

УДК 537.9:548.734

УСТАНОВКА МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА DARIA

© 2023 г. К. А. Павлов^{a, b, *}, Н. А. Коваленко^{a, b}, Л. А. Азарова^{a, b},
Е. А. Кравцов^c, Т. В. Кулевой^d, С. В. Григорьев^{a, b, **}

^aНаучный исследовательский центр “Курчатовский институт” — Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова, Гатчина, Ленинградская область, 188300 Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

^cИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108 Россия

^dНаучный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*e-mail: fairy.neutrons@yandex.ru

**e-mail: Grigoryev_SV@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 29.12.2022 г.

После доработки 22.02.2023 г.

Принята к публикации 22.02.2023 г.

Рассмотрены аспекты экспериментальной реализации метода малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) на нейтронном источнике компактного типа. Сформулировано научное обоснование востребованности установки этого типа. Предложена схема реализации метода МУРН на импульсном источнике нейтронов, обеспечивающая высокую эффективность использования нейтронного пучка за счет ограничения рабочего диапазона длин волн и, как следствие, максимального увеличения частоты и средней по времени мощности/интенсивности источника. Описаны физические параметры ключевых элементов установки, таких как холодный замедлитель нейтронов, каскад прерывателей пучка, коллимационная система, узел образца и широкоапертурный позиционно-чувствительный детектор. Показано, что метод малоуглового рассеяния может быть реализован на импульсном нейтронном источнике университетского типа.

Ключевые слова: малоугловое рассеяние нейтронов, компактный нейтронный источник, времяпролетная техника измерений, моделирование методом Монте-Карло.

DOI: 10.31857/S1028096023070130, **EDN:** TDGEVP

ВВЕДЕНИЕ

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) вот уже полвека является одним из самых востребованных методов исследования в физике конденсированного состояния вещества [1]. Метод МУРН приобрел особую актуальность в последние годы в связи с тенденциями минитюаризации технологических процессов и переходом к наноиндустрии. Эксперимент МУРН позволяет определить форму и способ пространственной организации частиц или агрегатов, распределенных в сплошной среде на масштабах от 1 до 1000 нм. Метод может быть применен к определению наноструктуры метаматериалов с рекордными механическими и проводящими свойствами [2], поиску новых магнитных фаз и экзотических спиновых структур [3], исследованиям вихревых структур в сверхпроводниках [4]. Перечень областей применения метода не ограничивается физикой твердого тела и включает в себя химию высокомолекулярных соединений, биологию и науки о

жизни, медицину и фармакологию [5, 6]. Метод МУРН используется при исследовании свойств ионных жидкостей [7, 8], что важно при разработке возобновляемых источников энергии и топлива. Он применяется сегодня в такой области, как синтез супрамолекулярных полимеров [9] и поверхностно-активных веществ с управляемым функционалом [10], вплоть до создания нанолечарств [11].

Яркой иллюстрацией сильных сторон нейтрона как инструмента структурных исследований служат исследования контрастных мицелл [12], высокомолекулярных агрегатов [13], пористых пород или синтетических материалов [14]. Благодаря селективному дейтерированию становится возможным следить за поведением небольших фракций поверхностно-активных веществ и определять небольшое количество полимера. Таким образом, количество используемого поверхностно-активного вещества может быть оптимизировано исходя из функциональности разрабатываемой систе-

мы и экологического воздействия на окружающую среду. Например, метод МУРН способен помочь в поиске инструментов для диагностики и лечения рака. В ходе разработки нового опухоле-специфического контрастного вещества для магнитно-резонансной томографии (МРТ) ученые исследовали надмолекулярные агрегаты на основе пептидов, а также новый набор контрастирующих веществ для магнитного резонанса на основе гадолиния. Визуализация МРТ — неинвазивная медицинская диагностическая процедура, способная выдавать качественные изображения внутренних органов человеческого тела. Супрамолекулярные агрегаты позволяют обнаруживать рак на ранних стадиях через распознавание пептидов, которое приводит к селективному накоплению в некоторых раковых тканях. МУРН и другие методы были использованы для характеристики процессов, открывающих новые возможности для разработки диагностических и/или терапевтических систем для лечения онкологических патологий [6, 15].

Метод МУРН применяется, например, для поиска корректирующих средств при консервации произведений искусства [16]. В прошлом синтетические полимеры ошибочно применяли в качестве защитных покрытий для окрашенных поверхностей. Вместо сохранения картин эти вещества способствовали серии сложных механизмов деградации. Удаление полимерных пленок теперь является одним из главных приоритетов в науке о сохранении культурного наследия. В целях разработки эффективных наножидкостей для очистки произведений искусства необходимо понимать их способность удалять данные полимерные пленки, для чего требуется знание как их структуры, так и динамики. МУРН особенно хорошо подходит для описания сложных наножидкостей. Измерения МУРН были выполнены для исследования взаимодействия двух разных наножидкостей с полимером, чтобы отделить его от произведений искусства. Результаты позволили построить модель поведения такой системы. Глубокое понимание наноструктуры и механизма, лежащего в основе процесса очистки, является ключом к более осознанному подходу к новым задачам сохранения предметов искусства.

Наконец, МУРН уже давно хорошо зарекомендовал себя в исследованиях магнитных систем, в том числе с использованием поляризованных нейтронов. При трехмерном анализе поляризации нейтронов становится возможным даже определить не только размер магнитной неоднородности (частицы, домена, флуктуации) и величину магнитного момента, но и локальное направление намагниченности внутри наночастицы [17]. Системы магнитных наночастиц широко изучают для их использования в записывающих средах, в постоянных магнитах и в биомедицин-

ских приложениях, включая МРТ и адресную доставку лекарств. Перспективно также использование наночастиц в композитных материалах, например, магнитных наночастиц, встроенных в блок-сополимеры.

Таким образом, в настоящее время метод МУРН является необходимой частью аттестации материалов в таких областях, как магнетизм, биология, медицина и материаловедение. В России на сегодняшний день действует одна малоугловая нейтронная установка — спектрометр ЮМО в ОИЯИ (Дубна) [18] — и еще несколько малоугловых инструментов готовятся к запуску на реакторах ИБР-2М в Дубне [18, 19] и ПИК в Гатчине [20].

КОМПАКТНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ

Разработка компактных источников нейтронов сегодня является одним из перспективных направлений развития экспериментальной базы нейтронных методов исследования [21–23]. Речь идет о создании нейтронного источника, небольшого в сравнении с крупными современными нейтронными центрами, но способного предоставить возможности решения широкого класса задач, связанных с материаловедением, длительной подготовкой экспериментов, отладкой нейтронных методик и обучением навыкам работы с нейтронными пучками. Один из таких источников — компактный источник нейтронов DARIA (Dedicated for Academical Research and Industrial Application) — разрабатывается при непосредственном участии авторов [23]. Идеей проекта DARIA является разработка компактного источника как пользовательского центра для экспериментов по нейтронной дифракции, нейтронной рефлектометрии и малоугловому рассеянию нейтронов. Должен быть выдержан компромисс между потоком нейтронов на образце, разрешением установки, сложностью экспериментальных методик и экологичностью технологий. Поскольку метод МУРН до сих пор не реализован на компактных источниках нейтронов со светосилой, достаточной для работы установки в пользовательском режиме, целью настоящей работы была разработка экспериментальной схемы, реализующей метод МУРН на компактном источнике нейтронов на базе протонного ускорителя.

ОБЩИЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ УСТАНОВКИ МУРН

Суть метода МУРН состоит в проведении эксперимента по рассеянию нейтронов на малые углы (не больше нескольких градусов) и их детектированию, разрешаемому по углу и длине волны нейтрона. Для этого необходимо, чтобы расстояние между образцом и детектором составляло несколько метров, с тем чтобы отделить рассеянное

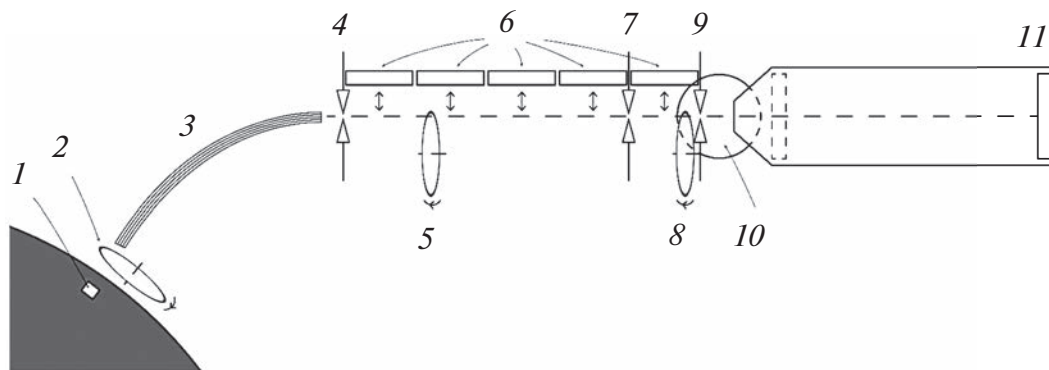


Рис. 1. Принципиальная схема установки МУРН для компактного источника нейтронов DARIA и ее ключевые элементы: 1 — замедлитель; 2, 5, 8 — дисковые прерыватели; 3 — оптический тракт; 4, 7, 9 — коллимационные щели; 6 — сменные нейтронные секции; 10 — узел образца; 11 — детектор.

излучение от прямого пучка, прошедшего образец без взаимодействия. Аппаратная точность измерения угла, как правило, обеспечивается высокой коллимацией падающего на образец пучка. Поскольку коллимация нейтронных пучков с расходимостью выше требуемой возможна только путем поглощения нейтронов, это приводит к относительно низкой светосиле эксперимента и, как следствие, низкой статистике при измерениях на слабо рассеивающих образцах. Поэтому метод МУРН сам по себе предъявляет высокие требования к светосиле — а, следовательно, к мощности источника [1, 24, 25]. Поэтому возможность реализации метода на компактном источнике нейтронов представляет вызов с точки зрения инструментальной науки. За основу подхода принята времяпролетная схема измерений в точечной (pin-hole) геометрии. Техника регистрации нейтронов по времени пролета является естественной для установок на базе нейтронных источников импульсного типа [26, 27]. Для установок МУРН времяпролетная техника предоставляет дополнительные экспериментальные возможности эффективного использования нейтронов, испущенных источником, по сравнению со стационарными источниками [28]. Возможность применения фокусирующих устройств была рассмотрена авторами как очевидное решение в условиях нейтронного дефицита, однако проведенные расчеты показали, что максимальный достижимый коэффициент переноса яркости составляет около 0.6 без учета потерь на дефекты отражения и допустимые разбюстировки оптических систем. Учитывая также масштаб требуемой конструкции — около 30 м нейтронного тракта с высококачественным покрытием и изогнутой поверхностью, применение фокусирующей схемы можно считать неоправданным [23]. Таким образом, геометрическое разрешение в предлагаемой установке достигается классическим обра-

зом — путем коллимации пучка на паре диафрагм управляемого переменного сечения.

В состав установки входят такие ключевые элементы, как холодный замедлитель нейтронов, каскад прерывателей пучка, нейтронный тракт, коллимационная система, узел образца и широкоапертурный позиционно-чувствительный детектор. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Холодный замедлитель 1 обеспечивает первичное формирование спектра пучка нейтронов, имеющего максимум по энергии в холодном диапазоне спектра и, предпочтительно, высокую яркость в заданном направлении.

Каскад прерывателей создает более четкую импульсную структуру пучка, грубо заданную источником, а также фильтрует спектр до заданного диапазона длин волн. Каскад состоит из трех прерывателей: генератора 2, ограничителя высоких длин волн 5 и фильтра перекрытия импульсов 8 на детекторе. Прерыватель 5 является фильтром рециркуляционных нейтронов и должен быть установлен в любой позиции rL , где L — расстояние между прерывателем-генератором и прерывателем-формирователем спектра, а r — произвольное иррациональное число. Коллимационная система состоит из нескольких пар управляемых диафрагм переменного размера 4, 7, 9 и набора сменных секций коллиматор/нейтронный тракт 6, помещенных в вакуумированный объем. Коллимационная система обеспечивает выбор расходимости нейтронного пучка на образце. Критерием выбора является максимально возможный поток нейтронов на образец, при условии достаточно высокого разрешения по углу рассеяния. Узел образца 10 представляет собой держатель нескольких образцов с автоматизированной подачей под пучок нейтронов для материаловедения и биологии или набор устройств для создания внешних условий эксперимента: печь, криостат, магнит. Широкоапертурный позиционно-чувствительный детек-

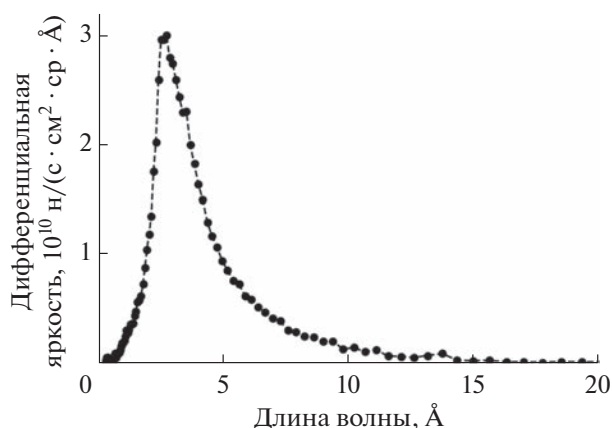


Рис. 2. Расчетный спектр холодного замедлителя компактного источника нейтронов (рабочий объем — цилиндр параводорода диаметром $d = 3$ см и длиной $L = 11$ см).

тор нейтронов 11, помещенный в вакуумированный объем, автоматически устанавливается в одну из нескольких позиций, обеспечивающих измерения в пересекающихся диапазонах по переданному импульсу q .

АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГЕОМЕТРИИ УСТАНОВКИ МУРН

В качестве входных данных для расчетов нейтронного потока установки МУРН взят расчетный спектр параводородного холодного замедлителя в составе мишенной сборки, полученный из численного моделирования происходящих в мишени нейтронно-физических процессов (рис. 2) [29]. Из рисунка видно, что для больших длин волн (более 12 Å) поток на образце на порядок меньше, чем в максимуме при $\lambda = 3 \text{ Å}$. Поэтому измерения интенсивности рассеяния при больших длинах волн невозможны из-за сравнительно низкой мощности компактных источников нейтронов. Однако следует учитывать, что вероятность рассеяния тепловых нейтронов ($\sim 2\text{--}3 \text{ Å}$) на порядок меньше, т.е. в λ^2 раз, по сравнению с рассеянием холодных ($\sim 8\text{--}12 \text{ Å}$), и поэтому целесообразно разделить экспериментальные режимы по диапазону длин волн нейтронов. Рассмотрим два переключаемых режима спектра нейтро-

нов: $2\text{--}8$ и $6\text{--}12 \text{ Å}$. Использование сравнительно узких спектральных полос (в отличие от время-пролетных установок МУРН на нейтронных источниках класса МЕГА) позволяет увеличить частоту повторения импульсов, что при постоянной длительности импульса равносильно пропорциональному увеличению потока в позиции образца.

Принципиальное значение для конструкции нейтронной установки имеет не только выбор рабочего диапазона длин волн нейтрона, но и величина пролетной базы установки — расстояние от прерывателя 2 до детектора 11. Длина коллимационной системы и расстояние образец—детектор, входящие в это расстояние, должны быть одинаковыми по условиям наилучшего углового разрешения [25]. Зная из расчетов спектра нейтронного источника (рис. 2) интегральную яркость источника по каждому из двух спектральных диапазонов нейтронов, можно для различных пролетных баз оценить нейтронный поток в позиции образца. Поток оценивают в приближении идеального переноса яркости, скважности 99% и стандартного для МУРН размера образца $1 \times 1 \text{ см}$. В геометрическую модель перед коллимационной системой добавлены фиксированные 5 м оптического тракта, зарезервированные под выполнение ухода из прямой видимости и для узлов поляризации нейтронного пучка, таких как поляризатор и спин-флиппер. Полученные оценки потока нейтронов приведены в табл. 1. Видно, что для пары коллимационная система и расстояние образец—детектор $7 + 7 \text{ м}$ и $10 + 10 \text{ м}$ максимально возможные потоки оказываются малыми, т.е. недостаточными для статистически значимого проведения измерений, поскольку ожидаемый фон на детекторе составляет единицы счетов в секунду, и для указанных коллимационных баз он составляет более 100% сигнала. Таким образом, рабочим решением является пролетная база $5 + 5 (+5) \text{ м}$, а доступный измерительный диапазон по переданному импульсу составит $(3 \times 10^{-3})\text{--}0.5 \text{ Å}^{-1}$ (для двумерного детектора с линейным размером 0.5 м).

Величина потока для холодного рабочего диапазона на 5 м коллимации на первый взгляд также неприемлема, однако нужно принять во внимание, что поток в позиции образца не является единственным объективным критерием оценки.

Таблица 1. Оценка плотности потока нейтронов (ППН) в позиции образца

Диапазон, Å	Яркость, $10^{11} \text{ н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ср})$	Коллимационная база, м			
		1	5	7	10
		ППН, н/(с · см ²)			
2–8	2.9	581 600	23 264	2690	1454
6–12	0.23	11 500	460	235	115

Дело в том, что интенсивность рассеяния нейтронов и регистрируемого сигнала зависит также от вероятности рассеяния, которое квадратично растет с длиной волны нейтрона. Таким образом, критерием оптимизации следует брать не поток на образце, а величину, пропорциональную произведению потока на квадрат длины волны. Спектральная зависимость такой величины представлена на рис. 3 и показывает, что, несмотря на падение в потоке на порядок при изменении длины волны от 3 до 12 Å, эффективная интенсивность рассеяния снижается лишь вдвое, т.е. не наблюдается качественный скачок.

Дополнительно следует учитывать и тот факт, что длинноволновая часть спектра подразумевает рассеяние на меньшие углы (переданные импульсы) по сравнению с коротковолновой частью, а сечение малоуглового рассеяния нейтронов имеет степенную зависимость от переданного импульса Q^{-n} , где $n = 4$ для нанобъектов с резкими границами. Это означает, что сечение рассеяния на малые углы на порядки больше сечения на большие, а, следовательно, работа с большими длинами волн имеет дополнительные преимущества.

Рабочая частота повторения импульсов должна быть выбрана так, чтобы подряд идущие импульсы не перекрывались в позиции детектора. Иначе говоря, время повторения импульсов должно превосходить разницу времен пролета через всю установку (15 м) самых медленных и самых быстрых нейтронов из рабочей спектральной полосы. Простые оценки показывают, что рабочая частота составляет 40 Гц, что является одновременно и рабочей частотой для протонного инжектора и ускорителя. При конструировании установки МУРН можно воспользоваться диском прерывателя с двумя симметрично расположенными щелями, частота вращения которого в два раза меньше — 20 Гц. Требуемая угловая ширина щелей, соответственно, в данном случае также в два раза меньше.

Максимально допустимая длительность нейтронного импульса определяется аппаратным разрешением по переданному импульсу q , которое для установок МУРН составляет величину около 10%. Разрешение установки МУРН включает два параметра — спектральное и угловое разрешение. Каждое разрешение не должно превышать 7%. Заметим, что наихудшее относительное спектральное разрешение соответствует наименьшей длине волны $\lambda_{\min}$, которая, как определено ранее, составляет 2 Å. В силу того, что кинематика медленных нейтронов точно описывается классическим приближением, длина волны и время пролета связаны однозначно, и относительная погрешность длины волны и времени пролета эквивалентны. Длительность импульса

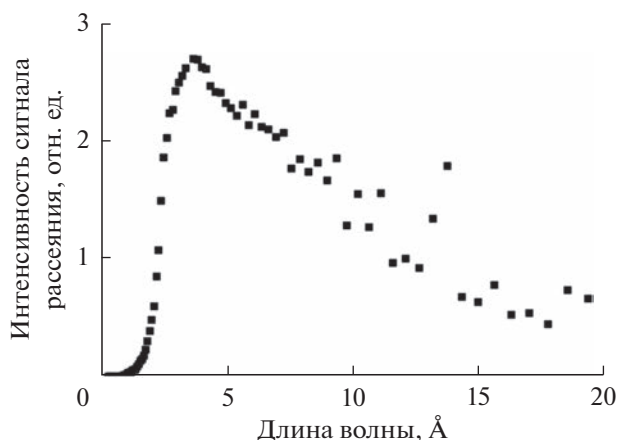


Рис. 3. Спектральная зависимость эффективной интенсивности рассеяния.

дает доминирующий вклад в абсолютную ошибку регистрации времени пролета, поэтому для получения относительной погрешности 7% может быть вычислена как разность времен пролета нейтронов с длинами волн $\lambda_{\min}$ и $1.07\lambda_{\min}$, т.е. 2.00 и 2.14 Å. Для пролетной базы 15 м эта разность составляет около 500 мкс и является максимальной допустимой длительностью импульса, обеспечивающей во всех режимах измерений разрешение прибора по переданному импульсу q не хуже 10%. Угловая ширина щели прерывателя-генератора 2 (рис. 1), необходимая для формирования такого импульса, составляет 7.6° . Это представляет некоторую проблему, так как время полного открытия пучка шириной 3 см составит всего 100 мкс, что придает пучку искаженный временной профиль и ведет к уменьшению светосилы. Поэтому техническое решение с двухщелевым диском половинной частоты лучше не применять, и более того — реализовать прерыватель-генератор в виде пары дисков, вращающихся во встречных направлениях, что позволит обеспечить временной профиль открытия пучка резкими границами.

Прерыватель 8 (рис. 1) служит для фильтрации спектральной рабочей полосы. Ширина его щели соответствует спектральной ширине 6 Å, а фаза регулируется в зависимости от выбора рабочей полосы — более теплого или более холодного спектра. Как показали расчеты, такой прерыватель не может быть реализован непосредственно перед образцом в указанной на рис. 1 позиции, так как угловая ширина щели, необходимой для формирования рабочей полосы шириной 6 Å, составляет более 360° . Поэтому прерыватель планируют разместить перед началом коллимационной системы, на расстоянии 5 м от источника (рис. 4). Расчеты показывают, что для формирования полосы 2–8 Å прерыватель 4 должен иметь щель с угловой шириной 140° , и сдвиг по фазе относи-

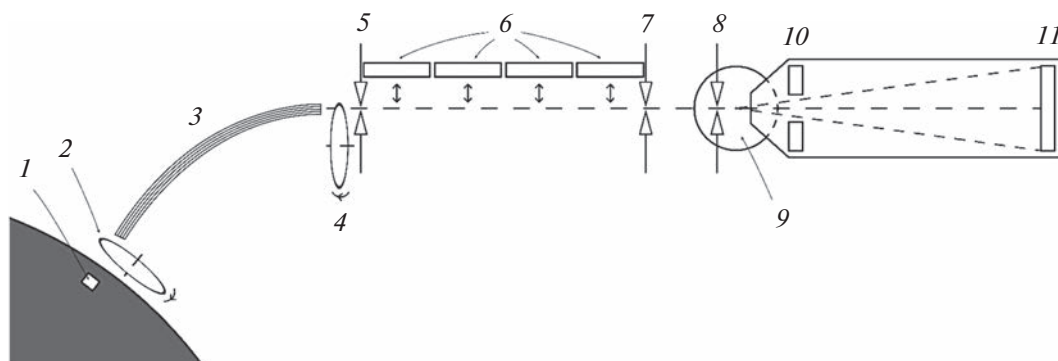


Рис. 4. Уточненная по результатам расчетов схема установки и ее ключевые элементы: 1 – замедлитель; 2, 4 – дисковые прерыватели; 3 – оптический тракт; 5, 7, 8 – коллимационные щели; 6 – сменные нейтронотводные секции; 9 – узел образца; 10, 11 – детекторы.

тельно прерывателя-генератора (рис. 4, прерыватель 2) должен составлять 80° . А для выбора диапазона $6\text{--}12 \text{ \AA}$ ширина и сдвиг должны быть 115° и 165° соответственно. Для него также справедливо утверждение о преимуществе реализации не в виде одиночного диска, а в виде пары встречных дисков. Важно отметить, что для разных спектральных режимов работы установки ширина щели прерывателя получается различной. Это означает, что прерыватель 5 (рис. 1) может быть реализован на практике либо в виде двух сменных дисков, вносимых в пучок поочередно, либо в виде пары близко расположенных дисков, программируемая фазировка которых позволяет регулировать эффективную угловую ширину полученной системы. Если идея с открытием пучка дисками встречных направлений окажется реализуемой, то для исполнения прерывателя 5 потребуются четыре диска.

ПОУЗЛОВОЙ СОСТАВ УСТАНОВКИ МУРН

При проектировании установки следует обратить внимание на следующие обстоятельства. Фильтрацию длинноволновой нерабочей части спектра можно выполнить не только с помощью прерывателя, но и с помощью оптического устройства. В качестве фильтра может быть использовано зеркало или клин зеркал (V-cavity), размещенное(-ый) внутри нейтронотводной секции под определенным углом. Преимуществами такого решения являются улучшение фоновых условий эксперимента (устройство можно разместить дальше от образца и детектора) и потенциальный выигрыш в стоимости. Однако, во-первых, такое устройство не решает задачу фильтрации с коротковолновой стороны, а изогнутый нейтронотвод для ухода из прямой видимости дает слишком плавную границу диапазона, поэтому потребуются некоторое дополнительное оборудование. Во-вторых, описанная выше фильтрация прерывате-

лем 8 вообще не требует прерывателя 5, так как эффект рецикличности в такой схеме принципиально невозможен. Итоговое решение должно быть принято на стадии технического проектирования установки с учетом всех ограничений, однако предпочтительнее выглядит схема с фильтрацией на прерывателе.

Коллимация используемого пучка осуществляется парой управляемых диафрагм, каждая из которых в рабочем положении формирует отверстие заданного размера в листе поглощающего нейтроны материала. Отверстие диафрагмы может быть круглым либо квадратным, от выбора формы отверстия зависит только вид функции разрешения, но не количественные показатели. Размер отверстия диафрагм привязан к характерному размеру образца. Стандартный набор размеров образцов зависит в первую очередь от количества образцов и представляет собой ряд от минимального размера 0.5 см до максимального 3 см . В коллимационной системе также необходимы промежуточное положение диафрагм (например, на расстоянии 1 м от образца, как указано на рис. 1) и соответствующая ему позиция детектора (обозначена пунктиром).

Узел образца должен включать держатель, рассчитанный на несколько образцов, и систему автоматической смены образца в пучке, т.е. управляемое перемещение держателя в латеральном направлении. Также необходимо оборудование для термостатирования исследуемого образца для поддержания заданных условий эксперимента. Существенную долю научной программы установки МУРН составляют исследования магнитных явлений, поэтому востребован будет также и постоянный магнит. В этом ключе полезно также и поляризационное оборудование (поляризатор, спин-флипперы) — оно будет рассмотрено отдельно в качестве опции.

Детекторы, необходимые для данной установки, пространственно-чувствительные и с времен-

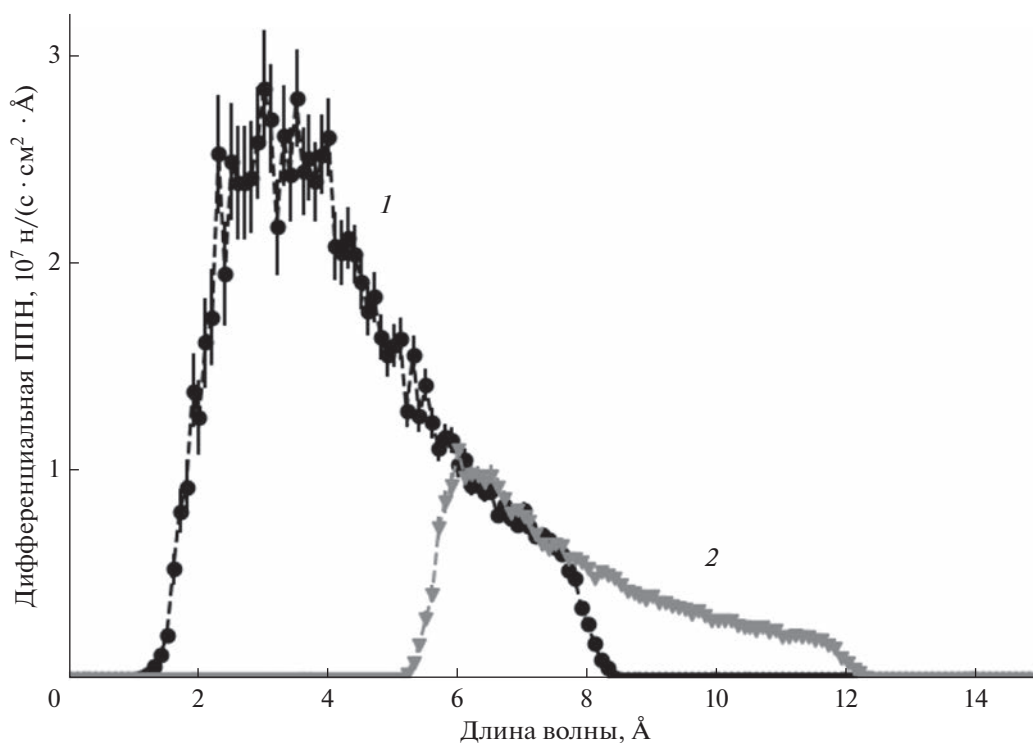


Рис. 5. Расчетный спектр пучка в позиции образца в режиме работы: 1 — коротковолновом (2–8 Å); 2 — длинноволновом (6–12 Å).

ный разрешением. Размер ячейки (пикселя) детектора соответствует минимальному размеру образца 5×5 мм. Ширина временного канала детектора не должна превосходить ширину нейтронного импульса, испущенного источником и сформированного прерывателем-генератором. Для детекторной системы необходимо выбрать одну из двух конфигураций. Один возможный вариант: на установке действует единственный детектор, способный перемещаться вдоль пучка и занимать одно из нескольких положений для измерений. Длина коллимационной части регулируется путем замещения коллимационных секций (6 на схеме установки) нейтроноводными. Такой вариант выигрывает в стоимости и в скорости набора статистики на больших углах рассеяния. Второй вариант предполагает разделить детектор на пять неподвижных частей: одну центральную и четыре периферийные. Центральную часть устанавливают в дальнем положении вакуумированной трубы, а четыре периферийные — в ближнем (рис. 5). Вторая конфигурация выглядит предпочтительней в использовании, так как, несмотря на проигрыш в стоимости и ведение «широкоугольных» измерений на «переколлимированном» пучке, она позволяет одновременно набирать статистику в широком диапазоне углов рассеяния и тем самым выигрывать в скорости счета. Дополнительный аргумент состоит в том,

что сшивание данных из разных диапазонов переданного импульса q в этой конфигурации будет облегчено тем, что весь диапазон q регистрируется одновременно, и зависимость мощности источника от времени будет одинаковой для разных (под)диапазонов. Однако это не отменяет необходимости сшивать данные двух детекторов, что также является нетривиальной задачей и может быть реализовано по примеру инструмента ЮМО за счет нормировки на единый некогерентный рассеиватель [18].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Приведенные выше расчеты и изыскания были верифицированы путем численного моделирования экспериментальной схемы установки. В программном пакете McStas, реализующем метод Монте-Карло для трассировки нейтронных траекторий, была создана модель, последовательно имитирующая работу всех узлов станции, устройство которых оказывает непосредственное влияние на профиль используемого нейтронного пучка: модель источника с временной зависимостью генерации и светосильными характеристиками, соответствующими нейтронно-физическим расчетам, оптический тракт, каскад прерывателей, детектор с временным разрешением. С использованием разработанной модели был ре-

шен ряд расчетных задач. В частности, численно были подтверждены аналитические расчеты прерывателя 8. На рис. 5 представлен результат работы фильтрующей системы 5. Полученные данные также позволяют вычислить светосилу эксперимента. Максимальная достижимая плотность потока в позиции образца (для неколлимированного излучения) составляет 4×10^5 н/(с · см²), что согласуется с результатами аналитических расчетов. Схема установки, обновленная по результатам расчетов и предпроектных изысканий, представлена на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема реализации метода МУРН на компактном нейтронном источнике. Определены физические параметры узлов, обеспечивающих работу установки. Для реализации метода МУРН предлагается установка, использующая лишь часть спектра нейтронного излучения. Такое решение является ключевым для маломощного источника, так как позволяет максимально увеличить частоту источника, и, таким образом, поднять среднюю по времени мощность/интенсивность источника. При общей длине установки времяпролетной базы $L = 15$ м длительность нейтронного импульса может достигать $\tau = 400$ мкс, а частота повторения импульсов — величины $f = 40$ Гц (коэффициент заполнения 1.6%) для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 6$ Å (2–8 или 6–12 Å) и разрешения $\Delta\lambda \cong 0.14$ Å. Показано, что метод может быть реализован на компактном источнике нейтронов со светосилой 4×10^5 н/(с · см²) для коллимационной схемы $1 + 1$ м и 2×10^4 н/(с · см²) для коллимационной схемы $5 + 5$ м в диапазоне переданных импульсов 3×10^{-3} – 0.5 Å⁻¹. Следует отметить, что полученные оценки светосилы свидетельствуют о доступности экспериментов только на сильно рассеивающих образцах. Для увеличения контраста плотности длины рассеяния следует использовать дейтерирование образцов или поляризованные нейтроны. В любом случае можно утверждать, что фокус научных интересов на установке МУРН компактного источника DARIA лежит в области твердотельных исследований, материаловедения и физики металлов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сверхун Д.И., Фейгин Л.А. // Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М.: Наука, 1986. С. 280.
2. Yoonessi M., Gaier J.R. // ACS Nano. 2010. V. 4. № 12. P. 7211.
<https://doi.org/10.1021/nn1019626>
3. Grigoriev S.V., Maleyev S.V., Okorokov A.I., Chetverikov Y.O., Georgii R., Böni P., Lamago D., Eckerlebe H., Pranzas K. // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. № 13. P. 134420.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.134420>
4. Bianchi A.D., Kenzelmann M., DeBeer-Schmitt L., White J.S., Forgan E.M., Mesot J., Zolliker M., Kohlbrecher J., Movshovich R., Bauer E.D., Sarrao J.L., Fisk Z., Petrović C., Eskildsen M.R. // Science. 2008. V. 319. № 5860. P. 177.
<https://doi.org/10.1126/science.1150600>
5. Iashina E.G., Varfolomeeva E.Yu., Pantina R.A., Bairamukov V.Yu., Kovalev R.A., Fedorova N.D., Pipich V., Radulescu A., Grigoriev S.V. // Phys. Rev. E. 2021. V. 104. P. 064409.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.064409>
6. Grigoriev S.V., Iashina E.G., Wu B., Pipich V., Lang Ch., Radulescu A., Bairamukov V.Yu., Filatov M.V., Pantina R.A., Varfolomeeva E.Yu. // Phys. Rev. E. 2021. V. 104. P. 044404.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.044404>
7. Hardacre C., Holbrey J.D., Mullan C.L., Youngs T.G., Bowron D.T. // J. Chem. Phys. 2010. V. 133. № 7. P. 074510.
<https://doi.org/10.1063/1.3473825>
8. Cheng G., Varanasi P., Li C., Liu H., Melnichenko Y.B., Simmons B.A., Kent M.S., Singh S. // Biomacromolecules. 2011. V. 12 № 4. P. 933.
<https://doi.org/10.1021/bm101240z>
9. Gröger G., Meyer-Zaika W., Böttcher C., Gröhn F., Ruthard C., Schmuck C. // J. Am. Chem. Society. 2011. V. 133 № 23. P. 8961.
<https://doi.org/10.1021/ja200941a>
10. Chiappisi L., Prévost S., Grillo I., Gradzielski M. // Langmuir. 2014. V. 30. № 7. P. 1778.
<https://doi.org/10.1021/la404718e>
11. Sanson C., Diou O., Thevenot J., Ibarboure E., Soum A., Brûlet A., Miraux S., Thiaudière E., Tan S., Brisson A., Dupuis V., Sandre O., Lecommandoux S. // ACS Nano. 2011. V. 5. № 2. P. 1122.
<https://doi.org/10.1021/nn102762f>
12. Hu X., Gong H., Liu H., Wang X., Wang W., Liao M., Li Z., Ma K., Li P., Rogers S., Schweins R., Liu X., Padia F., Bell G., Lu J.R. // J. Coll. Int. Sc. 2022. V. 618. P. 78. Doi S0021979722003812
13. Prause A., Hechenbichler M., von Lospichl B., Feoktystov A., Schweins R., Mahmoudi N., Laschewsky A., Gradzielski M. // Macromolecules. 2022. V. 55. P. 5849.
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c00878>
14. Misuraca L., Calìo A., Grillo I., Grélard A., Oger P., Peters J., Demé B. // Langmuir. 2020. V. 3. P. 13516.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02258>
15. Heidari A. // Integr. Mol. Med. 2018. V. 5. P. 1.

16. *Len A., Bajnok K., Füzi J.* // Handbook of Cultural Heritage Analysis. Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 189.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_8
17. *Krycka K.L., Booth R.A., Hogg C.R., Ijiri Y., Borchers J.A., Chen W., Watson S.M., Laver M., Gentile T.R., Dedon L.R., Harris S., Rhyne J.J., Majetich S.A.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. 20. P. 207203.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.207203>
18. *Кушлин А.И., Иванов А.И., Розачев А.В., Соловьев Д.В., Исламов А.Х., Ской В.В., Ковалев Ю.С., Власов А.В., Рижиков Ю.Л., Соловьев А.Г., Горделий В.И.* // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 230.
<https://doi.org/10.31857/S0023476121020089>
19. *Авдеев М.В., Еремин Р.А., Боднарчук В.И., Гапон И.В., Петренко В.И., Эрхан Р.В., Чураков А.В., Козленко Д.П.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 7. С. 5.
<https://doi.org/10.7868/S0207352818070016>
20. *Ковальчук М.В., Воронин В.В., Григорьев С.В., Серебров А.П.* // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 191.
<https://doi.org/10.31857/S0023476121020065>
21. *Carpenter J.M.* // Nature Rev. Phys. 2019. V. 1. № 3. P. 177.
<https://doi.org/10.1038/s42254-019-0024-8>
22. *Ott F.* Compact Neutron Sources for Neutron Scattering: Doctoral Dissertation. CEA Paris Saclay, 2018.
23. *Павлов К.А., Коник П.И., Коваленко Н.А., Кулевой Т.В., Серебренников Д.А., Субботина В.В., Павлова А.Е., Григорьев С.В.* // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 1. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S002347612201009X>
24. *Zaccai G., Jacrot B.* // Ann. Rev. Biophys. Bioeng. 1983. V. 12. № 1. P. 139.
<https://doi.org/10.1146/annurev.bb.12.060183.001035>
25. *Mildner D.T., Carpenter J.M.* // J. App. Crystallogr. 1984. V. 17. № 4. P. 249.
<https://doi.org/10.1107/S0021889884011468>
26. *Cranberg L., Levin J.S.* // Phys. Rev. 1956. V. 103. Iss. 2. P. 343.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.343>
27. *Lindroos M., Bousson S., Calaga R. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2011. V. 269. Iss. 24. P. 3258.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.04.012>
28. *Григорьев С.В., Пшеничный К.А., Барабан И.А., Родионова В.В., Чичай К.А., Хайнеманн А.* // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. № 12. С. 799.
<https://doi.org/10.1134/S0370274X19240068>
29. *Subbotina V.V., Pavlov K.A., Kovalenko N.A., Konik P.I., Voronin V.V., Grigoriev S.V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2021. V. 1008. P. 165462.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165462>

Small-Angle Neutron Scattering Instrument for Compact Neutron Source DARIA

**K. A. Pavlov^{1, 2, *}, N. A. Kovalenko^{1, 2}, L. A. Azarova^{1, 2}, E. A. Kravtsov³,
T. V. Kulevoy⁴, S. V. Grigoriev^{1, 2, **}**

¹*B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute of NRC “Kurchatov Institute”, Gatchina, Leningrad oblast, 188300 Russia*

²*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 198504 Russia*

³*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of RAS (Ural branch), Ekaterinburg, 620108 Russia*

⁴*NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

**e-mail: fairy.neutrons@yandex.ru*

***e-mail: Grigoryev_SV@pnpi.nrcki.ru*

Aspects of the experimental implementation of the small-angle neutron scattering (SANS) method on a compact neutron source are considered. A scientific justification of the demand for this type of instrument is formulated. A scheme for implementing the SANS method on a pulsed neutron source is proposed, which ensures high efficiency of using a neutron beam by limiting the operating wavelength range, and, as a result, maximizing the frequency and time-averaged power/intensity of the source. The physical parameters of the key elements of the facility, such as the cold neutron moderator, the beam chopper cascade, the collimation system, the sample unit and the wide-aperture position-sensitive detector, are described. It is shown that the small-angle scattering method can be implemented on a university-type pulsed neutron source.

Keywords: small-angle neutron scattering, compact neutron source, time-of-flight measurement technique, Monte Carlo simulations.