

УДК 539.135.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА НЕЙТРОННОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ – МАЛОУГЛОВОМ СПЕКТРОМЕТРЕ “ГОРИЗОНТ” НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ИН-06

© 2021 г. В. С. Литвин<sup>а, \*</sup>, Д. А. Бучный<sup>а, с</sup>, В. А. Ульянов<sup>б</sup>,  
В. Г. Сыромятников<sup>б</sup>, А. П. Булкин<sup>б</sup>, А. А. Столяров<sup>а</sup>, Д. Н. Трунов<sup>а</sup>,  
С. Н. Аксенов<sup>а</sup>, С. И. Поташев<sup>а</sup>, Р. А. Садыков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерных исследований РАН,  
Москва, 117312 Россия

<sup>б</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова  
НИЦ “Курчатовский Институт”, Гатчина, 188300 Россия

<sup>с</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
Москва, 115409 Россия

\*e-mail: vlitvin@inr.ru

Поступила в редакцию 30.10.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 18.12.2020 г.

Приводятся результаты моделирования методом Монте-Карло и тестовых рефлектометрических экспериментов на нейтронном рефлектометре “Горизонт” (на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН) после дооборудования установки двухкоординатным детектором с системой позиционирования. Двухкоординатный детектор позволит использовать установку не только для рефлектометрии, но и для малоуглового рассеяния. С помощью Монте-Карло-моделирования получены оценки разрешающей способности установки и спектры пучка нейтронов на образце при различной коллимации. Проведены тестовые эксперименты по рефлектометрии на зеркалах с известными характеристиками. Характеристики совпадают с данными производителя в пределах погрешности 5%, полученной из моделирования.

**Ключевые слова:** времяпролетный нейтронный рефлектометр, нейтронная рефлектометрия, Монте-Карло-моделирование, импульсный источник нейтронов.

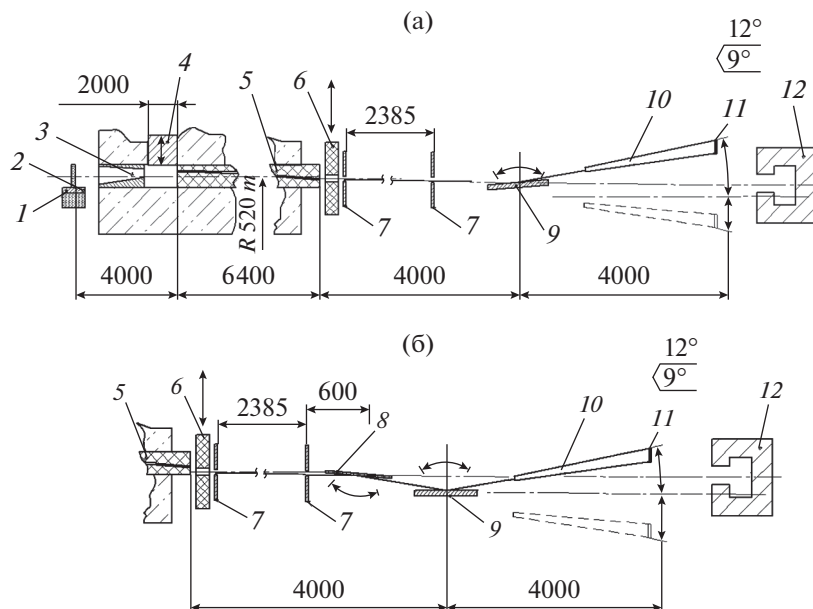
**DOI:** 10.31857/S1028096021070116

### ВВЕДЕНИЕ

Метод нейтронной рефлектометрии предназначен для исследований двумерных нанобъектов – пленок и планарных границ раздела. Современные применения этого метода охватывают самые разнообразные системы, такие как тонкие пленки (полупроводниковые, металлические, полимерные, в том числе многослойные пленки) и слоистые гетероструктуры [1–3], электрохимические границы раздела [4, 5], биологические мембраны [6], адсорбционные слои наночастиц из жидких сред [7–9]. Нейтронная рефлектометрия позволяет получить распределение плотности длины когерентного рассеяния и намагниченности вдоль нормали к поверхности образца. Данный метод также находит применение при анализе шероховатости поверхностей и границ раздела, процессов диффузии, сорбции, окисления. Плос-

кость рассеяния нейтронного пучка может быть, как горизонтальной [10], так и вертикальной [11]. Вертикальная геометрия позволяет исследовать жидкие образцы. Нейтронные рефлектометры можно разделить на две основные группы: работающие на монохроматическом излучении [12, 13] и с использованием времяпролетного метода [14–17].

Полезным инструментом при проектировании и оптимизации экспериментальных установок является моделирование на основе методов Монте-Карло. Программный пакет VITESS (Virtual Instrumentation Tool (for ESS)) предназначен для моделирования нейтронографических установок, работающих как на непрерывных, так и на импульсных источниках [18, 19]. Этот пакет представляет собой набор параллельно выполняемых модулей, каждый из которых симулирует один из



**Рис. 1.** Схема нейтронного рефлектометра "Горизонт" в конфигурации, используемой в работе (а) и предназначенной для рефлектометрии жидкостей (б): 1 – протонная мишень ИН-06; 2 – водяной замедлитель; 3 – коллиматор; 4 – шибер; 5 – зеркальный канал нейтроновода; 6 – легкий шибер; 7 – коллимирующие щели; 8 – отклоняющее суперзеркало; 9 – узел образца; 10 – консоль детектора; 11 – двухкоординатный ПЧД; 12 – ловушка прямого пучка.

основных компонентов установки, таких как коллиматор, нейтроновод, образец и так далее. В настоящей работе при моделировании использовалась версия VITESS 3.4 [20].

В ИЯИ РАН на базе сильноточного линейного ускорителя протонов сооружен комплекс нейтронографических установок [21]. В их число входит установка "Горизонт", которая может работать как в режимах нейтронного рефлектометра с вертикальной плоскостью рассеяния, так и малоуглового спектрометра. Все измерения осуществляются по времяпролетной методике.

## КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Импульсные источники нейтронов ИН-06 и РАДЭКС работают на базе линейного ускорителя протонов (а также ионов Н<sup>-</sup>) ИЯИ РАН. Источник ИН-06 состоит из вольфрамовой мишени, в которой в результате реакции испарения (spallation process) рождаются нейтроны, и двух лепестковых водяных замедлителей, расположенных над мишенью (толщина 5 см) и под мишенью (толщина 2 см). Установка "Горизонт" работает на нейтронах из верхнего замедлителя, обладающего более мягким спектром. В стандартном режиме работы ускорителя длительность протонного импульса составляет 50 мкс [22] и при необходимости может варьироваться в пределах 0.25–200 мкс [23]. Как показали измерения спектров на каналах установок "Геркулес", МНС и "Кристалл", максимум тепловой части спектра ней-

тронов, попадающих в канал, приходится на 1.3 Å [22]. Протонный ускоритель может работать с частотой повторения импульсов 1, 10, 25 или 50 Гц. При частоте 25 Гц можно проводить измерения на холодных нейтронах, вплоть до 10 Å.

Основными узлами установки (рис. 1) являются нейтроновод, коллимирующая щелевая система, отклоняющее суперзеркало, узел образца и позиционно-чувствительный детектор (ПЧД), установленный на консоли с вакуумируемой трубой. Нейтроновод имеет зеркальный канал длиной 7000 мм, изогнутый в вертикальной плоскости, с поперечным сечением 70 мм (ширина) × 10 мм (высота) и радиусом кривизны 520 м. Канал состоит из 14 плоских секций, расположенных под углом относительно друг друга. Верхняя и боковые стенки каждой секции представляют собой многослойные немагнитные структуры – суперзеркала NiMo/Ti с параметром  $m = 2$ , а нижняя стенка – Ni-зеркало с  $m = 1$  (здесь  $m$  – параметр, определяющий кратность превышения критического угла полного отражения нейтронов от данного суперзеркала по отношению к зеркалу с покрытием из природного никеля). Нейтроновод обеспечивает увеличение плотности потока тепловых и холодных нейтронов и минимизирует долю гамма-квантов и высокоэнергетических нейтронов в пучке, падающем на образец.

Система коллимирующих щелей контролирует форму, направление и расходимость попадающего на образец нейтронного пучка, формируя его по высоте в пределах 0–12 мм и по ширине в

пределах 0–70 мм с точностью позиционирования 0.005 мм. Отклоняющее суперзеркало необходимо при исследовании жидких образцов, когда нет возможности изменять угол падения пучка нейтронов, варьируя наклон самого образца. В установке используется многослойное суперзеркало NiMo/TiZr с показателем  $m = 2$ . Оно позволяет отклонять падающий на образец пучок, задавая угол его падения с точностью 5 угл. с в пределах  $\pm 5^\circ$ . Узел образца механизирован и дает возможность позиционировать образец в трех направлениях, а также наклонять его относительно оси пучка в двух плоскостях (параллельно и перпендикулярно плоскости рассеяния) в пределах  $\pm 5^\circ$  с точностью  $\pm 5$  угл. с.

Двухкоординатный ПЧД [24], заполненный газовой смесью на основе  $^3\text{He}$ , позволяет наблюдать малоугловое рассеяние при скользящих углах (GISANS) в рефлектометрической моде и анизотропию рассеяния в малоугловой моде. Детектор представляет собой многопроволочную пропорциональную камеру с чувствительной площадью  $200 \times 200$  мм<sup>2</sup>. Разрешение детектора по координате составляет 2.5 и 2 мм (по горизонтали и по вертикали соответственно), а по времени пролета для тепловых нейтронов ( $\lambda = 2$  Å) – 16 мкс. Эффективность регистрации нейтронов детектором составляет ~60% при  $\lambda = 2$  Å. Консоль, на которой установлен ПЧД, может поворачиваться в вертикальной плоскости относительно оси в плоскости образца, при этом угол обзора детектора изменяется в пределах от  $12^\circ$  сверху и  $9^\circ$  снизу относительно горизонтальной плоскости. Свободный конец может перемещаться в вертикальной плоскости (плоскости рассеяния) с помощью ходовых винтов, которые приводятся в действие шаговым двигателем через ременную передачу. На консоли расположена труба диаметром 400 мм с алюминиевыми окнами, заполняемая  $^4\text{He}$  для уменьшения рассеяния нейтронов на воздухе. Труба, заполненная  $^4\text{He}$  (под давлением, близким к атмосферному), имеет преимущество перед вакуумируемой в том, что позволяет использовать алюминиевые окна толщиной всего 0.5 мм. В то же время гелий рассеивает приблизительно в 20 раз меньше, чем воздух при тех же условиях.

Основные механизированные узлы установки приводятся в движение шаговыми двигателями, управляемыми программно при помощи контроллеров и компьютера. Связь контроллеров с компьютером осуществляется посредством интерфейса RS-485.

В рефлектометрической моде пучок нейтронов падает на плоскость образца, который может быть наклонен в плоскости рассеяния, что обеспечивает необходимый угол падения нейтронов (рис. 1а). При исследовании жидкостей, когда об-

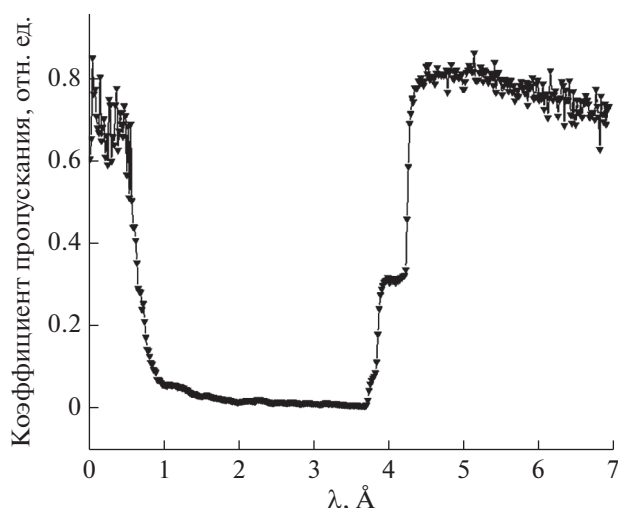


Рис. 2. Отношение спектров прошедшего через Ве-фильтр и исходного нейтронных пучков.

разец невозможно наклонять, необходимый угол падения нейтронов задается с помощью отклоняющего суперзеркала (рис. 1б). Пучок должен быть хорошо сколлимирован только в вертикальной плоскости, в горизонтальной плоскости его ширина может быть такой же, как и у образца. Рассеянные нейтроны регистрируют с помощью двухкоординатного детектора, который располагается симметрично относительно падающего на образец пучка.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Калибровка пролетной базы

Для нейтронографических экспериментов по времяпролетной методике важно точно знать длину пролетной базы, т.е. расстояние от замедлителя до детектора. Была проведена калибровка пролетной базы рефлектометра при помощи бериллиевых фильтров толщиной 5 см. На рис. 2 приведено отношение спектров прошедшего через фильтр и исходного нейтронного пучков. “Ступенька” на полученном спектре должна соответствовать превышению длины волны нейтрона над удвоенным межплоскостным расстоянием  $d_{100}$  бериллия. Относительная ширина этой “ступеньки” 2.7% может служить оценкой сверху погрешности по длине волны. Из полученных в ходе калибровочного эксперимента данных с точностью 3% было определено значение пролетной базы установки – 18.7 м.

### Моделирование

Спектр нейтронов с поверхности замедлителя, измеренный ранее [21], был заложен в модель установки как спектр источника. Из модельных спектров, приведенных на рис. 3, видно, что зер-

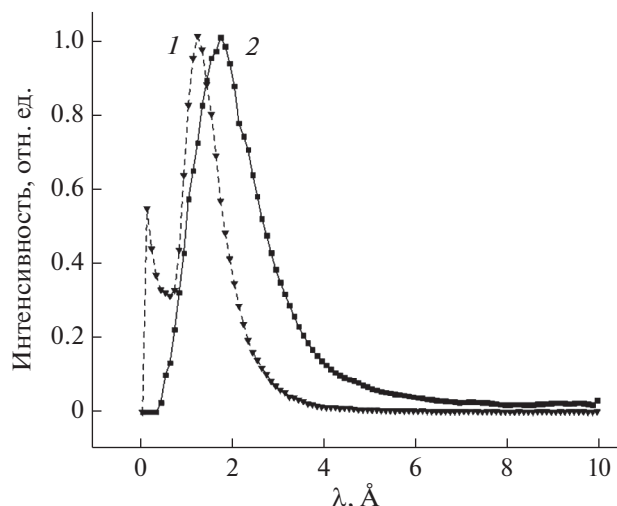


Рис. 3. Модельные спектры пучка на входе (1) и выходе (2) нейтронновода.

кальный изогнутый нейтронновод обеспечивает увеличение плотности потока тепловых и холодных нейтронов (с длиной волны более 2 Å) на образце и не пропускает нейтроны с длиной волны менее 1 Å.

В рефлектометрическом эксперименте необходим компромисс между расходимостью пучка и его интенсивностью. Было проведено моделирование потока нейтронов при различных конфигурациях коллимирующей системы установки с целью ее оптимизации. Было выбрано расстояние между щелями 2385 мм, так как оно является максимально возможным для данной установки. Относительная погрешность рефлектометра по переданному импульсу  $\Delta Q/Q$  определяется следующим соотношением [25]:

$$\Delta Q/Q = \{(\Delta T^2 + \tau_p^2 + \tau_{\text{mod}}^2)/T^2 + \Delta\theta^2/\theta^2\}^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\tau_p$  – длительность импульса протонного ускорителя,  $\tau_{\text{mod}}$  – время замедления и диффузии нейтронов в замедлителе,  $\Delta T$  – временное разрешение детектора, определяемое его толщиной и квантом времени время-цифрового преобразователя,  $T$  – время пролета нейтрона,  $\Delta\theta$  – расходимость нейтронного пучка в плоскости отражения,  $\theta$  – угол падения нейтронного пучка на исследуемый образец. Разрешающую способность установки по времени пролета можно считать равной 2% [26]. На рис. 4 приведена зависимость расходимости пучка нейтронов от ширины коллимирующих щелей, определенная по профилю модельного пучка.

Расходимость нейтронного пучка на выходе из нейтронновода, как и критический угол суперзеркал, образующих нейтронновод, являются функцией длины волны. Коллимация подобного пучка нейтронов неминуемо приводит к изменению его

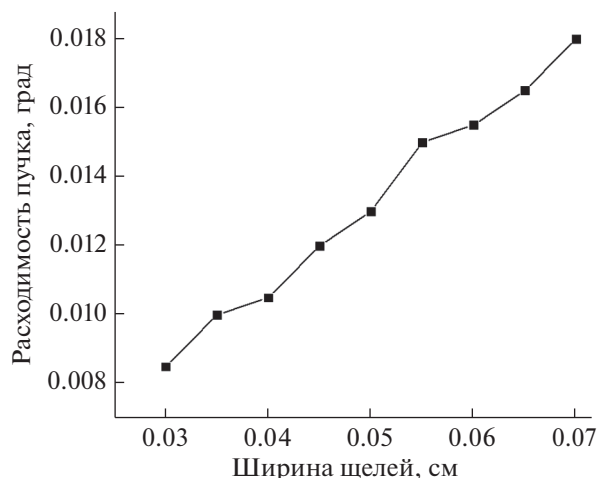


Рис. 4. Зависимость расходимости нейтронного пучка от ширины коллимирующих щелей.

спектра, что нужно учитывать при планировании эксперимента. В ходе моделирования были получены спектры падающего на образец нейтронного пучка в зависимости от ширины коллимирующих щелей (рис. 5). Также измерены спектры в зависимости от высоты щелей относительно оси последней секции нейтронновода (рис. 6).

На основе полученных результатов было решено провести модельный эксперимент и измерения при ширине коллимирующих щелей 0.45 мм и их положении на высоте 3.7 мм относительно выхода из нейтронновода. Согласно графику, на рис. 4, расходимость пучка в данной конфигурации составляет  $0.012^\circ$ , и в соответствии с (1), разрешающая способность установки – 5%. При

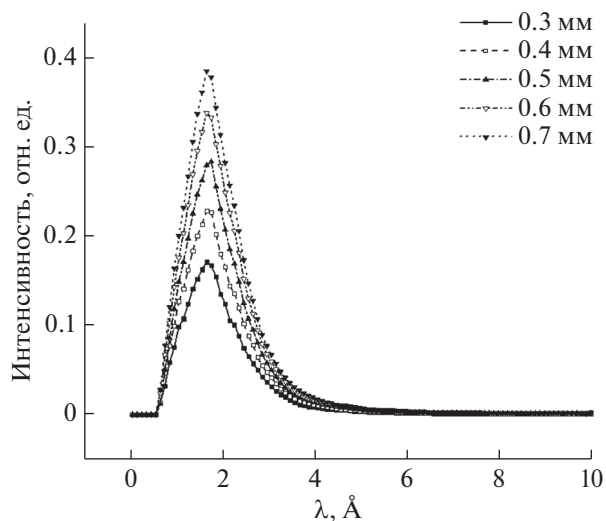
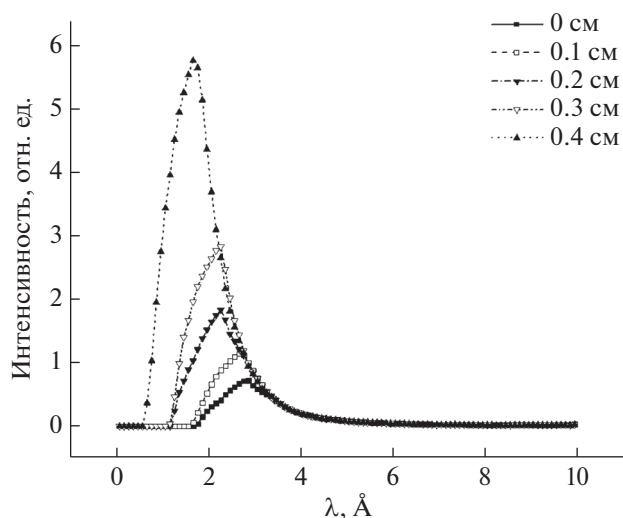
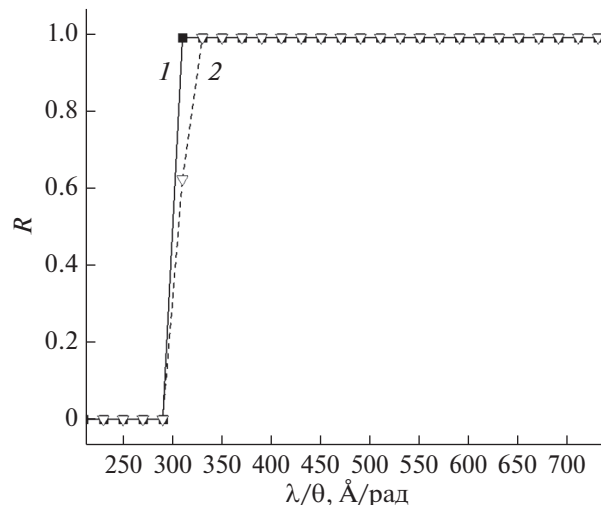


Рис. 5. Модельные спектры нейтронов при различной ширине коллимирующих щелей.



**Рис. 6.** Модельные спектры нейтронов при разной высоте коллимирующих щелей относительно оси последней секции нейтронвода.



**Рис. 7.** Сравнение функции показателя отражения нейтронов  $R$ , полученной в ходе модельного эксперимента (треугольники), с изначально заданной в модели (квадраты).

этом пучок, падающий на образец, имеет размеры  $128.9 \times 0.7$  мм.

Также для оценки разрешающей способности установки был проведен модельный рефлектометрический эксперимент с суперзеркалом с  $m = 2$ , коэффициент отражения которого задается приближенной функцией:

$$R(Q) = R_0 \{1 - \text{th}((Q - mQ_c)/(0.0022 - 0.0002m))\} / 2, \quad (2)$$

где  $R_0 = 0.99$  – предельное значение показателя отражения,  $Q$  – переданный импульс нейтрона,  $Q_c$  – критический переданный импульс для природного Ni,  $m$  – коэффициент суперзеркала. Это упрощенная функция, она получена из эмпирической функции отражения суперзеркал, которая используется в программном пакете VITESS [27].

Кривая отражения, полученная в результате этого модельного эксперимента, приведена на рис. 7; критический переданный импульс зеркала, установленного под углом 5.04 мрад к направлению пучка, совпадает с теоретическим с точностью 3.2%. Также из полученных спектров можно оценить интенсивность нейтронов на образце. В модели была задана плотность потока нейтронов с поверхности замедлителя  $10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  – максимальная плотность, которая может быть достигнута при проектной мощности линейного ускорителя протонов [28]. Полученная в модели интенсивность нейтронов, падающих на образец (в плоскости, перпендикулярной оси пучка), составляет  $2.5 \times 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

С помощью Монте-Карло-моделирования были получены также возможные рефлектометрические кривые при различных частотах повторения

импульсов источника. В качестве образца была выбрана поверхность тяжелой воды. Полученные времяпролетные спектры отраженных нейтронов приведены на рис. 8. Из данных спектров следует, что при частоте 50 Гц неизбежны наложения на импульс холодных нейтронов от предыдущего импульса, а при частоте 25 Гц таких наложений нет. Избежать данного эффекта можно следующими способами: установить частоту работы источника 25 Гц; использовать отклоняющее зеркало – нежелательные длинноволновые нейтроны отразятся, а тепловые пройдут сквозь зеркало; установить прерыватель (чоппер), производящий импульсы с частотой 25 Гц. Последний способ предпочтительней, поскольку позволит другим установкам на источнике ИН-06 работать при частоте 50 и 100 Гц, повышая тем самым скорость измерений.

### Тестовые измерения

С целью тестирования установки был проведен рефлектометрический эксперимент на образце NiMo/Ti – нейтронном суперзеркале с известными характеристиками. Ранее характеристики этого суперзеркала были измерены (рис. 9) на нейтронном рефлектометре НР-4М [29] на реакторе ВВР-М в ПИЯФ НИЦ КИ (Гатчина). Были измерены времяпролетные спектры исходного (“пустого”) и отраженного от образца нейтронных пучков, по которым после нормировки на соответствующую интегральную загрузку от монитора (установленного перед образцом) был определен коэффициент отражения (рис. 10). Скачок  $R$  при малых  $\lambda/\theta$  связан с высоким фоном в коротковолновой части спектра. Из сравнения кривых,



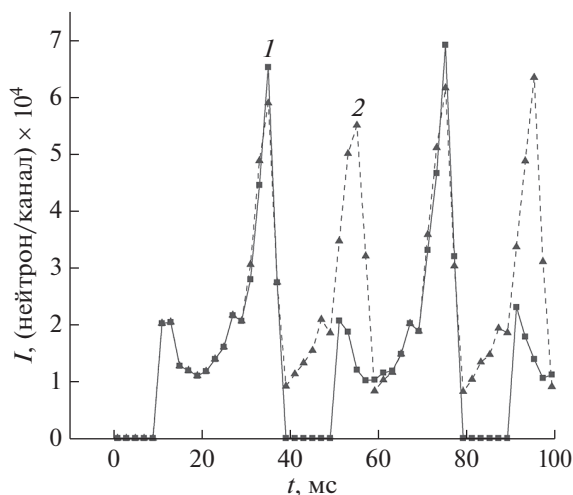


Рис. 8. Вре́мяпролетный спектр отраженных от поверхности тяжелой воды нейтронов, полученный методом Монте-Карло для частот: 25 (1); 50 Гц (2).

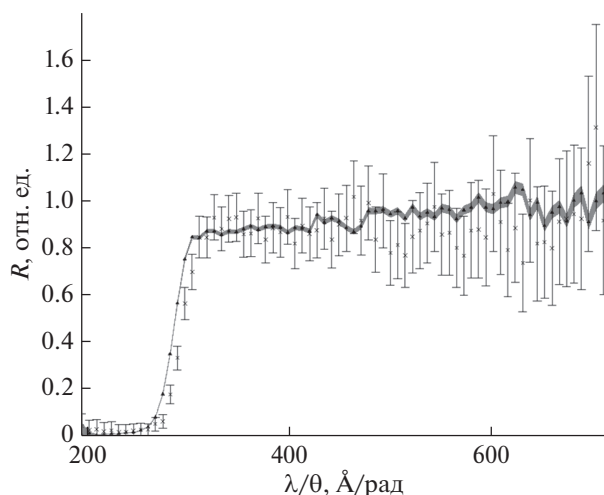


Рис. 9. Относительный коэффициент отражения нейтронов  $R$  от суперзеркала NiMo/Ti ( $m = 2$ ) как функция  $\lambda/\theta$ , измеренный на рефлектометрах “Горизонт” ИЯИ РАН (крестики) и НР-4М ПИЯФ (треугольники).

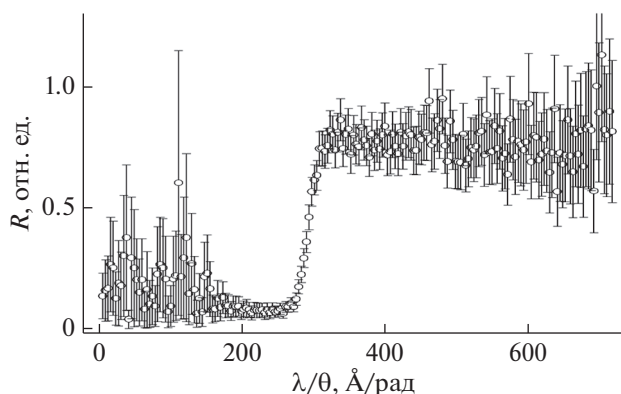


Рис. 10. Относительный коэффициент отражения нейтронов  $R$  от суперзеркала NiMo/Ti ( $m = 2$ ) как функция  $\lambda/\theta$ , измеренный на рефлектометре “Горизонт” ИЯИ РАН.

полученных на рефлектометрах НР-4М и “Горизонт” (рис. 9), видно, что значения критической длины волны нейтронов, отнесенной к углу падения, совпадают с точностью 5%, что соответствует оценкам разрешения, полученным в ходе моделирования с помощью VITESS. В настоящей работе приводится относительная зависимость  $R(\lambda/\theta)$ . В дальнейшем на установке “Горизонт” планируется проводить также измерения абсолютного значения  $R$ . Для этого необходимо точно выставлять образец, чтобы пучок полностью падал на его поверхность, а также проводить калибровку ПЧД для исключения пространственной неоднородности эффективности регистрации нейтронов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейтронный рефлектометр “Горизонт” на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН был дооборудован двухкоординатным детектором с системой позиционирования, что позволит использовать установку не только для рефлектометрии, но и для малоуглового рассеяния.

С помощью моделирования методом Монте-Карло была получена зависимость расходимости и спектров нейтронного пучка от геометрических параметров коллимирующей системы рефлектометра и выработаны рекомендации для обеспечения оптимального режима измерений. Были проведены испытания установки, получены экспериментальные спектры нейтронов. На основании данных Монте-Карло-моделирования и тестового эксперимента была получена оценка разрешения по переданному импульсу в режиме рефлектометра, составляющая 5% при высоте щелей 0.45 мм и расстоянии между ними 2385 мм. Ожидаемая интенсивность нейтронов на образце в режиме рефлектометра может достигать  $2.5 \times 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Были проведены тестовые измерения на образце суперзеркала с известными характеристиками. Полученные на установке “Горизонт” значения критических переданных импульсов согласуются с точностью 5% с данными, полученными на рефлектометре НР-4М ПИЯФ. Работа выполнена на УНУ “Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matveev V.A., Pleshanov N.K., Bulkin A.P., Syromyatnikov V.G. // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 340. P. 012086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/340/1/012086>
2. Никитенко Ю.В., Сыромятников В.Г. Рефлектометрия поляризованных нейтронов. М.: Физматлит, 2013. 224 с.
3. Жакетов В.Д., Петренко А.В., Вдовичев С.Н. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 6. С. 20. <https://doi.org/10.1134/S0207352819060155>

4. Avdeev M.V., Rulev A.A., Bodnarchuk V.I. et al. // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 424. P. 378. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.290>
5. Avdeev M.V., Rulev A.A., Ushakova E.E. et al. // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 486. P. 287. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.241>
6. Belicka M., Gerelli Yu., Kucerka N., Fragneto G. // Soft Matter. 2015. V. 11. P. 6275. <https://doi.org/10.1039/C5SM00274E>
7. Гапон И.В., Петренко В.И., Авдеев М.В., Булавин Л.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 4. С. 8.
8. Kubovcikova M., Gapon I.V., Zavisova V. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 427. P. 67. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.104>
9. Nagornyi A.V., Petrenko V.I., Rajnak M. et al. // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 473. P. 912. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.197>
10. Choi D., Lee J., Phan M.D. et al. // Physica B. 2018. V. 551. P. 236. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.08.040>
11. Mattauch S., Ioffe A., Lott D., Menelle A., Ott F., Medic Z. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 711. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/711/1/012009>
12. Devishvili A., Zhernenkov K., Dennison A.J.C. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 025112. <https://doi.org/10.1063/1.4790717>
13. Botyán L., Merkel D.G., Nagy B. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 015112. <https://doi.org/10.1063/1.4770129>
14. Avdeev M.V., Bondarchuk V.I., Lauter-Pasyuk V.V. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 251. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/251/1/012060>
15. Mattauch S., Koutsioubas A., Rucker U. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2018. V. 51. P. 646. <https://doi.org/10.1107/S1600576718006994>
16. Булавин Л.А., Петренко В.И., Авдеев М.В., Ульянов В.А. // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 6. С. 1014. <https://doi.org/10.7868/S0023476117060029>
17. Nikitenko Y.V., Petrenko A.V., Gundorin N.A. et al. // Crystallogr. Rep. 2015. V. 60. P. 466. <https://doi.org/10.1134/S1063774515030104>
18. Wechsler D., Zsigmond G., Streffer F., Mezei F. // Neutron News. 2000. V. 11. № 4. P. 25. <https://doi.org/10.1080/10448630008233764>
19. Wechsler D., Zsigmond G., Streffer F., Mezei F. // Neutron News. 2000. V. 11. № 4. P. 25. <https://doi.org/10.1080/10448630008233764>
20. Zandler C., Lieutenant K., Nekrassov D., Fromme M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 528. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/528/1/012036>
21. Алексеев А.А., Садыков Р.А., Клементьев Е.С., Литвин В.С. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.7868/S0207352814120026>
22. Litvin V.S., Trounov V.A., Ulyanov V.A., Boukine A.P. // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 340. P. 012032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/340/1/012032>
23. Рябов Ю.В., Грачев М.И., Каманин Д.В. и др. // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 5. С. 957.
24. Балушкин А.В., Богдзель А.А., Журавлев В.В., Кутузов С.А. // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 5. С. 961.
25. Литвин В.С., Трунов В.А., Булкин А.П., Ульянов В.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 11. С. 3.
26. Кузнецов С.П., Мешков И.В., Садыков Р.А., Литвин В.С. // Краткие сообщения по физике. 2013. № 9. С. 3.
27. VITeSS Tool Generate Mirror Files. Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, 2013. [https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/grossgeraete/mi\\_neutronen/vitess/vitess3-3a.7z](https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/grossgeraete/mi_neutronen/vitess/vitess3-3a.7z)
28. Сидоркин С.Ф., Контелов Э.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 6. С. 97. <https://doi.org/10.7868/S0207352813060176>
29. Syromyatnikov V.G., Pleshanov N.K., Pushenkov V.M. Four-Modes Neutron Reflectometer NR-4M. Preprint 2619. Gatchina: PNPI RAS, 2005. 47 p.

## Simulation and Test Measurements on the Neutron Reflectometer and Small-Angle Instrument “Gorizont” on the IN-06 Pulsed Source

V. S. Litvin<sup>1,\*</sup>, D. A. Buchnyi<sup>1,3</sup>, V. A. Ulianov<sup>2</sup>, V. G. Syromyatnikov<sup>2</sup>, A. P. Boulkin<sup>2</sup>, A. A. Stolyarov<sup>1</sup>, D. N. Trunov<sup>1</sup>, S. N. Axenov<sup>1</sup>, S. I. Potashev<sup>1</sup>, R. A. Sadykov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, 117312 Russia

<sup>2</sup>Peterburg Institute for Nuclear Physics NRC Kurchatov Institute, Gatchina, 188300 Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: vlitvin@inr.ru

The results of Monte Carlo simulation and test reflectometry experiments on the “Gorizont” neutron reflectometer (on the IN-06 pulsed neutron source at INR RAS) after its upgrade with a two-dimensional detector with a positioning system are presented. The two-dimensional detector makes it possible to use the instrument not only for neutron reflectometry, but also for small angle neutron scattering. Estimates of the instrument resolution and the spectra of the neutron beam at different collimations have been obtained using Monte Carlo simulation. Test reflectometry experiments have been performed on mirrors with known characteristics. The characteristics match the manufacturer’s data with an error of 5%, obtained from the simulation.

**Keywords:** time-of-flight neutron reflectometry, neutron reflectometer, Monte Carlo simulation, pulsed neutron source.