

# О ВЛИЯНИИ ФОНА ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВОК НА ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКАХ С МОДУЛЯЦИЕЙ РЕАКТИВНОСТИ

*В. И. Боднарчук, В. В. Садилов<sup>1</sup>,*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В данной работе посредством виртуальных экспериментов показано, что для рефлектометра, оснащенного стандартным для ИБР-2 дисковым прерывателем фона, минимальный измеряемый коэффициент отражения достигает  $10^{-8}$ . Это полностью опровергает предположения о критическом влиянии фона запаздывающих нейтронов на результаты экспериментов на импульсных нейтронных источниках с модуляцией реактивности. Реальным источником наблюдаемого на ИБР-2 фона на уровне  $10^{-4}$  может являться только внешний нейтронный фон, образованный нейтронами из собственного пучка, не попадающими на образец, и нейтронами от других пучков на реакторе вследствие недостаточной защиты детектора.

In this work, by means of virtual experiments, it is shown that for a reflectometer equipped with a disk background chopper, standard for the IBR-2, the minimum measurable reflectivity coefficient reaches  $10^{-8}$ . This completely refutes the assumptions about the critical influence of the delayed neutron background on the results of experiments on pulsed neutron sources with reactivity modulation. The real source of the background observed at the IBR-2 at a level of  $10^{-4}$  can only be the external neutron background formed by neutrons from the intrinsic beam that do not hit the sample and neutrons from other beams at the reactor due to insufficient protection of the detector.

PACS: 28.20.Cz; 25.85.-w; 25.40.Dn; 29.25.Dz; 03.75.Be; 07.05.Tr

## ВВЕДЕНИЕ

ИБР-2 — импульсный исследовательский реактор на быстрых нейтронах, работающий в ЛНФ ОИЯИ в г. Дубне (Россия), в котором импульсная структура нейтронного пучка достигается посредством модуляции критичности реактора с помощью подвижных отражателей, так что формируются импульсы мощности реактора с периодом 200 мс и длительностью (FWHM) около 0,3 мс. Однако между импульсами мощности поток нейтронов не падает до нуля, а сохраняется на уровне около 10 %

---

<sup>1</sup>E-mail: sadilov@jinr.ru

от средней мощности реактора. Это является следствием непрерывного излучения запаздывающих нейтронов из активной зоны реактора в процессе деления ядер топлива, в данном случае  $^{239}\text{Pu}$ . С этой точки зрения можно сказать, что импульсный реактор представляет собой мощный импульсный источник нейтронов, совмещенный с относительно слабым стационарным реактором.

Возникающий между нейтронными импульсами нейтронный фон распространяется по тем же нейтронно-оптическим каналам, по которым распространяются нейтроны от основных импульсов реактора: величина этого фона составляет примерно  $10^{-4}$  от нейтронного потока в импульсе мощности реактора (см. разд. 2). Время испускания запаздывающих нейтронов (с задержкой от нескольких секунд до нескольких минут [1]) не коррелировано с основными импульсами реактора, которые являются стартовыми импульсами для метода времяпролетных (ВП) измерений длины волны нейтронов, использующегося во всех установках нейтронного рассеяния на реакторе ИБР-2. Таким образом, запаздывающие нейтроны в принципе могут вносить существенные искажения в определение длины волны нейтронов ВП-методом. Более того, отношение сигнал/фон на экспериментальных установках на реакторе ИБР-2 также составляет величину порядка  $10^{-4}$ , что часто приводит к заключению, что причиной этого служит именно фон запаздывающих нейтронов, и это является принципиальным недостатком импульсных нейтронных источников с модуляцией реактивности такого типа.

Необходимость понимания вклада запаздывающих нейтронов в фоновые условия на установках нейтронного рассеяния стала особенно актуальной в связи с предложением о создании в ОИЯИ нового, более мощного источника нейтронов с модуляцией реактивности ИБР-3 (т. е. типа ИБР-2) — НЕПТУН.

Данная статья посвящена анализу проблемы фона на примере нейтронного рефлектометра, установленного на пучке реактора ИБР-2.

С помощью виртуальных экспериментов мы смоделировали работу нейтронного рефлектометра на источнике, имеющем такие же параметры, как реактор ИБР-2.

Результаты демонстрируют незначительность вклада запаздывающих нейтронов, что позволяет получить надежные измерения коэффициентов отражения вплоть до  $10^{-8}$  или даже ниже в экспериментах как с высоким, так и с низким разрешением по переданному импульсу (при использовании стандартного для ИБР-2 прерывателя фона). Таким образом, доказана необоснованность соображения о принципиальном ограничении экспериментальных возможностей на импульсных нейтронных источниках с модуляцией реактивности.

## 1. ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА НЕЙТРОННЫХ ПУЧКОВ РЕАКТОРА ИБР-2

Импульсный режим работы реактора ИБР-2 достигается за счет механического модулятора реактивности, состоящего из двух подвижных отражателей: основного и дополнительного (рис. 1). Основной отражатель вращается с частотой 5 Гц, в то время как частота вращения дополнительного отражателя составляет 10 Гц. В результате реактор переводится в надкритическое состояние в момент совмещения обоих подвижных отражателей и создается нейтронный импульс длительностью около  $\tau = 0,3$  мс (FWHM) с периодичностью  $T = 200$  мс.

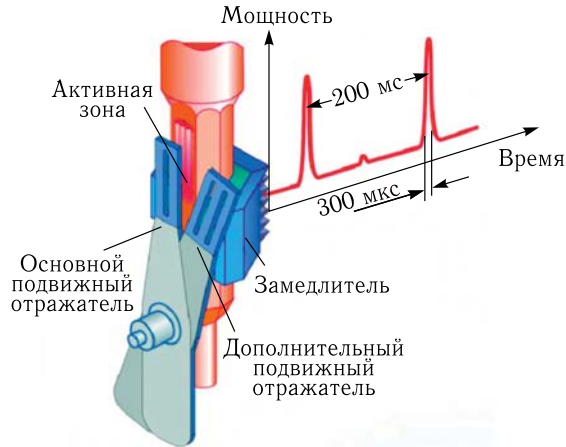


Рис. 1. Схема работы импульсного реактора ИБР-2. Периодический характер мощности достигается за счет использования двух подвижных отражателей. Изображение взято из работы [2]

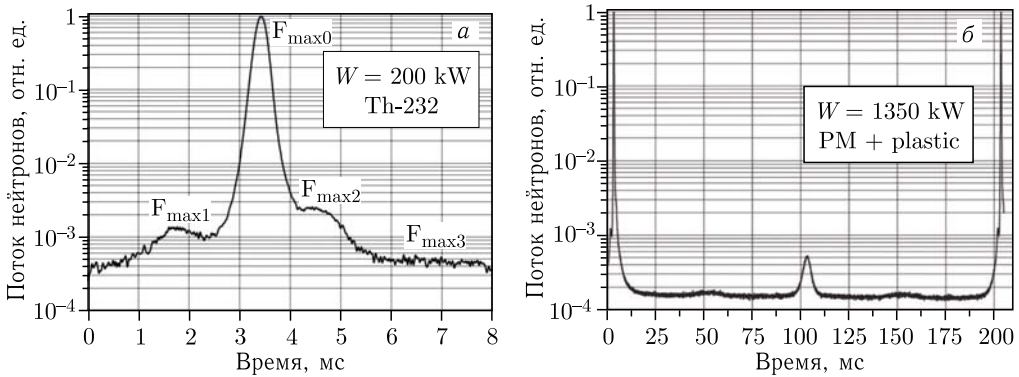


Рис. 2. Экспериментально измеренная временная структура мощности реактора ИБР-2. а) Форма импульса мощности. Данные нормированы на максимум импульса. б) Временная структура мощности в течение одного периода повторения реактора. Измерения выполнены с помощью камеры деления с  $^{232}\text{Th}$ . Данные взяты из работы [3]

Посередине между двумя последовательными основными импульсами мощности присутствует слабый импульс, вызванный проходом дополнительного отражателя возле активной зоны без наложения основного подвижного отражателя. При более детальном рассмотрении также можно заметить достаточно сложную форму импульсов, которая обусловлена геометрией подвижных отражателей (рис. 2).

Наличие запаздывающих нейтронов приводит к возникновению квазипостоянного фона между нейтронными импульсами. Мощность  $P_{\text{фон}}$ , выделяемая реактором между импульсами, составляет  $r \approx 10\%$  от средней мощности реактора  $\bar{P}$ . Учитывая, что  $\bar{P} \approx (\tau/T)P_{\text{имп}}$ , получаем  $P_{\text{фон}}/P_{\text{имп}} = (\tau/T)r \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ . Поскольку нейтронный поток пропорционален мощности реактора, то можно заключить, что постоянный фон в нейтронном пучке составляет  $1,5 \cdot 10^{-4}$  от величины потока в максимуме основного нейтронного импульса. С точки зрения интенсивности он является лишь небольшой

добавкой — около 0,01 %, однако, будучи некоррелированным с основным (стартовым) импульсом, может вносить существенные искажения в определение длины волны нейтрона по методу ВП.

На импульсном реакторе ИБР-2 в настоящее время работают три рефлектометра (REMUR, REFLEX, GRAINS), на каждом из которых измерения проводятся по методу ВП, в результате чего измеряется зависимость коэффициента отражения  $R$  от переданного импульса  $q = 4\pi/\lambda \sin \theta$ . В методе ВП длина волны нейтронов  $\lambda$  определяется как

$$\lambda[\text{Å}] = \frac{3,956}{L[\text{м}]}(t - t_0)[\text{мс}], \quad (1)$$

где  $t_0$  — момент времени импульса реактора;  $t$  — время пролета нейтрона до детектора. Несмотря на довольно высокий поток нейтронов в импульсе реактора ( $\approx 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), значение коэффициента отражения  $R(q)$  ограничивается минимальной величиной  $R \approx 10^{-4}$  для всех рефлектометров, что совпадает с оценкой, полученной выше. Это обстоятельство уже долгое время является основанием для предположения, что один из факторов, накладывающих ограничение на минимальное значение  $R$ , связан именно с высоким уровнем фона запаздывающих нейтронов, который размывает зависимость  $R(q)$ . Действительно, так как время излучения запаздывающих нейтронов не коррелировано с временем  $t_0$  стартового импульса реактора, то, замедлившись, такие нейтроны будут попадать в детектор в случайные моменты времени, смешиваясь с нейтронами, которые образовались в основном импульсе. Таким образом, зависимость  $R(q)$ , измеряемая по методу ВП, будет искажена, что приводит к ограничению доступного динамического диапазона измерений. Оценить вклад от этого эффекта можно с помощью метода Монте-Карло путем моделирования работы нейтронного рефлектометра на источнике, имеющем такие же параметры, как реактор ИБР-2.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕФЛЕКТОМЕТРА С ДВУХКОМПОНЕНТНЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

Для изучения роли запаздывающих нейтронов в рефлектометрических измерениях на реакторе ИБР-2 была создана модель источника нейтронов, состоящая из двух независимых замедлителей: первый замедлитель — «импульсный» — излучает нейтроны во временном интервале  $\tau = 0,3$  мс, равном длительности основного нейтронного импульса реактора. Второй замедлитель излучает постоянный поток нейтронов, формируемый запаздывающими нейтронами, излучаемыми между импульсами реактора (см. рис. 2). Геометрически замедлители расположены один над другим, с излучающими поверхностями в форме круга. Оба круга расположены на одной вертикальной оси, проходящей через их диаметры (рис. 3). Радиус каждого из замедлителей выбран исходя из геометрии фонового прерывателя (ФП), расположенного на расстоянии 9 м от замедлителей, о чем будет сказано ниже. Для нормировки потоков нейтронов от этих замедлителей были использованы результаты измерений зависимостей потоков быстрых нейтронов реактора ИБР-2 от времени, приведенные в работе [3]. Поскольку время замедления быстрых нейтронов в веществе замедлителя очень мало, порядка

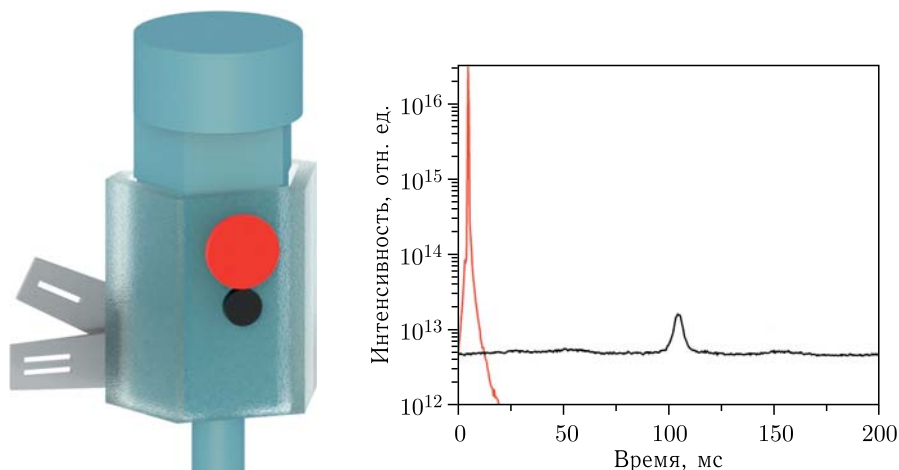


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Модель источника нейтронов, используемая в программном пакете VITESS [4]. Верхний (красный) замедлитель — «импульсный» — излучает только нейтроны из основного импульса мощности реактора ИБР-2. Нижний (черный) замедлитель — постоянный — излучает нейтроны между основными импульсами мощности

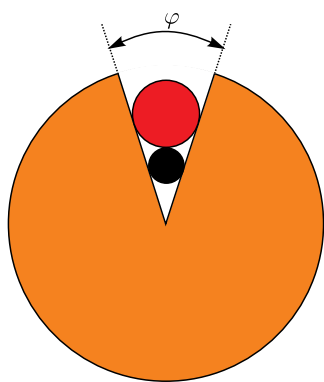


Рис. 4. Проекция сечений замедлителей на окно ФП. Выбранная геометрия окна ФП и размеров замедлителей обеспечивают одинаковое время открытого состояния для нейтронов от обоих замедлителей

10 мкс [1], временная структура потока тепловых нейтронов после замедлителя совпадает с измеренной временной структурой потока быстрых нейтронов до их попадания в замедлитель.

Для исключения из рассмотрения влияния углового разрешения расходимость пучка нейтронов, вылетающих из источника, задавалась нулевой. Характерная величина угловой коллимации пучка для нейтронных рефлектометров составляет несколько угловых минут, в связи с чем различие в пролетной базе для траекторий нейтронов, распространяющихся в пределах угловой расходимости, пренебрежимо мало. Поэтому в рассматриваемой модели нулевая расходимость не оказывает никакого влияния на ВП-разрешение.

Другой существенной частью модели являлось использование ФП (рис. 4), которые применяются практически на всех установках реактора ИБР-2 и определяют спектральный интервал. ФП существенно ограничивают возможность попадания нейтронов из фоновой подложки в детектор, но не позволяют избавиться от нее полностью. В нашей модели был выбран дисковый прерыватель из материала с идеальной поглощающей способностью, окно которого представляет собой сектор с углом раствора  $\varphi = 36^\circ$ . Радиусы замедлителей выбраны исходя из условия, при котором нарастание видимости площади каждого из замедлителей со стороны образца при открытии окна ФП происходит одинаковым образом для обоих замедлителей (см. рис. 3). При такой гео-

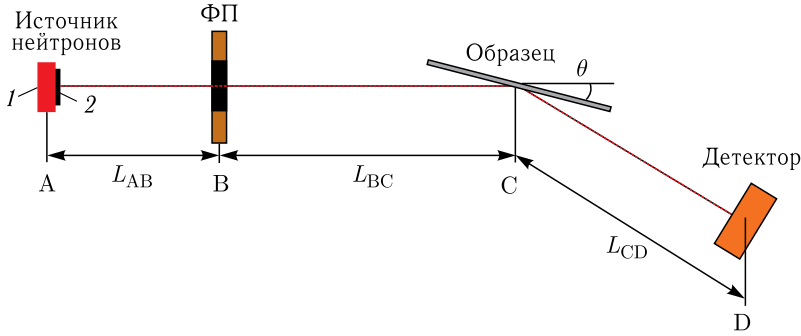
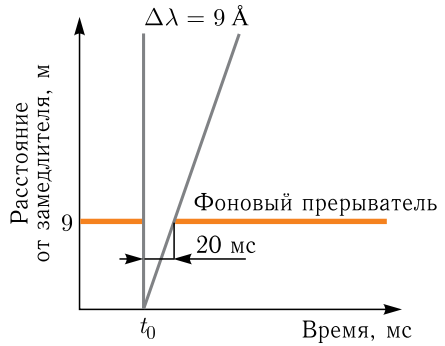


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Схема модели рефлектометра: красный прямоугольник (1) — «импульсный» источник с частотой 5 Гц; черный (2) — источник, имитирующий непрерывное испускание запаздывающих нейтронов

Рис. 6. ВП-диаграмма, демонстрирующая принцип работы ФП-пучка. Параметры ФП, применяемого в модели, позволяют получить нейтронный пучок со спектральной шириной 9 Å



метрии время открытого состояния ФП для всех замедлителей будет одинаковым. ФП установлен на расстоянии  $L_{AB} = 9$  м от замедлителя (рис. 5). Частота вращения ФП  $\nu$  соответствует частоте повторения источника — 5 Гц. Параметры  $\varphi$ ,  $L_{AB}$  и  $\nu$  определяют спектральный интервал  $\Delta\lambda$  как

$$\Delta\lambda \sim \frac{3956\varphi}{2\pi\nu L_{AB}}. \quad (2)$$

Тогда с учетом значений параметров спектральный интервал пропускаемого сквозь ФП пучка имеет  $\Delta\lambda = 9$  Å (рис. 6). В качестве отражающего образца, устанавливаемого под разными углами скольжения  $\theta$  к падающему пучку нейтронов, была использована пленка из золота толщиной 500 Å на кремниевой подложке. Размер образца выбирался достаточный для того, чтобы перекрывать весь падающий на него пучок нейтронов.

### 3. ВИРТУАЛЬНЫЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первый модельный эксперимент состоял в изучении эффективности работы ФП-пучка. С этой целью было проведено моделирование рефлектометрического эксперимента. В качестве образца была использована тонкая пленка золота (500 Å),

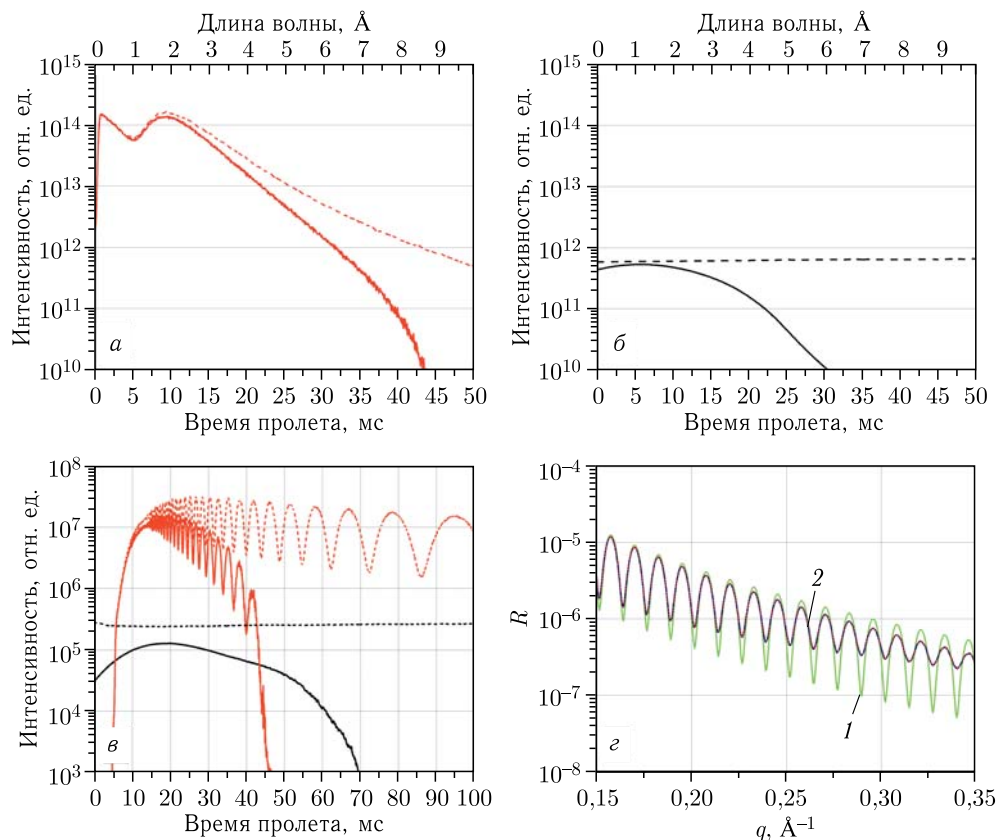


Рис. 7 (цветной в электронной версии). а–в) Регистрируемые времяпролетные спектры для различных случаев. Сплошные линии соответствуют модели, в которой используется ФП, пунктирные — в его отсутствии. а) Спектр падающего на образец пучка, генерируемого импульсным замедлителем; б) спектр падающего на образец пучка, генерируемого постоянным замедлителем; в) спектры отраженных пучков. г) Зависимость коэффициента отражения  $R$  от пленки золота толщиной  $500 \text{ \AA}$  на кремниевой подложке от величины переданного импульса  $q$ . Зеленая сплошная линия (1) — идеальный коэффициент отражения для данного образца; синяя сплошная линия (2) — коэффициент отражения, соответствующий суммарной интенсивности от обоих источников с использованием ФП; красные точки — коэффициент отражения, полученный только нейтронами, излученными импульсным замедлителем с использованием ФП

нанесенная на кремниевую подложку, размером, достаточным, чтобы перекрыть пучки нейтронов от обоих замедлителей. На рис. 7 приведены результаты моделирования эксперимента. Рис. 7, а и б демонстрируют ВП-зависимости интенсивности падающих пучков для импульсного и фонового замедлителей соответственно. Сплошные линии соответствуют случаю с использованием ФП, пунктирные — случаю без использования ФП. Из этих результатов видно, что применение ФП оказывает существенное влияние на спектральные характеристики пучка. На рис. 7, в продемонстрированы ВП-зависимости интенсивностей отраженных от образца пучков от обоих источни-

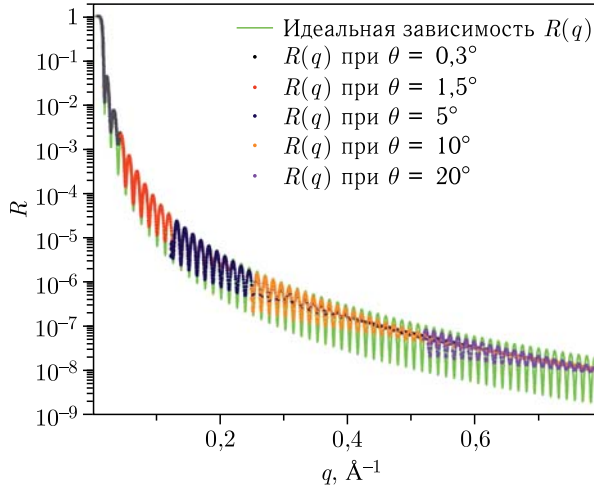


Рис. 8. Сравнение идеальной кривой отражения и полученной в результате монте-карло-моделирования с применением ФП-пучка в расчетной модели при различных углах скольжения для слоя золота толщиной  $500 \text{ \AA}$

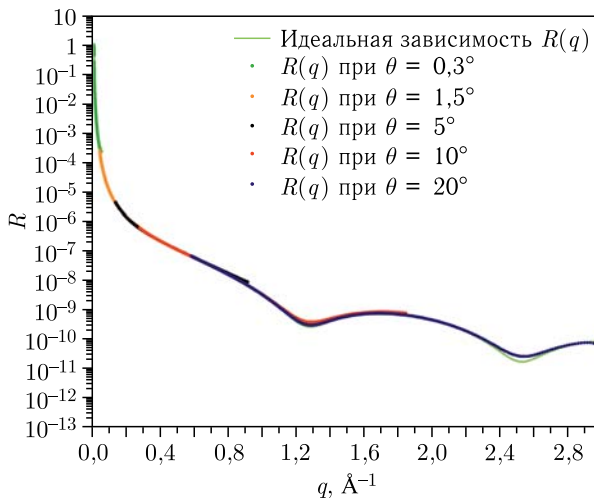


Рис. 9. Сравнение идеальной кривой отражения и полученной в результате монте-карло-моделирования с применением ФП-пучка в расчетной модели при различных углах скольжения для слоя золота толщиной  $5 \text{ \AA}$

ков (с применением ФП и без него). Этот рисунок вполне наглядно демонстрирует, что при использовании ФП интенсивность отраженного пучка фонового источника составляет пренебрежимо малую часть в сравнении с интенсивностью импульсного источника и не может оказать существенного влияния на спектральную зависимость отраженного пучка. Рис. 7, *г* подтверждает это тем, что коэффициент отражения  $R(q)$  в зависимости от величины переданного импульса  $q$ , полученный от суммарной ин-



тенсивности обоих источников, практически совпадает с аналогичной зависимостью от чисто импульсного источника.

Результаты моделирования рефлектометрического эксперимента демонстрируют способность инструмента измерить кривую отражения вплоть до уровня коэффициента отражения  $10^{-8}$  и ниже как для эксперимента с высоким разрешением по переданному импульсу  $q$  (рис. 8), так и для эксперимента с низким разрешением (рис. 9).

Единственным фактором, искажающим экспериментальные результаты, является конечное разрешение по времени пролета. На рис. 8 приведены результаты измерений коэффициента отражения от той же пленки золота  $500 \text{ \AA}$  до значений  $q = 0,8 \text{ \AA}^{-1}$ . Для этого потребовалась шивка 5 измерений с различными углами скольжения вплоть до  $20^\circ$ . Искажение формы экспериментальной кривой здесь связано исключительно с тем фактом, что ВП-шкала, а значит, шкала длины волны  $\lambda$  и шкала импульса  $q$  связаны между собой как  $\lambda \sim q^{-1}$ . Таким образом, экспериментальная зависимость доступна для обработки во всем спектральном диапазоне.

В случае измерений, когда не требуется высокое разрешение (например, слои толщиной около  $5 \text{ \AA}$ ) при использовании ФП, рефлектометрические зависимости, полученные от суммарного потока обоих замедлителей, практически совпадают с идеальными зависимостями, вычисленными теоретически.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные на основе виртуальных экспериментов результаты показывают, что даже установленные на реакторе ИБР-2 стандартные прерыватели фона обеспечивают столь значительное уменьшение влияния фона на результаты рефлектометрических измерений, что минимально измеряемый коэффициент отражения  $R_{\min}$  составляет около  $10^{-8}$ . Это опровергает актуальность предположения о критическом влиянии фона запаздывающих нейтронов на результаты экспериментов на рефлектометрах и установках малоуглового рассеяния на реакторе ИБР-2.

В этих виртуальных экспериментах подразумевалось, что все нейтроны, которые попадают на образец, участвуют в формировании отраженного пучка, а значит, запаздывающие нейтроны также будут формировать кривую отражения, но с очень низким временным разрешением, определяемым временем открытого состояния прерывателя. Однако вклад таких нейтронов оказался настолько мал, что итоговое временное разрешение не может налагать ограничений для измерений коэффициентов отражения ниже значения  $10^{-8}$ .

После исключения фактора фона запаздывающих нейтронов в падающем на образец пучке возникает вопрос о реальном источнике наблюдаемого в экспериментах фона на уровне  $10^{-4}$ . Им может являться только внешний нейтронный фон, образованный: а) нейтронами из собственного пучка и/или б) нейтронами из других каналов на реакторе. В случае а) речь идет о нейтронах, рассеянных на элементах конструкции установки, элементах защиты и т. д. Траектории таких нейтронов проходят мимо образца либо вследствие его переосвещенности [5], либо вследствие частичной проницаемости защиты самого канала. Что касается случая б), то в специальных коротких экспериментах было установлено, что открытие соседних каналов приводит к увеличению фоновой подложки, что прямо указывает на недостаточность защиты

детектора. Таким образом, в этом направлении должны быть предприняты дальнейшие усилия по улучшению качества работы рефлектометров и других инструментов на реакторе ИБР-2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021)).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bauer G. S.* Physics and Technology of Spallation Neutron Sources // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 463. P. 505.
2. *Shvetsov V. N.* Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research // Quantum Beam Science. 2017. V. 1. P. 6.
3. *Ананьев В. Д. и др.* Пуск и исследования основных характеристик реактора ИБР-2 с новым модулятором реактивности гетерогенного типа. Препринт ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
4. *Lieutenant K., Zsigmond G., Manoshin S., Fromme M., Bordallo H. N., Champion D., Peters J., Mezei F.* Neutron Instrument Simulation and Optimization Using the Software Package VITESS // Advances in Computational Methods for X-Ray and Neutron Optics / Ed. by Manuel Sanchez del Rio. Intern. Society for Optics and Photonics. V. 5536. SPIE, 2004. P. 134–145; <https://doi.org/10.1117/12.562814>.
5. *Mattauch S., Ioffe A., Lott D., Bottyán L., Daillant J., Markó M., Menelle A., Sajti S., Veres T.* HERITAGE: The Concept of a Giant Flux Neutron Reflectometer for the Exploration of 3D Structure of Free-Liquid and Solid Interfaces in Thin Films // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 841. P. 34–46; <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01553931>.

Получено 27 мая 2021 г.