95$  нм ( $m$  – отражательная способность). Нейтронный канал располагался на 2 м дальше, чем головная часть для вставки после замедлителя фонового прерывателя (на рис. 1 он находится после устройства отклонения пучка). Расстояние между нейтронным каналом и коллимационной системой составляло около 0.3 м. Значения интегральных потоков на образце приведены для сравнения в табл. 4. Видно, что значительное понижение потока в холодной (холодный режим) и тем более в тепловой (тепловой режим) областях спектра делает рассматриваемую конфигурацию неудовлетворительной. Уменьшение максимального расстояния между апертурами-формирователями с уменьшением кривизны нейтронного канала и увеличением его длины, исходя из доступного места, приводит к ухудшению разрешения прибора при недостаточном увеличении (максимум в два раза) потока на образце, что принципиально не меняет ситуацию.

#### Установка с прямой видимостью замедлителя.

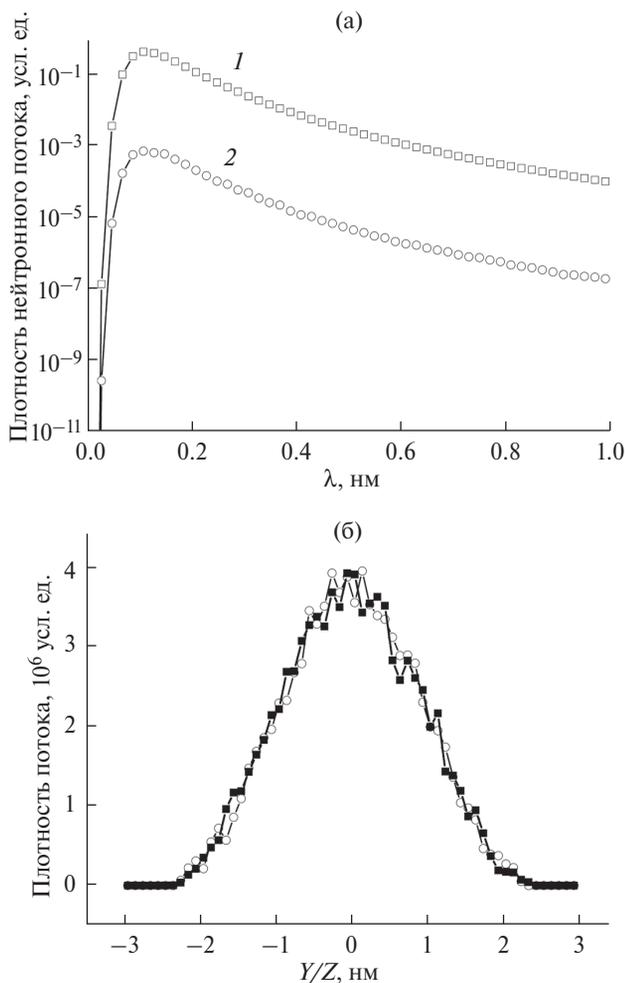
Для сравнения были проведены расчеты спектрального распределения плотности потока нейтронного пучка и интегрального потока для установки с прямой видимостью замедлителя без нейтронных вкладок по всей длине (включая головную часть) для теплового режима замедлителя (температура 300 К). Была рассмотрена наиболее критичная модификация с расстоянием между апертурами-формирователями 10 м. По сравнению со схемой на рис. 1 нейтронный канал в головной части был заменен двумя круглыми коллиматорами диаметром 6 см, размещенными в торцах трубы той же длины, что и нейтронный канал, с покрытием из идеально поглощающего материала. Без каких-либо оптических вкладок, на расстоянии 1 м от головной части располагалась коллимационная система



**Рис. 4.** Расчетное двумерное распределение плотности нейтронного потока на выходе из нейтронного канала головной части малоуглового дифрактометра при температуре замедлителя 300 К (а). Расчетные одномерные распределения после усреднения двумерного распределения по координатам  $Y$  (квадраты) и  $Z$  (кружки) (б). Экспериментальное двумерное распределение нейтронного потока на выходе из нейтронного канала головной части, полученное с помощью позиционно-чувствительного мониторингового детектора на канале 10а реактора ИБР-2 (в).

**Таблица 4.** Расчетный интегральный поток ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на образце для разных температур замедлителя при разном расстоянии между апертурами-формирователями для двух конфигураций: на основе устройства отклонения пучка (mod2 в табл. 2) и на основе изогнутого нейтронновода

Расстояние между апертурами-формирователями, м	30 К		100 К		300 К	
	Отклоняющее устройство	Нейтронновод	Отклоняющее устройство	Нейтронновод	Отклоняющее устройство	Нейтронновод
1	$2.3 \times 10^8$	$1.5 \times 10^6$	$5.6 \times 10^7$	$2.3 \times 10^5$	$1.0 \times 10^7$	$3.4 \times 10^4$
10	$7.4 \times 10^6$	$1.2 \times 10^4$	$2.7 \times 10^6$	$1.9 \times 10^4$	$7.2 \times 10^5$	$2.6 \times 10^2$



**Рис. 5.** Расчетные спектральные распределения плотности потока нейтронного пучка на выходе из головной части (1) и на образце (2) для малоуглового дифрактометра с прямой видимостью замедлителя при температуре замедлителя 300 К и расстоянии между апертурами-формирователями 10 м (а). Усредненные по координатам Y (квадраты) и Z (кружки) профили пучка на детекторе, расположенном на расстоянии 10 м от образца (б).

с аналогичными апертурами-формирователями, т.е. пучок коллимировался согласно оптимальной конфигурации на детектор без изгиба, с прямой видимостью замедлителя. Результаты расчетов представлены на рис. 5. Поток на образце в данном случае определяется только геометрическими факторами и не зависит от температуры замедлителя, т.е. интегральный поток сохраняется в различных режимах. Из-за обрезания тепловой части спектра в тепловом режиме конфигурация на основе устройства отклонения пучка практически в пять раз проигрывает по интегральному потоку установке с прямой видимостью. В холодном режиме, наоборот, имеет место двукратный выигрыш. Как следствие, эффективность конфигурации с отклоненным пучком существенно выше, особенно в длинноволновой области, которая определяет разрешение прибора. В дополнение, существенно уменьшается фон от быстрых нейтронов, что также улучшает чувствительность прибора к длинноволновой области спектра. На рис. 5б приведены расчетные усредненные профили нейтронного пучка на детекторе, расположенном на расстоянии 10 м от образца, для установки с прямой видимостью замедлителя. Можно видеть, что диаметр прямого пучка на детекторе составляет 5 см.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты численных расчетов показывают, что предложенная модельная конфигурация дифрактометра малоуглового рассеяния нейтронов в экспериментальном зале реактора ИБР-2 на основе короткого многощелевого устройства отклонения пучка является оптимальной в существующих условиях ограничения на габариты установки. Она наиболее эффективно использует возможности холодного режима замедлителя (30 К), что позволяет получать кривые рассеяния с достаточно высоким разрешением по вектору рассеяния ( $q_{\text{min}}$  до  $0.02 \text{ нм}^{-1}$ ). В случае теплового режима замедлителя (300 К) полученные расчетные и экспериментальные оценки потоков позволяют говорить о возможности проведения ограниченного круга

экспериментов для данной конфигурации, как правило, только с сильно рассеивающими системами.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С.А. Маношина (НЭО КС ЛНФ ОИЯИ) за консультации по расчетам с использованием программного обеспечения Vites.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuklin A.I., Islamov A.Kh., Gordeliy V.I.* // Neutron News. 2005. V. 16. № 3. P. 16.
2. *Ostanevich Yu.M.* // J. Macromol. Chem. 1988. V. 15. P. 91.
3. *Kulikov S., Shabalin E.* // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 351. № 1. P. 012023.
4. *Ananiev V.V., Belyakov A., Bulavin M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 320. P. 70.
5. *Ананьев В.Д., Беляков А.А., Булавин М.В. и др.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 2. С. 131.
6. *Belyakov A., Bulavin M., Chernikov A. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. № 6. P. 773.
7. *Кожевников С.В., Жакетов В.Д., Петренко А.В. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 1. С. 5.
8. *Walther K., Frischbutter A., Scheffzük Ch. et al.* // Solid State Phenom. 2005. V. 105. P. 67.
9. *Natkaniec I., Chudoba D., Hetmańczyk Ł. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 554. P. 012002.
10. *Аксенов В.Л., Никитенко Ю.В.* // Кристаллография. 2007. Т. 52. № 3. С. 564.
11. *Авдеев М.В., Боднарчук В.И., Петренко В.И. и др.* // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 6. С. 1014.
12. *Zsigmond G., Manoshin S., Lieutenant K. et al.* // Physica B. 2007. V. 397. P. 115.
13. *Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В. и др.* // ФТТ. 2010. Т. 52. № 5. С. 961.
14. *Белушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В. и др.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 1. С. 121.

## Concept of Small-Angle Diffractometer in Classical Configuration at the Cryogenic Moderator of IBR-2 Reactor

**M. V. Avdeev, R. A. Eremin, V. I. Bodnarchuk, I. V. Gapon, V. I. Petrenko, R. V. Erhan, A. V. Churakov, D. P. Kozlenko**

On the basis of numerical calculations, the feasibility of the implementation of a time-of-flight small-angle diffractometer at the IBR-2 reactor optimized for a neutron moderator operating in cold (temperature 30 K) and thermal (temperature 300 K) modes has been studied. In the cold mode, the maximum of neutron energy spectrum of the beam is shifted to the low energy region (large wavelengths), which extends the sensitivity range of the facility with respect to the sizes of the objects under study (1–100 nm and higher). A classical scheme for the separation of thermal/cold neutrons ( $E \sim 10^{-3} - 10^{-2}$  eV) from the background (formed mainly by fast neutrons) based on curved neutron optical devices has been considered. Due to size constraints imposed by the channel geometry, a configuration with a short multi-slot beam bending device (bender) is preferable. Modeling and optimization of the proposed small-angle facility have been carried out taking into account the real geometry of the channel and the available space in the experimental reactor hall. A comparison has been made with the facility based on the curved neutron guide and the facility with direct view of the moderator.

**Keywords:** small-angle neutron scattering diffractometer, small-angle neutron scattering, Vites software package.