

УДК 539.125.5

НЕЙТРОННЫЕ УСТАНОВКИ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA: ПАРАМЕТРЫ И ОСОБЕННОСТИ

© 2023 г. С. В. Григорьев^{1, 2, *}, Н. А. Коваленко², К. А. Павлов^{1, 2},
Е. В. Москвин^{1, 2}, В. Г. Сыромятников^{1, 2}, Н. А. Григорьева¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

*E-mail: grigoryev_sv@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 22.05.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Компактный источник нейтронов DARIA на основе линейного протонного ускорителя предназначен для создания пучков нейтронов для дифрактометра, рефлектометра и установки малоуглового рассеяния. Экспериментальные установки оптимизированы по диапазону переданных импульсов, инструментальному разрешению, геометрическим размерам, а также по частоте повторения и длительности нейтронных импульсов.

DOI: 10.31857/S0367676523702666, EDN: EISNZJ

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее востребованной группой нейтронных исследовательских методов является нейтронное рассеяние в физике конденсированных сред. Благодаря уникальной комбинации свойств тепловых нейтронов — отсутствие электрического заряда, наличие магнитного момента и характерные значения длины волны де-Бройля ($1\text{--}10\text{ \AA}$) и энергии ($1\text{--}25\text{ мэВ}$) — их используют для изучения структуры вещества, природы магнитных явлений, динамики на атомарном и молекулярном масштабе.

Компактные источники нейтронов (КИН) — это современная тенденция развития исследовательских методик с использованием рассеяния нейтронов. Под КИН понимают источники нейтронов малой мощности, работающих на базе импульсных ионных или электронных ускорителей и достигающих интенсивности нейтронных пучков в импульсе до $10^{15}\text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ [1–8]. Исследовательские КИН для физики конденсированного состояния снабжены мишенью, замедлителем нейтронов и нейтронотводной системой, что позволяет разместить несколько нейтронных установок на одной мишени. В качестве мишени чаще используются бериллий или литий, так как энергия связи нейтронов в ядре этих элементов мала. Мишень компактного источника снабжена различного типа замедлителями для термализации

полученных нейтронов, что обеспечивает на выходе мишенной сборки средний поток в пучке тепловых нейтронов Φ на уровне около $10^{12}\text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Если минимизировать потери при транспортировке, такой поток нейтронов достаточен для проведения дифракционных, рефлектометрических, малоугловых и радиографических исследований.

Компактный источник нейтронов изначально уступает несколько порядков нейтронного потока большому источнику ускорительного типа или высокопоточному ядерному реактору, однако значительная часть этих потерь может быть компенсирована увеличением апертуры захвата и глубокой оптимизацией экспериментальной установки, включая адаптацию параметров ускорителя, мишени и замедлителя к потребностям каждого нейтронного инструмента. Например, ожидаемая плотность потока тепловых нейтронов в замедлителе высокопоточных реакторов мощностью в десятки МВт составляет $10^{14}\text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, тогда как для прототипа КИН DARIA — $10^{12}\text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. При сравнении Φ следует учитывать, что из общего потока нейтронов на установках стационарных реакторов вырезается узкая спектральная линия, т.е. из потока выбрасывается от 90 до 99% нейтронов. В случае же с импульсными источниками — примером которого является КИН — практически все нейтроны в импульсе используются в исследовании, поскольку рассеянные на образ-

це нейтроны детектируются по время пролетной методике.

Существующие и проектируемые компактные источники нейтронов можно условно разделить на 2 класса. Первый — это источники университетского типа, предназначенные для обучения студентов и проведения научных исследований, не требующих высокой светосилы или развития новых нейтронных методик. Ко второму классу относятся источники средней мощности, для которых, при выполнении полной совместной оптимизации всех элементов компактного источника, возможно добиться светосилы на образце, не уступающей современным реакторам средней и даже большой мощности. Подобные источники используют как центры коллективного пользования.

На волне всемирного интереса к компактным источникам нейтронов мы представляем российскую инициативу создания подобного источника. Проект DARIA (neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Application). КИН DARIA, разработанный для прикладных исследований и применения в промышленности, оснащен тремя времяпролетными нейтронными установками: порошковый дифрактометр нейтронов, рефлектометр поляризованных нейтронов и установка малогоуглового рассеяния нейтронов [9].

Моделирование мишенной сборки КИН DARIA проводилось методом Монте-Карло в программном пакете PHITS [10]. Импульсный поток протонов с энергией 13 МэВ, попадая на мишень, создает импульсный поток нейтронов. Этот поток после прохождения через холодный замедлитель характеризуется длительностью нейтронного импульса τ и частотой следования нейтронных импульсов f . Для КИН DARIA средние значения τ и f составляют порядка 100 мкс и 100 Гц, соответственно. При этом, каждый нейтронный импульс имеет широкое спектральное распределение от 1 до 12 Å. Поэтому частота повторения импульсов должна соответствовать диапазону используемого спектра нейтронов, чтобы избежать искажения полученных данных на детекторе из-за явления рецикличности, когда самые быстрые нейтроны из последующего нейтронного импульса догоняют самые медленные нейтроны из предыдущего импульса. Величина f , при которой отсутствует рецикличность, определяется величиной времяпролетной базы L и шириной нейтронного спектра $\Delta\lambda$ для конкретной исследовательской установки.

Моделирование нейтронных систем проводилось методом Монте-Карло в программном пакете McStas [11]. Для трассировки нейтронных траекторий создается модель, последовательно имитирующая работу всех узлов станции, оказывающих непосредственное влияние на профиль используемого нейтронного пучка: модель источника с временной зависимостью генерации и све-

тосильными характеристиками, оптический тракт, каскад прерывателей, детектор с временным разрешением. Физические параметры узлов определены, исходя из достижения максимальной светосилы прибора при условии удовлетворительного инструментального разрешения. Параметры нейтронных установок и поток нейтронов Φ в позиции образца представлены в статьях [12–14] и сравниваются в этой статье с параметрами аналогичных установок и потоками нейтронов Φ , на импульсном реакторе ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна.

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ: ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

Основными компонентами КИН DARIA являются импульсный ускоритель протонов, мишенная сборка, инструменты нейтронного рассеяния. Протонный ускоритель, состоящий из источника на основе электронно-циклотронного резонанса и ускоряющих структур, обеспечивает формирование импульсной структуры пучка на бериллиевой мишени с высоким пиковым током до 100 мА и частотой до 200 Гц [15, 16]. Энергия протонов ограничена сверху 13 МэВ из-за нежелательной генерации трития в мишени при больших энергиях протонов. Для получения нейтронов используется реакция столкновения протонов с ядрами бериллия, обеспечивающая выход нейтронов, достаточный для исследований в физике конденсированного состояния, при умеренном выделении тепла [4, 5]. Компактные размеры мишени (около 5 см в диаметре и 1.1 мм в толщину) обеспечат относительно высокую плотность потока нейтронов Φ [17]. Малые размеры мишени и теплового замедлителя, размещаемого вокруг мишени, обуславливают и компактную биологическую защиту. Разрабатывается система охлаждения предназначена отводить около 30 кВт среднего тепловыделения с мишени и ее окружения. При указанных выше параметрах ускорителя и мишени возможно добиться плотности потока нейтронов в импульсе до $5 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Нейтронные установки оптимизируются совместно с соответствующими им замедлителями нейтронов. Конкретный перечень нейтронных станций определяется потребностями исследовательского центра. Поэтому в КИН DARIA заложена концепция гибкого изменения параметров источника нейтронов: температура замедлителя, частота повторения и длительность нейтронных импульсов.

ПОРОШКОВЫЙ ДИФРАКТОМЕТР НЕЙТРОНОВ

Нейтронный дифрактометр предназначен для определения кристаллической и магнитной

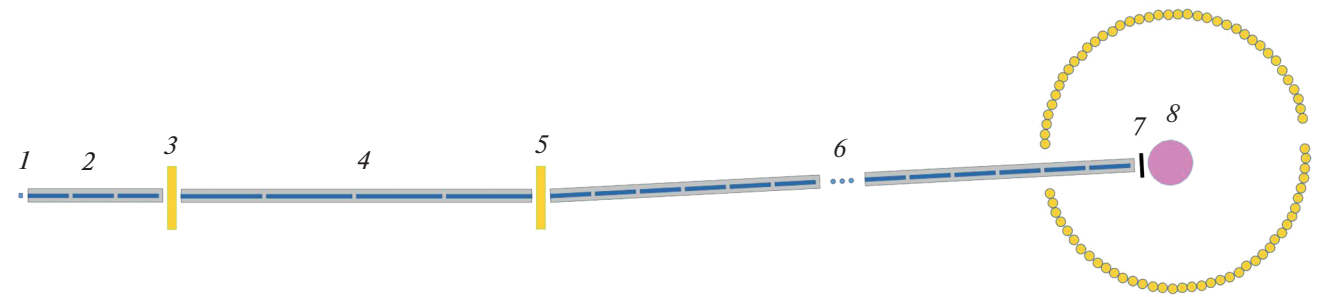


Рис. 1. Схема порошкового дифрактометра нейтронов (см. описание в тексте).

структуры твердых тел. Параметры времяпролетного дифрактометра для КИН DARIA оптимизированы по максимальному потоку при заданном разрешении. Для оптимального соотношения разрешение–светосила определены диапазон длин волн нейтронов, частота и длительность импульсов. Времяпролетный дифрактометр с пролетной базой $L = 23.5$ м схематически представлена на рис. 1. Рабочий спектральный диапазон $\lambda = 1\text{--}5\text{ \AA}$, разрешение $\Delta d/d = 0.005$ и длина импульса нейтрона $\Delta t = 30$ мкс.

От замедлителя нейтронов в мишенной сборке (1) нейтроны выводятся в нейтронный зал через прямой нейтронный канал (2) сечением $20 \times 50\text{ мм}^2$ и длиной 1.5 м. Прерыватель из двух дисков, вращающихся синхронно навстречу друг другу, используется для формирования симметричного во времени импульса. В схеме дифрактометра первая пара прерывателей (3) предназначена для привязки точки отсчета к времяпролетной базе. Вторая пара дисковых прерывателей (5), расположенных на расстоянии 5.5 м от замедлителя, предназначена для устранения перекрытия импульсов и сужения спектральной полосы для улучшения разрешения.

Между дисковыми прерывателями (3) и (5) устанавливается нейтронный канал (4) длиной 3.9 м для уменьшения потерь нейтронного потока, при этом часть фона от быстрых нейтронов и гамма-излучения отсекается первым дисковым прерывателем (3). После второго дискового прерывателя (5) устанавливается изогнутый

нейтронный канал (6) длиной 17 м, что позволяет уйти с прямой видимости мишени и избавиться от оставшихся быстрых нейтронов и гамма-излучения. Нейтронные каналы (4) и (6) набраны из прямых секций с суперзеркалами длиной $l = 0.5$ м и имеют одинаковые параметры: сечение $20 \times 50\text{ мм}^2$ и суперзеркальное покрытие $m = 2$. Поворот секций относительно друг друга в изогнутом нейтронном канале (6) составляет $\alpha = \arctg(l/\rho) = 0.00795^\circ$, для радиуса кривизны $\rho = 3601.5$ м. После нейтронного канала, непосредственно перед узлом образца (8), устанавливается диафрагма (7) с изменяющейся апертурой для дополнительного ограничения расходимости нейтронного пучка и уменьшения фона на детекторе. После рассеяния на образце нейтроны попадают на детекторную группу (9), расположенную на расстоянии 1.5 м от образца в диапазоне углов рассеяния 2θ от $\pm 10^\circ$ до $\pm 170^\circ$. Группа разбита на отдельные секторы по $10^\circ\text{--}20^\circ$.

Параметры нейтронного дифрактометра для КИН DARIA представлены в табл. 1. Для сравнения там же приведены характеристики дифрактометра ДРВ в ОИЯИ [18]. Сходства и различия двух дифрактометров очевидны. Геометрию приборов (пролетная база, сечения нейтронных каналов, диапазон углов рассеяния) можно считать одинаковыми. Различными оказываются диапазон рабочих длин волн и, как результат, диапазон межплоскостных расстояний, который значительно больше для дифрактометра ДРВ в ОИЯИ. Если рассмотреть класс задач, решаемых в диапазоне $\Delta d/d = 0.5\text{--}29\text{ \AA}$, то поток нейтронов Φ на образце

Таблица 1. Сравнение основных параметров нейтронного дифрактометра для КИН DARIA и дифрактометра ДРВ в ОИЯИ [18]

Тип дифрактометра	Дифрактометр для КИН DARIA	Дифрактометр ДРВ в ОИЯИ
L	24 м	24–26 м
Нейтронный канал	Суперзеркальный, $20 \times 50\text{ мм}$, $m = 2$	Зеркальный, $15 \times 180\text{ мм}$, Ni
Рабочие диапазоны	$\lambda = 1\text{--}5\text{ \AA}$, $\theta = 10^\circ\text{--}170^\circ$, $d = 0.5\text{--}29\text{ \AA}$	$\lambda = 1\text{--}18\text{ \AA}$, $\theta = 1^\circ\text{--}170^\circ$, $d = 0.6\text{--}300\text{ \AA}$
Разрешение	$\Delta q/q = 0.5\%$	$\Delta q/q = 1\text{--}10\%$
Φ	$5 \cdot 10^6\text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	$\sim 10^7\text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

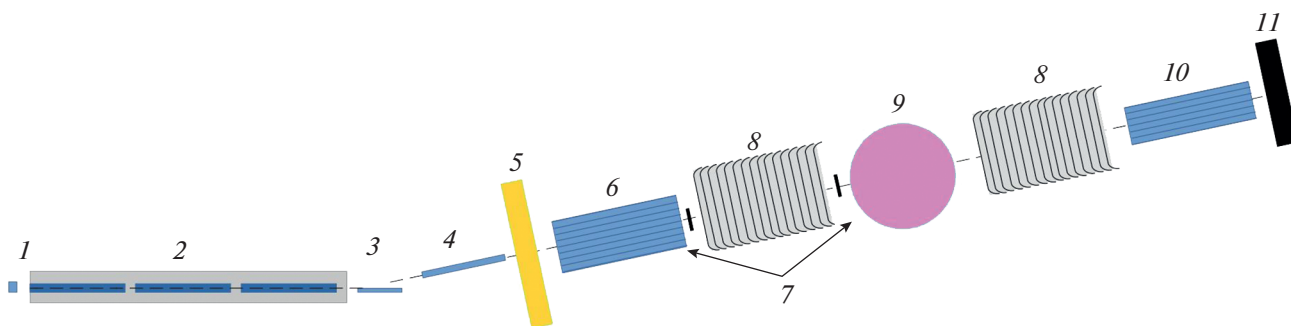


Рис. 2. Схема рефлектометра поляризованных нейтронов (см. описание в тексте).

оказывается одного порядка для двух обсуждаемых приборов при одинаковом разрешении. А значит для этого класса задач дифрактометры имеют одинаковую эффективность.

РЕФЛЕКТОМЕТР ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Времяпролетный нейтронный рефлектометр с горизонтальной плоскостью рассеяния предназначен для определения профиля плотности длины рассеяния нейтронов вглубь пленки, обусловленного изменениями ее структуры или намагниченности. Рефлектометр нацелен на исследование процессов диффузии, сорбции, окисления и других явлений на поверхностях и границах раздела сред в полупроводниковых, металлических, полимерных или биологических наноструктурах. Рефлектометр, работающий по времяпролетному методу, измеряет интенсивность отражения от плоскости нейтронного пучка с широким спектральным распределением в зависимости от длины волны при фиксированном угле скольжения. Дополнительная опция рефлектометра для КИН DARIA – измерения с использованием как поляризованных, так и неполяризованных нейтронов, существенно расширяет круг материаловедческих задач. Рабочий диапазон рефлектометра по длинам волн нейтронов лежит в интервале $1\text{--}7\text{ \AA}$, а по переданным импульсам – $0.001\text{--}0.5\text{ \AA}^{-1}$. Схема нейтронного рефлектометра представлена на рис. 2.

Выводящий коллиматор (2), расположенный вплотную к поверхности замедлителя внутри мишенной сборки, задает первичную коллимацию пучка ~ 1 мрад в горизонтальной плоскости. Немагнитное суперзеркало NiMo/Ti ($5 \times 80 \times 210\text{ мм}^3$, $m = 2$) (3) отклоняет пучок нейтронов от оси выводящего коллиматора и отделяет “полезные” (тепловые и холодные) нейтроны от гамма-квантов и быстрых нейтронов. Угол отклонения пучка нейтронов от оси выводящего коллиматора равен 20 угловым минутам. Между выводящим коллиматором и суперзеркалом устанавливается мони-

тор для определения изменения интенсивности нейтронов от источника. Фоновый коллиматор ($1 \times 30 \times 400\text{ мм}^3$) со стенками из стали и борированного полиэтилена (4) подавляет остаточный фон от гамма-квантов и быстрых нейтронов.

Как отмечалось выше, длительность τ и частота f нейтронных импульсов задаются протонным ускорителем КИН. Рабочий диапазон длин волн, при заданной плотности потока нейтронов на образце, определяет окончательный выбор частоты и длины импульса нейтронов. Спектр шириной $\Delta\lambda$ вырезается с помощью 2-дискового прерывателя (5) из нейтронных импульсов, имеющих широкое спектральное распределение, превышающее $\Delta\lambda$. При длине нейтронного импульса $\tau = 100\text{ мкс}$ и общей длине время пролетной базы $L = 8\text{ м}$, для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 3\text{ \AA}$ и разрешения $\Delta\lambda \approx 0.05\text{ \AA}$ частота повторения импульсов может достигать $f = 165\text{ Гц}$ при коэффициенте заполнения 1.66%. Если же диапазон длин волн выбран шире $\Delta\lambda = 6\text{ \AA}$, то при тех же параметрах частота должна быть не больше, чем $f = 82\text{ Гц}$ (коэффициент заполнения 0.83%).

Поляризатор пучка (6) – двойное магнитное суперзеркало в постоянном магнитном поле $H \sim 500\text{ Э}$ – служит для поляризации пучка нейтронов. При работе с немагнитными образцами поляризатор выводится из пучка. Коллимирующие диафрагмы (7) формируют угловую расходимость пучка, падающего на образец. Радиочастотные адиабатические спин-флипперы (8) и анализатор (10) предназначены для проведения поляризационного анализа для магнитных образцов. Спин-флиппер изменяет направление поляризации нейтронного спина на противоположно-ориентированный детектор (11) [21, 22]. В узел образца (9) можно устанавливать электромагнит и/или криостат. В рефлектометре предусмотрена система ведущего магнитного поля. Она расположена по ходу пучка от магнита поляризатора до магнита анализатора.

Параметры нейтронного рефлектометра приведены в табл. 2. Для сравнения там же приведе-

Таблица 2. Сравнение основных параметров нейтронного рефлектометра для КИН DARIA и рефлектометра РЕМУР в ОИЯИ [18]

Тип рефлектометра	Рефлектометр для КИН DARIA	Рефлектометр РЕМУР в ОИЯИ
<i>L</i>	8 м	29–34 м
Нейтроновод	Суперзеркальный ($m = 2$), $1500 \times 10 \times 50 \text{ мм}^3$	Суперзеркальный ($m = 1.2$) конический, $18000 \times 20 \times 160 \text{ мм}^2$
Рабочие диапазоны	$\lambda = 1\text{--}10 \text{ \AA}$, $q = 0.001\text{--}0.5 \text{ \AA}^{-1}$	$\lambda = 0.9\text{--}15 \text{ \AA}$, $q = 0.003\text{--}0.5 \text{ \AA}^{-1}$
Разрешение	$\Delta q/q = 2\text{--}10\%$	$\Delta q/q = 3\text{--}10\%$
Φ	$10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	$1.6 \cdot 10^5 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Детектор	Двухкоординатный ^3He ПЧД $250 \times 250 \text{ мм}^2$	Двухкоординатный $^3\text{He} + \text{CF}_4$ ПЧД $178 \times 178 \text{ мм}^2$

ны характеристики дифрактометра РЕМУР в ОИЯИ [18]. Два рефлектометра близки по характеристикам. Различными оказываются длины пролетных баз, и как следствие, поток нейтронов Φ на образце значительно (на порядок) меньше для рефлектометра РЕМУР в ОИЯИ.

УСТАНОВКА МАЛОУГЛОВОГО
РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Установка малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) — классический инструмент точечной геометрии для исследования структур нано- и субмикро-масштаба. В качестве прототипа рассматриваем установку ЮМО на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ [18].

Схема установки МУРН на компактном нейтронном источнике представлена на рис. 3. В состав установки входят такие ключевые элементы, как холодный замедлитель нейтронов, каскад прерывателей пучка, нейтронный канал, коллимационная система, узел образца и широкоапертурный позиционно-чувствительный детектор (ПЧД). Холодный замедлитель (1) обеспечивает первичное формирование спектра пучка нейтронов, имеющего максимум по энергии в холодном диапазоне спектра и, предпочтительно, высокую яркость в заданном направлении. Нейтронный канал (2) предназначена для захвата и проведения максимального количества тепловых и холодных ней-

тронов в направлении узла образца. Чем ближе эта секция расположена к холодному замедлителю, тем выше поток нейтронов на образце.

Каскад прерывателей (3) и (5) создает более четкую импульсную структуру пучка, грубо заданную источником, а также фильтрует спектр до заданного диапазона длин волн. Каскад состоит из двух прерывателей: (3) — генератора и одновременно фильтра перекрытия импульсов на детекторе и (5) — ограничителя высоких длин волн. Нейтронный канал (4) между прерывателями обеспечивает проведение максимального потока нейтронов к образцу. Коллимационная система состоит из набора сменных секций коллиматор/нейтронный канал (6) и нескольких наборов управляемых диафрагм переменного размера (7), помещенных в вакуумированный объем. Коллимационная система обеспечивает необходимую расходимость нейтронного пучка на образце. Узел образца (8) 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 детектор нейтронов (10), помещенный в вакуумированную трубу (9), состоит из 2 секций, что позволяет регистрировать рассеяние в малые и широкие углы одновременно.

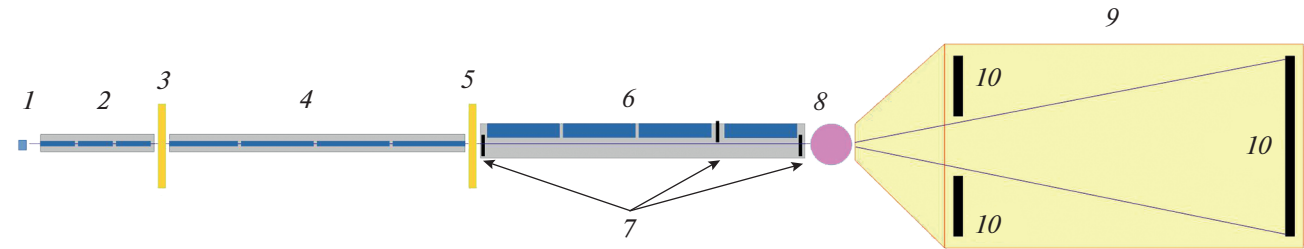


Рис. 3. Схема установки малоуглового рассеяния нейтронов (см. описание в тексте).

В качестве входных данных для расчетов нейтронного потока Φ установки МУРН взят расчетный спектр пара-водородного холодного замедлителя в составе мишенной сборки, полученный из численного моделирования происходящих в мишени нейтронно-физических процессов. Расчетная яркость источника нейтронов в тепловом диапазоне составляет порядка 10^{11} нейтронов/(см² · с · стер) [17].

Рассматривается установка, использующая лишь часть спектра нейтронного излучения. Такое решение является ключевым для маломощного источника, так как позволяет максимально увеличить частоту импульсов, 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 $f = 40$ Гц (коэффициент заполнения 1.6%) для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 6 \text{ \AA}$ (2–8 или 6–12 $\text{\AA}$) и разрешения $\Delta\lambda \cong 0.14 \text{ \AA}$. На рис. 4. представлена дифференциальная плотность потока нейтронов в позиции образца в зависимости от длины волны для коллимации в 1 м и в 5 м и двух спектральных диапазонов $\Delta\lambda$ (2–8 $\text{\AA}$ или 6–12 $\text{\AA}$). Расчеты показывают, что метод может быть реализован на КИН со светосилой $4 \cdot 10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для коллимационной схемы в (1 + 1) метров и $2 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для коллимационной схемы в (5 + 5) метров в диапазоне переданных импульсов $3 \cdot 10^{-3} \text{--} 0.5 \text{ \AA}^{-1}$.

Полученные оценки светосилы свидетельствуют о доступности экспериментов на образцах, применяемых для работы в области биологии, полимеров, медицины, в твердотельных исследованиях, материаловедении и физики металлов. При исследовании органических образцов для увеличения контраста плотности длины рассеяния нейтронов следует использовать дейтерирование образцов или контрастирование буфера смесью D₂O/H₂O тяжелой и легкой воды. Для исследования магнитных неоднородностей, магнитных

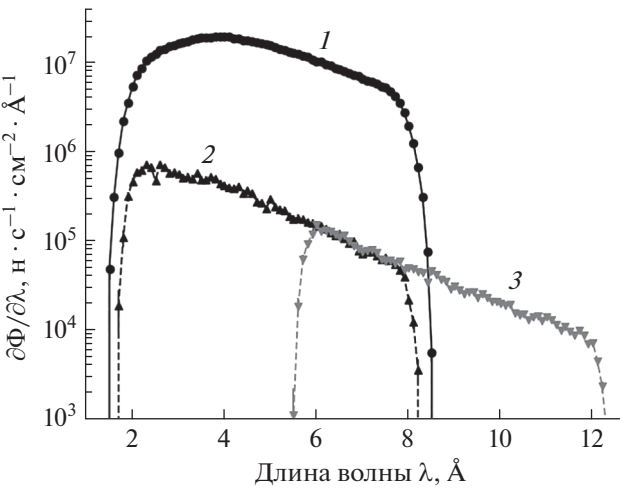


Рис. 4. Дифференциальная плотность потока нейтронов Φ в позиции образца в зависимости от длины волны нейтрона для коллимации 1 м (кривая 1) и коллимации 5 м для двух спектральных диапазонов $\Delta\lambda = 2\text{--}8 \text{ \AA}$ (кривая 2) и $\Delta\lambda = 6\text{--}12 \text{ \AA}$ (кривая 3).

структур и магнитных флуктуаций можно использовать поляризованные нейтроны.

Параметры установки малоуглового рассеяния нейтронов для КИН DARIA представлены в табл. 3. Для сравнения там же приведены характеристики дифрактометра ЮМО в ОИЯИ [18]. Две установки МУРН имеют одинаковые характеристики. Длина пролетной базы на установке ЮМО в 2 раза больше, чем для установки МУРН на источнике DARIA, а поток нейтронов на образце Φ в диапазоне длин волн от 2 до 8 $\text{\AA}$ практически совпадают, поэтому приборы имеют одинаковую рабочую эффективность.

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРОННЫХ УСТАНОВОК

По результатам численного моделирования дифрактометра, рефлектометра и установки МУРН

Таблица 3. Сравнение основных параметров установки малоуглового рассеяния нейтронов для КИН DARIA и установки МУРН ЮМО в ОИЯИ [18]

Тип установки МУРН	МУРН для КИН DARIA	МУРН ЮМО в ОИЯИ
<i>L</i>	18 м	43 м
Нейтронотвод	Суперзеркальный ($m = 2$), $40 \times 40 \text{ мм}^2$	Суперзеркальный ($m = 1.2$), $30 \times 30 \text{ мм}^2$
Рабочие диапазоны	$\lambda = 2\text{--}8 \text{ \AA}$; $6\text{--}12 \text{ \AA}$, $q = 0.005\text{--}0.5 \text{ \AA}^{-1}$	$\lambda = 0.5\text{--}8 \text{ \AA}$, $q = 0.007\text{--}0.7 \text{ \AA}^{-1}$
Разрешение	$\Delta q/q = 5\text{--}10\%$	$\Delta q/q = 5\text{--}15\%$
Φ	$10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (коллим. схема (1 + 1) м); $10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (коллим. схема (5 + 5) м)	$10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
Детекторы	^3He ПЧД $500 \times 500 \text{ мм}^2$ ^3He ПЧД $600 \times 600 \text{ мм}^2$	2 ПЧД ^3He

на КИН, расчетный поток нейтронов Φ в позиции образца не уступает по своим значениям потоку Φ на реакторах средней мощности и импульсных источниках, например импульсный реактор ИБР-2 в ОИЯИ [18]. Возникает вопрос: почему ИБР-2, мощностью в 2 МВт и потоком в модераторе тепловых нейтронов в импульсе $8 \cdot 10^{15} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, обеспечивает такой же поток нейтронов на образце, как и компактный источник нейтронов типа DARIA с расчетной плотность потока нейтронов в замедлителе в импульсе лишь $8 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$? Оказывается, компактные источники нейтронов выигрывают своих гораздо более мощных “собратьев” по эффективности производства и доставки нейтронов теплового и холодного спектра к образцу. Покажем это.

Первое, произведение частоты f на длительность τ нейтронного импульса дает средний по времени рабочий параметр для источника нейтронов — коэффициент заполнения. В случае импульсного источника ИБР-2 $cf = 5 \text{ Гц}$ и $\tau = 320 \text{ мкс}$, коэффициент заполнения равен 0.0016, т.е. 0.16% времени работает источник ИБР-2. В случае компактного импульсного источника DARIA для различных типов приборов f меняется от 40 до 160 Гц и τ от 30 до 400 мкс, и во всех случаях коэффициент заполнения не меньше, чем 0.01, что в 8–10 раз больше, чем для ИБР-2. Таким образом, нужно сопоставлять средний поток нейтронов на ИБР-2 $\Phi = 1.3 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ со средним потоком в модераторе КИН DARIA, равным $1.6 \cdot 10^{11} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Второе, при рассмотрении сечения S нейтронывыводящего канала и расстояния h между фланцем канала и поверхностью модератора оказывается, что на источнике ИБР-2 ($h = 5 \text{ м}$, $S = 10 \times 10 \text{ см}^2$) в канал попадает $\Phi \cdot 10^{-4} \text{ н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$. В случае с КИН DARIA ($h = 0.1 \text{ м}$, $S = 3 \times 3 \text{ см}^2$) в канал нейтронвода попадает, $\Phi \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$, что в сотни раз больше, чем на ИБР-2. Следовательно, средние потоки нейтронов в каналах на ИБР-2 и КИН DARIA равны $10^9 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, т.е. эффективность захвата нейтронов на 2 порядка выше в случае КИН. Не следует при этом забывать, что случае КИН заметная доля захваченных нейтронов имеет большую расходимость (порядка 0.3 рад), чем необходимо для нейтронной установки, и поэтому будет отброшена сначала нейтронводами, а затем и коллимационной системой.

Третье, плотность потока нейтронов на образце зависит от длины времяпролетной базы, обеспечивающей разрешение по времени, и от коллимации, обеспечивающей разрешение по углу рассеяния. В нейтронводе среднего качества тепловой пучок нейтронов теряет несколько процентов интенсивности на каждый метр нейтронвода. Если, к примеру, пролетная база рефлектометра на КИН DARIA равна 8 м, а пролетная база ре-

флектометра РЕМУР на ИБР-2 равна 30 м (табл. 2), то плотность потока нейтронов Φ на образце на рефлектометре КИН DARIA превышает Φ на РЕМУР на порядок, что и отражено в табл. 2. Геометрическое расположения нейтронной установки не столь значительно влияет на поток нейтронов на образце, в сравнении с коллимацией пучка. Установки МУРН и дифрактометры на КИН DARIA и на источнике ИБР-2 по своим параметрам одинаковы, поэтому и потоки нейтронов на образце Φ оказываются одинаковыми, порядка 10^6 – $10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Не следует при этом забывать, нейтронные источники среднего класса обеспечивают работу одновременно десяткам установок. Например, на ИБР-2 работает 16 нейтронных установок разного типа и назначения.

На компактном источнике нейтронов число установок, “питающихся” нейтронами от одного источника, ограничено 3–4 приборами из-за компактности мишени и замедлителя нейтронов (10^3 см^3). Но, в отличие от импульсного реактора средней мощности, работающего на одной частоте f и одной длительности τ нейтронного импульса, что вынуждает проектировать и строить нейтронные станции под компромиссные значения f и τ , а не под оптимальные, 3–4 прибора на КИН DARIA работают на нейтронных импульсах с подстраиваемой и оптимальной частотой и длительностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены концепции, принципиальные схемы и параметры для трех нейтронных времяпролетных установок компактного источника нейтронов DARIA: порошковый дифрактометр, рефлектометр поляризованных нейтронов и установка малоуглового рассеяния нейтронов. Экспериментальные установки, оптимизированы по диапазону переданных импульсов, инструментальному разрешению, а также по частоте повторения и длительности нейтронных импульсов. Показано, что компактные источники нейтронов на 3 порядка выигрывают своих гораздо более мощных “собратьев” по эффективности производства и доставки нейтронов теплового и холодного спектра к образцу. Как показывает численное моделирование, расчетный поток нейтронов Φ в позиции образца на компактном источнике нейтронов не уступает по своим значениям потокам нейтронов Φ на реакторах средней мощности и импульсных источниках, типа ИБР-2 в ОИЯИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолже-

ние Соглашения No. 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Silverman I., Arenshtam A., Berkovits D. et al. // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1962. Art. No. 020002.
2. Furusaka M., Sato H., Kamiyama T. et al. // Phys. Procedia. 2014. V. 60. P. 167.
3. Beyer R., Birgersson E., Elekes Z. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2013. V. 723. Art. No. 151.
4. Kobayashi T., Ikeda Sh., Otake Y. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2021. V. 994. Art. No. 165091.
5. Baxter D. // Eur. Phys. J. Plus. 2016. V. 131. P. 83.
6. Ene D., Borcea C., Flaska M. et al. // Proc. Int. Conf. ND 2007. (Nice, 2007). Art. No. 106.
7. Wei J., Chen H.B., Huang W.H. et al. // Proc. PAC09. (Vancouver, 2009). P. 1.
8. Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 824; Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 748.
9. Павлов К.А., Коник П.И., Коваленко Н.А. и др. // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 1. С. 5.
10. Niita K., Sato T., Iwase H. et al. // Radiat. Meas. 2006. V. 41. No. 9–10. P. 1080.
11. Lefmann K., Nielsen N.K. // Neutron News. 1999. V. 10. No. 3. P. 20.
12. Сыромятников В.Г., Григорьева Н.А., Григорьев С.В. // Поверхность. Рентген., синхротрон., нейтрон. иссл. 2023. № 7. С. 93.
13. Москвин Е.В., Григорьева Н.А., Коваленко Н.А., Григорьев С.В. // Поверхность. Рентген., синхротрон., нейтрон. иссл. 2023. № 7. С. 77.
14. Павлов К.А., Коваленко Н.А., Азарова Л.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротрон., нейтрон. иссл. 2023. № 7. С. 84.
15. Барабин С.В., Кропачев Г.Н., Лукашин А.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 10. С. 7.
16. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. // J. Surf. Invest. X-ray. Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. No. 6. P. 1126.
17. Subbotina V.V., Pavlov K.A., Kovalenko N.A. et al. // NIMAER A. 2021. V. 1008. Art. No. 165462.
18. <http://flnph.jinr.ru/ru/facilities/ibr-2/instruments>.
19. Grigoriev S.V., Runov V.V., Okorokov A.I. // NIMAER A. 1997. V. 384. No. 2–3. Art. No. 451.
20. Syromyatnikov V.G., Ulyanov V.A., Lauter V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 528. Art. No. 012021.
21. Кащук А.П., Левицкая О.В. // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 4. С. 519.
22. Мешков И.В., Поташев С.И., Афонин А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 4. С. 497; Meshkov I.V., Kuznetsov S.P., Potashev S.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 382.

Neutron facilities of the compact neutron source DARIA: parameters and features

S. V. Grigoriev^{a, b, *}, N. A. Kovalenko^b, K. A. Pavlov^{a, b}, E. V. Moskvina^{a, b},
V. G. Syromyatnikov^{a, b}, N. A. Grigoryeva^a

^aSt. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

^bKonstantinov Petersburg Institute of Nuclear Physics, National Research Center “Kurchatov Institute”,
Gatchina, 188300 Russia

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

The compact neutron source DARIA based on a linear proton accelerator is designed to create neutron beams for a diffractometer, a reflectometer, and a small-angle scattering setup. The experimental setups are optimized in terms of the range of momentum transfer, instrumental resolution, geometric dimensions, as well as in terms of the repetition rate and duration of neutron pulses.

Keywords: neutron diffraction, neutron reflectometry, small-angle neutron scattering, compact neutron source