

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Компактный источник нейтронов DARIA в стратегии развития нейтронных исследований

Т.В. Кулевой, С.В. Григорьев, Н.А. Коваленко, К.А. Павлов, Е.В. Москвин,
Н.А. Григорьева, Е.А. Кравцов, В.А. Скалыга, И.В. Изотов, Г.Н. Кропачев,
А.Л. Ситников, Н.В. Мушников, Л.В. Кравчук

К настоящему времени разработаны научные и технологические основы российского компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Applications) на основе линейного протонного ускорителя с энергией 13 МэВ. Источник DARIA предназначен для создания пучков тепловых и холодных нейтронов для нейтронных установок. На базе проекта DARIA предлагается стратегия развития импульсных источников нейтронов: 1) мультиплицирование источника DARIA в части углублённой специализации нейтронных установок, 2) увеличение мощности источника DARIA до энергии протонов 30–70 МэВ, 3) разработка высокопоточного импульсного источника нейтронов на базе высокоинтенсивного, высокоэнергетического (до 1 ГэВ) ускорителя протонов и каскадно-испарительной реакции.

Ключевые слова: компактный источник нейтронов, протонный ускоритель, мишенная сборка, тепловые нейтроны, дифракция, рефлектометрия, малоугловое рассеяние нейтронов

PACS numbers: 01.10.Hx, 07.07.–a, 07.77.Ka, 07.90.+c,
28.20.Cz, 28.50.Dr, 29.25.Dz

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2026.03.040107>

Содержание

1. Введение (388).
2. Компактный источник нейтронов DARIA (389).

Т.В. Кулевой⁽¹⁾, С.В. Григорьев^(2,3,*), Н.А. Коваленко^(2,3),
К.А. Павлов^(2,3), Е.В. Москвин^(2,3), Н.А. Григорьева⁽⁴⁾,
Е.А. Кравцов⁽⁴⁾, В.А. Скалыга⁽⁵⁾, И.В. Изотов⁽⁵⁾, Г.Н. Кропачев⁽¹⁾,
А.Л. Ситников⁽¹⁾, Н.В. Мушников⁽⁴⁾, Л.В. Кравчук⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Национальный исследовательский центр

"Курчатовский институт",

пл. Академика Курчатова 1, 123098 Москва,

Российская Федерация

⁽²⁾ Санкт-Петербургский государственный университет,

Университетская набережная 7-9, 199034 Санкт-Петербург,

Российская Федерация

⁽³⁾ Национальный исследовательский центр

"Курчатовский институт",

ФБГУ Петербургский институт ядерной физики

им. Б.П. Константинова,

Орлова роща 1, 188300 Гатчина, Ленинградская обл.,

Российская Федерация

⁽⁴⁾ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева

Уральского отделения Российской академии наук,

ул. С. Ковалевской 18, 620137 Екатеринбург,

Российская Федерация

⁽⁵⁾ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,

ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород,

Российская Федерация

⁽⁶⁾ Институт ядерных исследований Российской академии наук,

просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация

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

Статья поступила 22 января 2026 г.

3. Разработка серии специализированных компактных источников проекта DARIA (392).

3.1. Кристаллография и магнетизм — физика твёрдого тела.

3.2. Биология, химия, физика полимеров. 3.3. Прикладные исследования с нейтронным излучением.

4. Разработка компактного источника нейтронов средней мощности (396).

5. Разработка российского высокоэнергетического импульсного источника нейтронов на базе протонного ускорителя (397).

6. Источник нейтронов на реакции каскадно-испарительного типа (Russian Spallation Neutron Source — RuSNS) (399).

7. Заключение (400).

Список литературы (401).

1. Введение

В настоящее время в мировом научном сообществе возник устойчивый интерес к разработке и созданию относительно недорогих источников нейтронов малой и средней мощности на базе импульсных ионных ускорителей. В таких источниках бериллиевая или литиевая мишень последовательно окружена замедлителем нейтронов, вылетевших из мишени, отражателем и нейтронноводной системой, обеспечивающей транспорт нейтронов от замедлителя до экспериментальных установок (исследовательских инструментов). Нейтронноводная система позволяет разместить несколько нейтронных установок на одной мишени. Предполагается, что использование компактных источников заметно повысит доступность нейтронных методик, и сделает нейтронное

рассеяние рутинным методом исследования конденсированных сред на атомном и нано уровне.

Под Компактным Источником Нейтронов (КИН) понимают источники нейтронов малой и средней мощности, работающие на базе импульсных ионных или электронных ускорителей и достигающие интенсивности нейтронного потока с мишени до 10^{14} н с^{-1} [1]. 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 (вода или полимеры, содержащие большое количество атомов водорода) для термализации полученных нейтронов, что обеспечивает на выходе мишенной сборки (например, на бериллиевой мишени) средний поток в пучке тепловых нейтронов Φ на уровне около 10^{12} н с^{-1} см^{-2} . Если минимизировать потери при транспортировке нейтронов до исследуемого образца, такой поток нейтронов будет достаточен для проведения дифракционных, рефлектометрических, малоугловых и радиографических исследований.

Компактный источник нейтронов изначально уступает несколько порядков нейтронного потока большому источнику ускорительного типа на основе каскадно-испарительной реакции или высокопоточному ядерному реактору. Однако, значительная часть этих потерь может быть компенсирована 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 (или стационарных) реакторов мощностью в десятки МВт составляет $\Phi = 10^{14}$ н с^{-1} см^{-2} , тогда как средняя плотность потока тепловых нейтронов для прототипа КИН DARIA, составляет $\Phi = 10^{12}$ н с^{-1} см^{-2} . При сравнении потоков Φ на узле образца также следует учитывать, что из общего потока нейтронов для каждой конкретной установки нейтронного рассеяния на стационарных реакторах вырезается узкая спектральная линия, т.е. из потока выбрасывается от 90 до 99% нейтронов. В случае же с импульсными источниками — примером которого является компактный источник нейтронов — практически все нейтроны в импульсе используются в исследовании, поскольку рассеянные на образце нейтроны регистрируются по времяпролётной методике в широком спектральном диапазоне по длине волны.

Существующие и проектируемые импульсные источники нейтронов можно условно разделить на два класса. Первый класс — компактные источники "университетского" типа, которые предназначены для рутинных экспериментов и стандартизованных научных исследований, не требующих высокой светосилы. Они предполагают развитие и отработку новых нейтронных методик, а также знакомство студентов с нейтронным рассеянием. Ко второму классу относятся источники средней и высокой мощности, которые не уступают, а иногда и превосходят, современные стационарные реакторы средней и большой мощности по такому параметру, как поток нейтронов на нейтронных станциях. Подобные источники используют как высокопродуктивные центры коллективного пользования.

На волне всемирного интереса к компактным источникам нейтронов предложена российская версия такого источника — проект DARIA. КИН DARIA, разработан-

ный для прикладных исследований и применения в промышленности, оснащён тремя времяпролётными нейтронными установками: дифрактометр нейтронов, рефлектометр нейтронов и установка малоуглового рассеяния нейтронов [2].

Можно выделить три направления в развитии источников нейтронов на базе проекта КИН DARIA. Первое направление — мультиплицирование источника DARIA в части углублённой специализации нейтронных установок при соответствующей модернизации и доработке мишенной сборки, но сохранении параметров протонного ускорителя с энергией 13 МэВ. Второе — увеличение мощности источника DARIA до энергии протонов 30–70 МэВ за счёт модернизации ускорителя протонов с заменой материала мишени на тантал. Это позволит расширить число и специфику нейтронных установок. Третье — разработка высокопоточного импульсного источника нейтронов на базе высокоточного, высокоэнергетического (до 1 ГэВ) ускорителя протонов и реакции каскадно-испарительного типа (так называемый источник типа SNS — Spallation Neutron Source). Третье направление требует существенного развития технологических решений, в части протонного ускорителя и мишенной сборки, при сохранении общей идеологии в проектировании, строительстве и эксплуатации нейтронных станций.

В работе обсуждаются варианты разработки новых импульсных нейтронных источников как в плане расширения концепции компактных источников нейтронов на различные отрасли науки и технологии, так и в плане перехода к более масштабным проектам высокоэнергетических импульсных источников на базе низкоэнергетических ядерных реакций или на базе каскадно-испарительной реакции.

2. Компактный источник нейтронов DARIA

В 2021–2024 гг. в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. была разработана концепция компактного источника нейтронов на основе линейного ускорителя протонов, получившего название DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Applications). Были проведены расчёты, оптимизированы параметры ускорителя, и на их базе предложены технологии изготовления, а также созданы полномасштабные макеты ключевых элементов ускорителя, которые закладывают основу для создания нейтронной установки класса мегасайенс [2, 3]. Основополагающей целью проекта является создание серийного компактного источника нейтронов для научных и образовательных центров Российской Федерации для исследовательской инфраструктуры, охватывающей всю территорию страны. Очевидным, но не единственным, преимуществом КИН перед реакторами является возможность его размещения на площадке любого научного центра или университета.

В базовой конфигурации линейный ускоритель должен обеспечить ускорение пучка протонов до энергии 13 МэВ с током 100 мА в импульсном режиме с длительностью импульса 100 мкс и частотой следования импульсов 100 имп с^{-1} . Предусматривается также возможность повышения энергии ускоренного пучка до 30 МэВ, а в специальных случаях и до 70 МэВ. Ускоренный пучок протонов на энергии 13 МэВ при взаимодей-

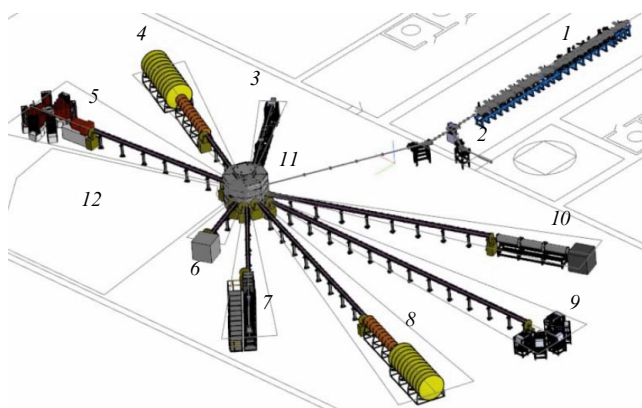


Рис. 1. Концептуальная схема расположения оборудования и узлов компактного источника нейтронов DARIA. 1 — источник и линейный ускоритель протонов, 2 — станция для работы с протонным пучком, 3 — рефлектометр на холодном замедлителе, 4 — установка малоуглового рассеяния нейтронов на холодном замедлителе, 5 — дифрактометр на холодном замедлителе, 6 — установка нейтронно-активационного анализа, 7 — рефлектометр на тепловом замедлителе, 8 — установка малоуглового рассеяния нейтронов на тепловом замедлителе, 9 — стресс-дифрактометр на тепловом замедлителе, 10 — установка томографических и радиографических исследований, 11 — мишенная сборка с биологической защитой, 12 — закрытая зона обслуживания мишенной сборки.

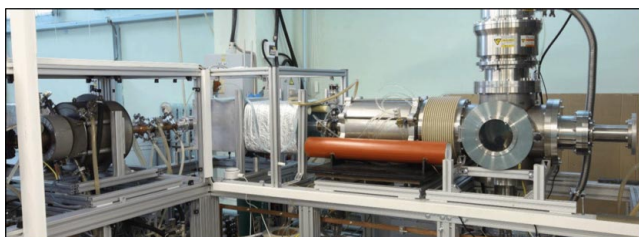


Рис. 2. Фотография газодинамического ЭЦР источника GISMO (ИПФ РАН).

ствии с бериллиевой мишенью обеспечивает генерацию нейтронного потока, сопоставимого с потоками на исследовательских реакторах малой и средней мощности. Каждый такой компактный источник нейтронов оснащается исследовательскими станциями под конкретные запросы научного центра, где этот источник будет установлен.

На рисунке 1 представлено пространственное расположение оборудования и узлов компактного источника нейтронов DARIA.

Институт Прикладной Физики РАН разработал для проекта DARIA уникальный газодинамический ионный источник на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР-источник) GISMO (рис. 2) генерирующий пучок протонов с током более 130 мА, как в импульсном режиме (100 мкс, 100 имп с⁻¹), так и в непрерывном [4, 5].

Особенностью данного источника является то, что генерируемый пучок практически на 100 % состоит из протонов. Поэтому не требуется сепарация пучка перед инъекцией в ускоряющую структуру ПOKФ/RFQ, достаточно системы согласования эмиттанса пучка с акцептансом ПOKФ/RFQ. Такой подход позволяет минимизировать продольный размер канала согласования, в котором влияние собственного объёмного заряда высокоинтенсивного пучка на рост его эмиттанса наиболее критично [6].

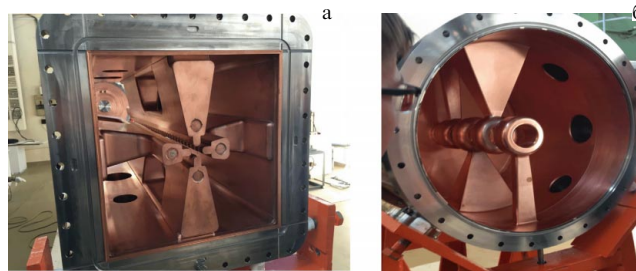


Рис. 3. Фотографии полномасштабных макетов (а) секция резонатора ПOKФ/RFQ и (б) секция резонатора PTД/DTL линейного ускорителя компактного источника нейтронов DARIA.

Линейный ускоритель протонов для проекта DARIA состоит из начальной ускоряющей части — резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПOKФ, английская аббревиатура — RFQ) (рис. 3а) и основной части с малогазорными резонаторами с трубками дрейфа (PTД, английская аббревиатура — DTL) (рис. 3б). ПOKФ/RFQ [7] и PTД/DTL [8] разработаны для работы в режиме малой скважности, вплоть до непрерывного. В резонаторах ПOKФ/RFQ сформированный ускоряющий канал обеспечивает захват протонов не менее 99 % пучка. Не захваченные в ускорение частицы проходят ПOKФ/RFQ насквозь, что позволяет избежать возникновения высокочастотного пробоя при их утилизации. При этом, из-за относительно низкой энергии протонов порядка 3 МэВ исключается возникновение наведённой радиоактивности [3]. Последующее ускорение в резонаторах PTД/DTL проходит при 100 % захвате протонов в пучке.

Для высокочастотного питания ускоряющих резонаторов используются твердотельные усилители (ТТУ) мощности [9]. Для фокусировки пучка между резонаторами устанавливаются гибридные квадрупольные линзы, где основное поле создаётся постоянными магнитами, а вариации поля осуществляются небольшими катушками с током, создающими дополнительное электромагнитное поле [10].

Ускоряющий протонный тракт, находящийся под высоким вакуумом, заканчивается пластинкой мишени, соударяясь с которой протоны выбивают нейтроны. Проект мишенной сборки представлен на рис. 4. Интенсивность пучка нейтронов зависит как от тока и энергии налетающих протонов (1), так и от материала и конструкции мишени (2). Из сравнения значений энергии связи нейтронов в ядре, температуры плавления, среднего коэффициента теплопроводности и коэффициента диффузии водорода в различных материалах мишени, для проекта DARIA была выбрана бериллиевая мишень [11–13]. Ускоренный протонный пучок высокой светосилы с частотой до 100 имп с⁻¹ падает на бериллиевую мишень и благодаря низкоэнергетической ядерной реакции ⁹Be(p, n) с мишени выбиваются быстрые нейтроны со средним потоком $\Phi = 2 \times 10^{13}$ нс⁻¹. Для получения максимально возможного потока тепловых нейтронов достаточного для исследований в физике конденсированного состояния при умеренном выделении тепла [14, 15] проведено моделирование мишенной сборки КИН DARIA методом Монте-Карло в программном пакете PHITS [16]. Энергия протонов в КИН DARIA ограничена сверху < 13 МэВ из-за нежелательной генерации трития в мишени бериллия при больших энергиях протонов.

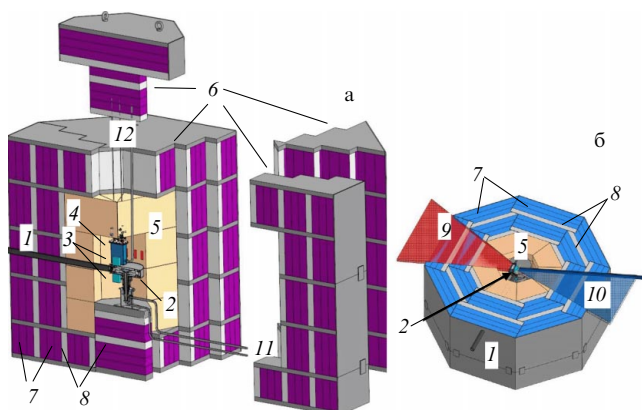


Рис. 4. (а) Проект мишени сборки с разборными секциями биологической защиты компактного источника нейтронов DARIA. (б) Поперечный срез мишени сборки на уровне выводящих нейтронных каналов. Канал ввода протонного пучка (1), мишень (2) с тепловым (3) и холодным (4) замедлителями нейтронов, отражатель нейтронов (5), сегменты биологической защиты (6) из борированного полиэтилена (7) со свинцовыми вставками (8), каналы вывода нейтронных пучков с поверхности теплового (9) и криогенного (10) замедлителей, система охлаждения мишени (11), система охлаждения камеры криогенного замедлителя (12).

Компромисс между яркостью источника и плотностью тепловой нагрузки задаёт радиус мишени порядка 2,5 см, что даёт площадь 19,6 см². А заданная энергия протонов определяет толщину мишени ((2) на рис. 4), которая для КИН DARIA не должна превышать 1,1 мм, потому что (i) при толщине бериллия от 0,85 до 1,10 мм сечение взаимодействия протонов с ядром Ве почти удваивается по сравнению со средним значением, (ii) пик Брэгга в выделении энергии протонов в бериллии располагается за пределами 1,1 мм толщины мишени. Такая геометрия приводит к выделению энергии в 28,34 кВт на мишени, или 1,42 кВт см⁻², при заданных параметрах источника протонов (пиковый ток 100 мА при коэффициенте заполнения на мишени на 28,8 % при потере всего 1,8 % от максимального нейтронного потока [11, 12]. Для обеспечения теплосъёма с такой мишени можно использовать мини/микроканальное охлаждение [17] ((11) на рис. 4).

Для получения тепловых нейтронов, используемых для исследований в физике конденсированного состояния, бериллиевую мишень окружают полиэтиленовым предзамедлителем (10 × 10 × 10 см³) ((3) на рис. 4). Для улучшения статистики экспериментов в области меньших значений переданного импульса (больших длин волн нейтронов) путём перераспределения спектра нейтронного пучка используют холодный замедлитель ((4) на рис. 4). Наиболее простым и надёжным вариантом холодного (криогенного) замедлителя для КИН DARIA оказался замедлитель на основе мезитилена (рис. 5 [18]) толщиной 1,5 см и площадью поверхности соответствующей размерам (i) теплового предзамедлителя и (ii) сечениям выводящих нейтронных каналов (каналов 6 на рис. 5). Плотность потока холодных нейтронов в импульсе на поверхности криогенного замедлителя достигает $\Phi = 8,3 \times 10^{11}$ н см⁻² с⁻¹ с равномерным распределением спектральной плотности потока нейтронов. Поток нейтронов после прохождения через холодный замедлитель характеризуется длительностью нейтронного импульса (вспышки) τ не менее 100 мкс и частотой сле-

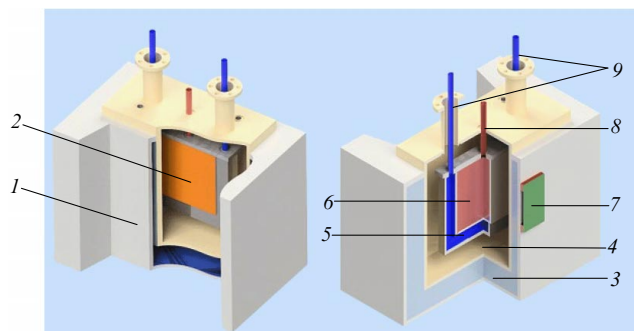


Рис. 5. Вариант криогенного замедлителя для КИН DARIA: 1, 3 — тепловой предзамедлитель, 2 — криогенный мезитиленовый замедлитель, 4 — высоковакуумная полость, 5, 9 — полость охлаждения с трубопроводами подвода и отвода газообразного гелия, 6 — камера с мезитиленом, 7 — мишень из Ве, 8 — трубка для залива мезитилена.

дования нейтронных импульсов f от нескольких десятков до 100 Гц.

Отражатель ((5) на рис. 4) вокруг замедлителей нейтронов и каналов ((9), (10) на рис. 4), выводящих нейтронный пучок из мишени, уменьшает потери нейтронов в мишени сборке. Основными предпосылками для выбора материала отражателя являются максимальное альbedo тепловых нейтронов, минимальное сечение поглощения и длина диффузии, которые также должны обеспечивать минимальный размер отражателя. Расчёты показали, что свинец, графит и бериллий наиболее подходящие материалы для отражателя в КИН DARIA.

Малые размеры мишени сборки, позволяют устраивать компактную биологическую защиту ((6) на рис. 4). Биологическая защита выполнена из слоёв борированного полиэтилена ПБ-5 (массовое содержание В₄С 5 %) ((7) на рис. 4) и свинца марки С1 ((8) на рис. 4). Общая толщина радиационной защиты 80 см: 25 см свинца и 55 см полиэтилена. Подобная конструкция позволяет понизить уровень радиационной дозы на внешней поверхности мишени сборки до допустимых 10 мкЗв ч⁻¹. Мишени сборка имеет гексагональную форму и шесть каналов вывода нейтронного пучка ((9), (10) на рис. 4), три из которых направлены на поверхность теплового предзамедлителя нейтронов, а оставшиеся три — на поверхность камеры мезитиленового криогенного замедлителя. В общей сложности сборка состоит из восьми крупных сегментов, семь из которых являются разборными, что позволяет быстро заменять выработанные компоненты мишени устройства и в перспективе открывает возможности для масштабирования конструкции под большее число нейтронных инструментов.

При указанных выше параметрах протонного ускорителя и мишени можно добиться плотности потока тепловых нейтронов в импульсе до $\Phi = 5 \times 10^{12}$ н см⁻² с⁻¹ и холодных нейтронов $\Phi = 8,3 \times 10^{11}$ н см⁻² с⁻¹. Нейтронные установки для исследований в физике конденсированного состояния оптимизировались совместно с соответствующими им замедлителями нейтронов (тепловым или криогенным). Моделирование нейтронных систем и нейтронных установок проводилось методом Монте-Карло в программном пакете McStas [19]. Параметры нейтронных установок и потоки нейтронов Φ в позиции образца представлены в статьях [20–25].

3. Разработка серии специализированных компактных источников проекта DARIA

Первое направление в стратегии развития импульсных источников нейтронов на базе КИН DARIA состоит в мультиплицировании источника для углубленной специализации нейтронных установок. Рассматриваются три области исследований: физика твёрдого тела, науки о жизни (биология, физика и химия полимеров) и прикладные исследования. Как уже отмечалось выше, технические характеристики импульсного источника протонов и узлов ускорителя вполне отвечают требованиям всех трёх областей, но в части параметров мишенной сборки и набора исследовательских нейтронных станций эти требования различны. Нейтронные станции можно разделить по типу взаимодействия нейтронов с исследуемым объектом: нейтроны рассеиваются проходя через объект — дифрактометры, рефлектометры, малоугловые установки, нейтроны поглощаются внутри объекта — нейтронная радиография и томография, нейтрон-активационный анализ.

3.1. Кристаллография и магнетизм — физика твёрдого тела

Исследования в области физики твёрдого тела с акцентом на кристаллографию и магнетизм требуют создания нейтронных дифрактометров (в том числе монокристалльных), установок малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и рефлектометров поляризованных нейтронов с позиционно-чувствительными детекторами нейтронов. Узлы окружения образца на таких приборах оборудованы гониометрическими головками, сверхпроводящими магнитами, рефрижераторами для исследований в области низких температур и печами широкого температурного диапазона.

Приборы для порошковой дифракции служат "рабочими лошадками" в нейтронной дифракции. В рамках проекта DARIA предложена конструкция базового порошкового дифрактометра, расположенного на холодном источнике нейтронов. Его ключевые параметры оптимизированы для баланса между потоком нейтронов и разрешением: длительность импульса $\tau = 30$ мкс, частота повторения импульсов $f = 40$ Гц, времяпролётная база 24 м, расстояние источник-образец 22,5 м и расстояние образец – детектор 1,5 м [20, 21]. Такие параметры обеспечивают полезную полосу пропускания от 1 Å до 5 Å с пространственным разрешением $\Delta d/d = 0,005$ (0,5 %) и поток на образце $\Phi = 5 \times 10^6$ н см⁻² с⁻¹.

В зависимости от научной задачи, в дифрактометрах требуется либо высокая интенсивность, либо высокое разрешение. Высокая интенсивность достигается за счёт увеличения длительности импульса, полосы пропускания, и частоты импульсов, а также за счёт большого покрытия пространства детекторами ($\sim 2\pi$ стерадиан). Для определения атомных и магнитных структур, фазового состава, параметров решётки и тонких структурных искажений в многофазных структурах и композиционных материалах необходимо разрешение перекрывающихся дифракционных пиков, реализуемое в дифрактометрах высокого разрешения. Высокое разрешение достигается увеличением пролётной базы и/или уменьшением частоты и длительности импульсов.

В обзоре [26] представлен широкий спектр задач дифракции нейтронов на импульсных источниках нейтро-

нов. Опираясь на опыт Лаборатории нейтронной физики им. И.Ф. Франка Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) в разработке, строительстве и эксплуатации времяпролётных дифрактометров можно выделить наиболее перспективные направления для физики твёрдого тела, такие как Фурье дифрактометрия, нейтронография в реальном времени, дифракция на микрообразцах при высоком давлении [27].

Принципиальная схема установки МУРН для компактного источника нейтронов описана авторами в работах [20, 22, 23]. Установка сконструирована на основе метода времени пролёта на базе в 15 м, использует нейтронные импульсы длительностью 400–500 мкс с частотой повторения 40 Гц и пучок сечением 30×30 мм². Поскольку подавляющее число задач в современных твердотельных исследованиях на наномасштабе лежат в области физики магнетизма, специализированная установка МУРН в первую очередь должна быть оснащена соответствующей системой окружения образца — криомагнитом на максимально возможное магнитное поле и минимально возможную температуру — и детектором с двумерным пространственным разрешением, так как огромное количество современных задач нацелено на исследование анизотропных систем, соответственно с угловой анизотропией в рассеянии нейтронов. Обязательными элементами установки является наличие поляризатора нейтронов с эффективностью не менее 95 % и спин-флиппера с эффективностью 99 % во всем диапазоне используемых длин волн, так как логика исследования магнитных наносистем требует постоянного анализа поляризации/деполяризации прошедшего через образец пучка нейтронов.

Набор задач, решаемых на такой установке для физики магнетизма, включает в себя весь спектр: от ферромагнетиков (искусственные наноструктуры, ферромагнитные включения в немагнитной матрице, критические флуктуации вблизи фазовых переходов и т.п. [28–31]) через сложные магнитные наноструктуры (геликоиды Дзялошинского–Мории, скирмионные решётки, солитонные решётки, обменные спирали и т.п. [32, 33]) до вихрей Абрикосова в сверхпроводниках (сверхпроводящие металлы, высокотемпературные сверхпроводники, и т.д.).

Рефлектометрия поляризованных нейтронов используется как прецизионный и неразрушающий метод для исследования ядерного профиля и магнитных свойств (намагниченность, магнитное упорядочения слоёв во внешнем магнитном поле) поверхностей, межслойных границ, многослойных систем и тонких плёнок [34–36]. Как и для установки малоуглового рассеяния нейтронов, в принципиальной схеме нейтронного рефлектометра для исследования в области физики магнетизма перед образцом необходимо установить поляризатор нейтронов с эффективностью не менее 95 % [37] и спин-флиппер с эффективностью 99 % [38] во всем диапазоне используемых длин волн. Если логика исследования магнитных систем требует анализа поляризации прошедшего через объект нейтронного пучка, тогда после образца необходимо установить второй спин-флиппер и анализатор [39]. Модель рефлектометра с горизонтальным углом отражения разработана, оптимизирована и описана авторами в статьях [20, 25]. Рефлектометр устанавливается на мишенной сборке с составным замедлителем (полиэтиленовый предзамедлитель и мезитиленовый криогенный

замедлитель) и работает на тепловых и холодных нейтронах с λ от 0,5 до 12 Å по времяпролётной методике с фиксированным углом скольжения. Длина пролётной базы $L = 14$ м, длительность импульса $\tau = 150$ мкс. Доступны два рабочих спектральных диапазона нейтронного излучения $\delta\lambda = 6$ и 3 Å. Трёхдисковый прерыватель задаёт частоту нейтронного импульса $f_n = 80$ Гц ($\delta\lambda = 3$ Å) или $f_n = 40$ Гц ($\delta\lambda = 6$ Å). Изменение диапазона длин волн нейтронов $\delta\lambda$ с 6 Å до 3 Å, увеличивает светосилу рефлектометра в два раза. В зависимости от научной задачи, величину угла скольжения θ можно менять от десятков минут до единиц градусов: $\theta \approx 1,5$ –6,0 мрад соответствует отражению нейтронов в области до критического угла отражения $\theta_{кр}$; $\theta > 11,5$ мрад соответствует отражению нейтронов в области после критического угла. Разрешение по переданному импульсу составляет величину $\Delta Q/Q \leq 5\%$ для углов отражения больших, чем критический угол. Горизонтальная расходимость нейтронного пучка установлена так, что $\Delta\theta \leq 0,033^\circ$ при $\theta < \theta_{кр}$ и $\Delta\theta \leq 0,1^\circ$ при $\theta > \theta_{кр}$. Коэффициент заполнения импульсной последовательности источника протонов составляет $D = 0,012$.

Метод рефлектометрии поляризованных нейтронов решает широкий круг задач. Например, считывающая головка жесткого диска имеет слоистую структуру и состоит из нескольких ферромагнитных, антиферромагнитных и немагнитных слоёв. Существует два типа ферромагнитных слоёв: свободный слой и закреплённый слой. Свободное вращение ферромагнитных моментов в свободном слое и стабильное закрепление моментов в закреплённых слоях необходимы для работы считывающей головки датчика. Следовательно, при разработке высокопроизводительных датчиков считывания необходимо получить информацию о намагниченности в каждом слое и о детальной магнитной структуре вблизи интерфейса между закреплённым и антиферромагнитными слоями [40].

Многослойную или однослойную организацию имеют магнито- и спинтронные структуры: обменно-связанные магнитные сверхрешётки, обменные пружинные клапаны между магнитомягкими и магнитожёсткими плёнками, магнитные полупроводники, ферромагнитные плёнки, сверхрешётки из сплавов Гейслера, магниторезистивные устройства. Всё это материалы, в исследовании которых важную, а иногда определяющую роль играет рефлектометрия поляризованных нейтронов [41–46].

3.2. Биология, химия, физика полимеров

Исследования в области биофизики, физики полимеров и химии требуют иной специализации и иной конфигурации тех же самых приборов: дифрактометров, рефлектометров и установок МУРН, поскольку объекты исследования характеризуются беспорядком в периодической структуре, фрактальными законами шкалирования, или уникальным расположением атомов в пространстве молекулы.

В области дифрактометрических исследований развиваются два типа дифрактометров: дифрактометры для белковой кристаллографии и дифрактометры полного рассеяния для измерения парной корреляционной функции [47–50]. Конструкция нейтронного дифрактометра для белковой кристаллографии представляет собой компромисс между разрешением, достигаемым за счёт боль-

шой длины пролёта нейтронов до образца и большого расстояния от образца до детектора, и интенсивностью, достигаемой за счёт фокусирующей оптики и использования холодного замедлителя. Ключевая цель — добиться достаточного потока нейтронов на образце для работы с кристаллами объёмом $< 0,01$ мм³ и при этом сохранить возможность разделять пики от гигантских белковых комплексов или мембранных белков с постоянными решётки до 250–300 Å.

На дифрактометрах полного рассеяния получают данные как о Брэгговском рассеянии (средняя структура), так и о диффузном рассеянии (локальная структура) на порошковых или поликристаллических образцах. Это требует не только максимально широкого диапазона по Q и рекордного разрешения по переданному импульсу $\Delta Q/Q$, но и очень хорошего временного разрешения (короткие импульсы) и высокого потока нейтронов (особенно с короткими длинами волн). Поэтому нейтронный пучок от замедлителя проводят через сложную систему нейтронпроводов и чопперов для доставки до образца коротковолновых нейтронов и для подавления фона. А после образца дополнительно устанавливают детекторные системы в области обратного рассеяния, где достигается наилучшее разрешение.

Главная задача нейтронной кристаллографии белков — извлечение информации о водородной связи — одного из важнейших взаимодействий, определяющего не только кристаллическую структуру белков [51–53], но и состояния протонирования боковых цепей аминокислот [54, 55], электростатику связывания лигандов [56], координацию растворителя [57] и т.д.

Исследования на установке МУРН для физики полимеров и биологии сфокусированы на изотропных системах — макромолекулах и наночастицах в растворах различных жидкостей на основе воды (см. недавний обзор работ на установке ЮМО, расположенной на реакторе ИБР-2, ОИЯИ [58] и книгу М.В. Авдеева "Введение в малоугловое рассеяние нейтронов" [59]). Малоугловое рассеяние нейтронов используется в изучении широкого класса слабоупорядоченных систем (мягкой материи), которые характеризуются специфическими свойствами из-за наличия в их структуре неоднородностей на масштабе 1–100 нм. Этот масштаб занимает особое место в современных исследованиях конденсированных сред в связи с развитием нанотехнологий и нанодиагностики. Для таких исследований требуется максимально широкий диапазон переданных импульсов Q и максимальное разрешение $\Delta Q/Q$ при абсолютной нечувствительности исследуемой системы к направлению вектора Q из-за изотропного характера рассеяния (хаотичной ориентации частиц в растворе). Узел окружения образца предлагает автоматическую смену кювет для жидких образцов с термостатом в диапазоне температур -30°C до $+150^\circ\text{C}$. Детекторная система на такой установке имеет особую конструкцию с осевой симметрией колец, впервые предложенную на инструменте ЮМО [23, 58].

Биофизические исследования методами нейтронного рассеяния сводятся к исследованию строения биологической клетки в различных клеточных циклах. Каждая клетка представляет собой отдельный мир на масштабах от 10^{-10} до 10^{-5} метра, состоящий из миллионов молекул, действующих по своим собственным законам. Исследование клеточной мембраны и мембран внутриклеточных органов, изучение строения ядра — ДНК,

РНК, сотен различных белков, их конфигураций, требуют многочисленных экспериментов, в том числе *in-situ* и *in-vivo*, т.е. в естественной среде пребывания клетки — в воде [60–62]. Нейтронное рассеяние с помощью методов контрастирования смесью лёгкой и тяжёлой воды ($\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$) способно выделить особенности белковых молекул, разделить вклады в рассеяния ДНК и белков [63, 64], показать положение и роль липидов в клеточной мембране [65].

Многочисленные примеры исследования полимеров методами малоуглового рассеяния нейтронов охватывают широкую область современной науки — химию материалов с проведением экспериментов *in-operando*, в тот момент, когда осуществляется химическая реакция или упорядочение полимерных глобул в периодические структуры [66–68]. При этом влиянием нейтронного излучения на объект исследования во всех случаях можно пренебречь.

В рефлектометрах, предназначенных для исследования поверхности и межслойных границ жидких систем, меняется геометрия эксперимента с горизонтальной плоскости рассеяния для твёрдых слоистых систем на вертикальную плоскость рассеяния. Следует отметить, что времяпролётная методика измерения на импульсном источнике значительно облегчает измерение кривой отражения от поверхности жидкости из-за возможности варьировать переданный импульс за счёт изменения длины волны нейтрона, а не только и не столько за счёт изменения угла падения пучка нейтронов на поверхность.

Нейтронный рефлектометр для исследований в биологии, физике и химии полимеров работает на мишени с тепловым замедлителем и длинной времяпролётной базой $L < L_0 = 14$ м с вертикальным отражением нейтронов от образца. Исследуются в основном поверхности и границы раздела макромолекул или наночастиц, организованных в латеральные структуры в растворах на основе воды. Специфика эксперимента требует установки в узел образца электрохимической ячейки, либо ванны Ленгмюра–Блоджетт. Для уменьшения в рефлектометрической кривой диффузного вклада от растворителя, нейтронный пучок отражают от поверхности образца сверху, если макромолекулы или наночастицы организованные на поверхности растворителя (конфигурация "пучок сверху"), либо снизу через подложку, если исследования проводятся в электрохимической ячейке (конфигурация "пучок снизу"). Растворитель, как правило, частично или полностью дейтерируется чтобы использовать контраст когерентного рассеяния нейтронов на водороде/дейтерии при решении биологических задач или задач полимерной химии, а также, для уменьшения некогерентного рассеяния на водороде при исследовании растворов неорганических наночастиц.

Неполяризованный пучок нейтронов "коллимируется" в горизонтальной плоскости, проходя через окно выводящего нейтронвода с прямоугольным поперечным сечением 50×10 мм² (ширина \times высота), установленного после замедлителя. Далее, однодисковый прерыватель формирует импульс нейтронов с экспериментальной спектральной шириной $\delta\lambda = 6$ Å в диапазон по λ от 1 до 7 Å с частотой следования $f_n = 80$ Гц и длительностью $\tau = 150$ мкс. После прерывателя устанавливается дефлектор — двустороннее нейтронное зеркало с отражающим Ni/Ti покрытием, отделяющее тепловые нейтроны (с длиной волны $\lambda > 0,5$ Å) от оставшихся в спектре

быстрых нейтронов и отклоняющее пучок нейтронов на требуемый в эксперименте угол падения на образец от 0,5 до 25 мрад.

Двустороннее покрытие дефлектора позволяет проводить эксперименты в двух конфигурациях падения пучка на границу раздела: "пучок снизу" или "пучок сверху". Перед образцом устанавливаются две коллимирующие диафрагмы, обеспечивающие угловую расходимость нейтронного импульса, падающего на образец $\Delta\lambda < 0,033^\circ$. После образца отраженный пучок попадает в детекторную систему, которая определяет угол рассеяния и время пролёта нейтрона от замедлителя. Основное сканирование компонент вектора рассеяния производится по времени пролёта, пересчитанному на длину волны нейтрона.

Метод нейтронной рефлектометрии стал популярным инструментом для изучения липидных мембран, собранных в слои адсорбцией фосфолипидных мицелл или везикул на гидрофильных поверхностях, либо плавающих гибридных бислоевых мембран с использованием методов Ленгмюра–Блоджетт и Ленгмюра–Шеффера, либо полученных методом молекулярной самосборки посредством связанных фосфолипидов. Главное преимущество нейтронной рефлектометрии заключается в возможности определения абсолютного состава мембраны и относительного расположения липидов и белков в многокомпонентных мембранах посредством селективного дейтерирования липидов и биологических агентов. Кроме того, этот метод становится мощным инструментом для исследования ориентации и конформации мембраносвязанных белков в некристаллической водной среде, поскольку используемые длины волн нейтронов (1–30 Å) хорошо соответствуют масштабу длины биологических мембран и белков, а проникающая способность позволяет исследовать структуры толщиной до 1000 Å [60–71]. Другой пример, *in-situ* исследование процесса самоорганизации наночастиц на твёрдых поверхностях. Глубокое понимание основополагающих принципов самосборки таких систем критически важно для разработки интеллектуальных, функциональных или чувствительных к внешним воздействиям синтетических композитов [72]. С помощью нейтронной рефлектометрии исследуют структуры различных межфазных систем, имеющих отношение к коллоидной химии: поверхность-активные вещества и их смеси на границах раздела воздух/жидкость, жидкость/жидкость и твёрдое тело/жидкость, нерастворимые монослои, полимеры, адсорбированные из растворов, и тонкие полимерные плёнки.

3.3. Прикладные исследования с нейтронным излучением

Версия КИИ DARIA, предназначенная для прикладных и промышленных применений, сфокусирована на рутинных методиках аттестации образцов с помощью рассеяния нейтронов: порошковая дифракция с возможностями стресс-анализа и анализа текстуры образца, тест-рефлектометрия для изучения поверхностной коррозии, аморфных плёнок твердофазных электролитов, гетерогенных магнитоионных систем, а также для аттестации нейтронной оптики, нейтронная радиография и томография, нейтрон-активационный анализ (НАА). Особым преимуществом нейтронных методов в прикладном применении является то, что они не разрушают образец, а продолжительность наведённой радиации обычно

составляет от нескольких наносекунд до часов. Метод НАА используется для анализа произведений искусства и исторических артефактов [73–75], а также для определения активности радиоактивных образцов и содержания благородных металлов в рудах [76].

Порошковая дифракция с возможностью стресс-анализа предназначена для измерения остаточных напряжений, анализа текстуры (распределение ориентаций кристаллитов в поликристаллическом образце) и изучения фазового состава (например, объёмной доли аустенита в стали) [26, 77]. Эти знания, например, помогают понять механические свойства материала, которые важны при определении несущей способности материала или способов его обработки. Инженерные дифрактометры, ориентированные на прикладные задачи, отличаются возможностью одновременного проведения экспериментов по дифракции, МУРН и нейтронной томографии, высокой интенсивностью и высоким пространственным разрешением, а также возможностью работы с крупногабаритными образцами и проведением *in-situ* и *in-operando* экспериментов в условиях термомеханической обработки (горячая деформация, сварка,ковка, т.д.). Спектр материалов, которые могут быть изучены, также широк, например, лёгкие материалы, такие как магний или алюминий, используемые в транспортном секторе [78], циркониевые сплавы для атомной промышленности [79], высокотемпературные материалы, такие как TiAl, используемые в турбокомпрессорах [80, 81], "умные" материалы — сплавы с эффектом памяти формы [27, 82, 83] и т.д.

Задача исследования напряжений в материале, текстуры или фазового состава предъявляет высокие требования к относительному разрешению дифрактометра по переданному импульсу. Среди трёх вкладов в относительное разрешение $\Delta Q/Q$: 1) точность измерения длины времяпролётной базы, 2) разрешение по углу и 3) разрешение по времени пролёта нейтронов τ/T_λ (τ — длительность нейтронного импульса; T_λ — время пролёта нейтронов с длиной волны λ от замедлителя до детектора), последний вклад наиболее критичен. Современные инженерные дифрактометры достигают временного разрешения до 0,1 %. Высокое временное разрешение может быть достигнуто либо за счёт использования длинной времяпролётной базы (большее время пролёта нейтронов) с заданной длительностью нейтронного импульса, либо путём ограничения длительности импульса с помощью прерывателей.

Для КИН DARIA (с длительность импульса 100 мкс и частотой 40 Гц) в инженерном дифрактометре предусмотрен каскад прерывателей, дополнительно формирующий импульс нейтронов длительностью 40 мкс и улучшающий разрешение по времени пролёта нейтронов за счёт использования фурье-прерывателя. Расстояние от источника до детектора составляет 24 м, спектральная полоса пропускания прибора без прерывателей $\delta\lambda = 4 \text{ \AA}$ в диапазон по λ от 1 до 5 \AA .

Для широкого углового покрытия устанавливаются два детектора площадью 1 м² под углом $\pm 90^\circ$ к падающему пучку нейтронов на расстоянии 1,5 м слева и справа от образца, охватывая угловой диапазон порядка $\pm 18,5^\circ$. Для большинства конструкционных материалов такой угловой диапазон дифрактограммы достаточен для регистрации наиболее интенсивных брэгговских максимумов с межплоскостными расстояниями $d = 0,6–6,0 \text{ \AA}$. До-

полнительным преимуществом предлагаемой геометрии детекторной системы является возможность одновременного измерения двух взаимоперпендикулярных компонент коэффициента деформации. Можно расширить область детектирования в плоскости над образцом для увеличения охвата полусферической фигуры во время измерений текстуры. Объём образца под пучком нейтронов определяется набором диафрагм и радиальных коллиматоров. А большое пространство для узла образца предполагает использование дополнительного специализированного оборудования для воспроизведения условий эксплуатации, например, стенды для испытания на релаксацию напряжений или пределов прочности изделий.

Методы нейтронной радиографии и томографии, позволяющие получать изображения и объёмные трёхмерные реконструкции внутреннего строения объектов с пространственным разрешением порядка 100 мкм, в настоящее время получили широкое развитие на современных источниках нейтронов [84]. Значительная глубина проникновения нейтронов даёт ряд преимуществ нейтронным методикам по сравнению с рентгеновскими аналогами и позволяет использовать их для решения широкого круга междисциплинарных научных задач, от исследования структурных особенностей различных функциональных материалов, микроструктуры строительных и конструкционных материалов и её изменения в процессе эксплуатации [85, 86], до изучения внутреннего строения уникальных объектов культурного и природного наследия или объектов внеземного происхождения [87–89].

На компактных источниках нейтронов активно реализуют метод нейтронной радиографии на установке длиной 4 м с выходным отверстием размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ (перед которым располагается нейтронный провод длиной 1 м, проводящий нейтроны от замедлителя). При такой геометрии поток в позиции детектора составляет $\Phi = 2 \times 10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, что приемлемо для измерений с экспозицией в 1 мин, но при довольно низком разрешении в 500 мкм [84]. Освещённая область достаточно однородна на площади около $250 \times 250 \text{ мм}^2$, и это идеально подходит для промышленной радиографии. Следует отметить, что для современных детекторов можно сократить время экспозиции до нескольких секунд. На импульсных источниках нейтронов также активно разрабатывается метод радиографии с временным разрешением [90], поскольку энергетическое разрешение достигается с помощью времяпролётной техники. Эта методика обеспечивает более детальное представление о структуре металлургических образцов за счёт чувствительности пропускания нейтронов к текстуре и деформациям в зависимости от длины волны.

Установка МУРН, специализированная для прикладных исследований, должна иметь поляризационную модуль, твердотельный детектор с высокой эффективностью регистрации тепловых и холодных нейтронов [91] и расширенный диапазон по переданному импульсу в область до $Q \approx 10^{-4}–10^{-5} \text{ \AA}^{-1}$. Использование поляризованных нейтронов позволяет отработать технологии изготовления электродов с высокой удельной ёмкостью, а также определять влияние проводящих углеродных добавок (сажи, графена, углеродных нанотрубок) на пористую структуру катодных материалов в литий-ионных источниках [92, 93]. В области металлургии рассеяние поляризованных нейтронов используют для выделения слабой магнитной компоненты от магнитных включений

в сталях и сплавах или исследования наноструктуры ферритно-мартенситных дисперсно-упрочненных оксидами сталей с различными системами легирования (различное содержание Cr, V, W, Al и Zr) [94]. Расширенный диапазон по переданному импульсу в область ультрамалых Q необходим при исследовании неоднородностей размером 1–1000 Å, таких как жировые глобулы, белковые мицеллы, их агрегаты и взаимодействия с водой и т.п., что востребовано для пищевой промышленности и медицины [95–97].

Установку малоуглового рассеяния нейтронов также можно эксплуатировать в режиме нейтронной радиографии с временным разрешением, для чего начальное сечение пучка следует увеличить до стандарта 40×40 мм² и, тем самым, обеспечить яркое освещение позиции образца пренебрегая разрешением в малых углах рассеяния. Двумерный позиционно-чувствительный детектор при этом фиксирует образ объекта в нейтронном свете со стандартным энергетическим разрешением. В силу сравнительно низкой начальной светосилы источника этот приём безопасен для детектора.

Нейтронный рефлектометр для промышленных приложений работает на мишени с тепловым замедлителем и короткой времяпролётной базой $L \approx L_0 = 8$ м при двух режимах работы с поляризованными и неполяризованными нейтронами при горизонтальном отражении от образца. Уменьшение времяпролётной базы приводит к ухудшению относительного разрешения рефлектометра по переданному импульсу $\Delta Q/Q$. Расчёты показали, что при угле скольжения нейтронного импульса $\theta > 4,5$ мрад и λ больше 1 Å наилучшее разрешение не превышает $\Delta Q/Q \leq 0,09$ и быстро уменьшается до 0,05 при увеличении λ нейтрона. Это приемлемо для решения задач, предлагаемых промышленностью, принимая во внимание, что на коротких времяпролётных нейтронных линиях уменьшаются потери нейтронов при их доставке до образца. Частота следования протонных импульсов $f_p = 80$ Гц, длительность $\tau = 150$ мкс, максимально возможный экспериментальный спектральный диапазон $\delta\lambda = 6$ Å (от 1 до 7 Å). Направление нейтронного импульса отклоняется от траектории протонного пучка, бомбардирующего мишень из Ве, на угол не менее 10° , чтобы потоки быстрых нейтронов и γ -излучения не попадали в окно выводящего прямого нейтронновода. Суммарный поток нейтронов Φ от замедлителя, нормированный на коэффициент заполнения импульсного сигнала $D = 0,012$, равен $\Phi = 3,86 \times 10^8$ н см⁻² с⁻¹. Конфигурация рефлектометра описана в [25] и предполагает прямой выводящий нейтронновод с окном 10×50 м² (ширина \times высота) и напылёнными никель-титановыми суперзеркалами с $m = 2$, однодисковый прерыватель нейтронных импульсов для фильтрации спектра нейтронов в диапазоне λ от 1 до 7 Å до спектральной ширины $\delta\lambda = 6$ Å и две коллимирующие диафрагмы, обеспечивающие угловую расходимость нейтронного импульса $\Delta\theta$, падающего на образец $\Delta\theta < 0,033^\circ$. Для исследования магнитных характеристик плёнок устанавливаются поляризатор и радиочастотный флиппер (опционально). Поток нейтронов на образце для рефлектометра с тепловым замедлителем и $L = 8$ м составляет $\Phi = 5,13 \times 10^4$ н см⁻² с⁻¹, что сравнимо со среднепоточными реакторами.

Среди задач и объектов исследования можно перечислить следующие: химические и морфологические изменения в тонких плёнках и на скрытых границах раздела в

коррозионной науке [98, 99], изучение аморфных плёнок твердофазных электролитов с высокой ионной проводимостью для энергосберегающих технологий [100], исследование гетерогенных магнитоионных систем на основе мультиферроиков и магнитоэлектриков как перспективных материалов для энергоэффективных и устойчивых спинтронных приложений, или как устойчивых к магнитному полю систем хранения данных [101].

Из изложенного выше следует, что разработка каждого типа прибора для исследований в области физики твёрдого тела, наук о жизни (биология, физика и химия полимеров) или прикладных исследований требует особого подхода, начинающегося с численного моделирования и оптимизации параметров установки, наиболее эффективного сочленения узлов установки, начиная с нейтронного детектора, узла образца, коллимационной системы, системы прерывателей, нейтронновода системы и, наконец, мишенной сборки.

4. Разработка компактного источника нейтронов средней мощности

Второе направление в стратегии развития импульсных источников нейтронов на базе КИИ DARIA состоит в разработке и внедрении компактного источника нейтронов средней мощности за счёт модернизации ускорителя протонов с заменой материала мишени на тантал. Средняя мощность пучка протонов для источников подобного типа может варьироваться от 30 до 100 кВт, что при пиковом токе в 100 мА и рабочем цикле 1 % соответствует энергии протонов от 30 до 70 МэВ. При заданных характеристиках протонного пучка средний поток нейтронов с мишени достигает 1×10^{15} н с⁻¹. В настоящее время в мире не реализовано ни одного подобного проекта, но в последние пять лет активно идёт работа по созданию таких источников, как HBS, ARGITU, ICONA [102–104].

В части разработки ионного источника не требуется развития новых технологий. Выбор ускоряющей структуры будет зависеть от конечной энергии установки. При конечной энергии 30 МэВ необходимо лишь увеличить размеры линейного ускорителя в части РТД/DTL в три раза с использованием уже разработанной технологии [8], показанной на рис. 3б. При конечной энергии 70 МэВ выгодно разбить часть РТД/DTL на два участка, первый — на частоту 162,5 МГц, а вторую — на частоту 325 МГц. При этом независимо от конечной энергии, начальная часть до 13 МэВ остаётся неизменной и изготавливается по освоенным к сегодняшнему дню технологиям (рис. 3б) [7, 8]. Для более высоких энергий может потребоваться переход на РТД/ДТЛ другого типа, однако независимо от выбранного типа резонатора все они будут изготавливаться по уже освоенным технологиям.

В части разработки мишенной сборки переход от маломощных импульсных источников к источникам средней мощности сопряжён с рядом технических трудностей. Связано это прежде всего с очевидным желанием увеличить нейтронную яркость, но при этом сохранить все преимущества компактного источника. Увеличение энергии протонов предопределяет изменение материала при выборе мишени. На рисунке 6 представлен график изменения выхода нейтронов на 1000 протонов для энергий протонного пучка от 20 до 100 МэВ для различных материалов мишени.

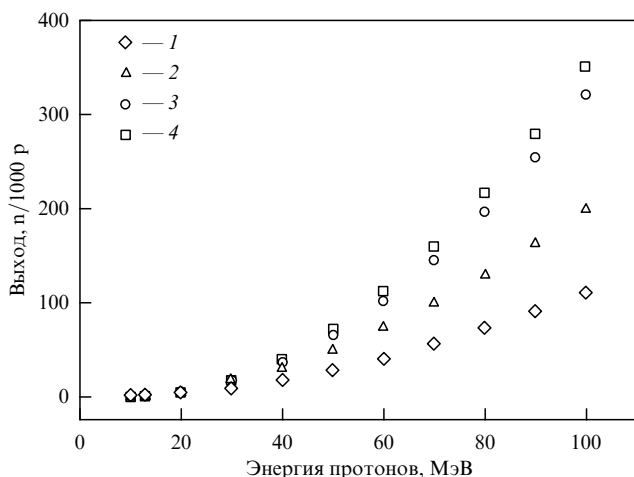


Рис. 6. Нейтронный выход на 1000 протонов для различных энергий и материалов мишени: 1 — Ве, 2 — Nb, 3 — Ta, 4 — W.

При энергиях протонного пучка свыше 30 МэВ наиболее подходящими материалами с точки зрения генерации нейтронов являются вольфрам и тантал. Последний имеет высокую температуру плавления 3290 К, средний коэффициент теплопроводности 57 Вт мК^{-1} при комнатной температуре и, что особенно важно для тонких мишеней, высокий коэффициент диффузии водорода $200 \times 10^{-12} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ [105, 106]. Сочетание этих характеристик, а также высокий порог образования блистеров и приемлемый выход нейтронов позволяет утверждать, что тантал является наиболее подходящим материалом для создания мишенного узла высокой надежности и мишени с большим временем жизни. При площади мишени порядка 50 см^2 (диск диаметром 8 см) тепловой поток с единицы поверхности мишени при средней мощности пучка 100 кВт составит 2 кВт см^{-2} . Для обеспечения теплосъема с такой площади следует использовать инжекторное охлаждение, реализованное в составе конструкции мишенного узла в виде вращающегося диска [13, 107]. На торце диска располагается 25 мишенных окошек, скорость вращения диска соответствует последовательной бомбардировке одного импульса по одной мишени. Важно отметить, что при размере мишени порядка 50 см^2 , материалы теплового предзамедлителя, криогенного замедлителя и отражателя нейтронов не изменятся в сравнении с компактным источником нейтронов малой мощности. Конструкция мишенной сборки с использованием инжекторного охлаждения представлена на рис. 7.

Возможность сохранить комнатные размеры мишенного узла при обеспечении требуемого теплосъема — одна из основных задач при разработке импульсного источника нейтронов средней мощности. Это позволит сохранить высокую плотность потока тепловых нейтронов в объеме предзамедлителя. Блоки теплового и криогенного замедлителей устанавливаются сверху и снизу мишени, при этом сохраняется высокая гибкость в части выбора конструкции криогенной камеры холодного замедлителя. Разработанная конструкция мишенного узла для компактного источника нейтронов средней мощности позволяет сохранить верное расположение каналов вывода нейтронных пучков, как на рис. 4б, и увеличить число станций.

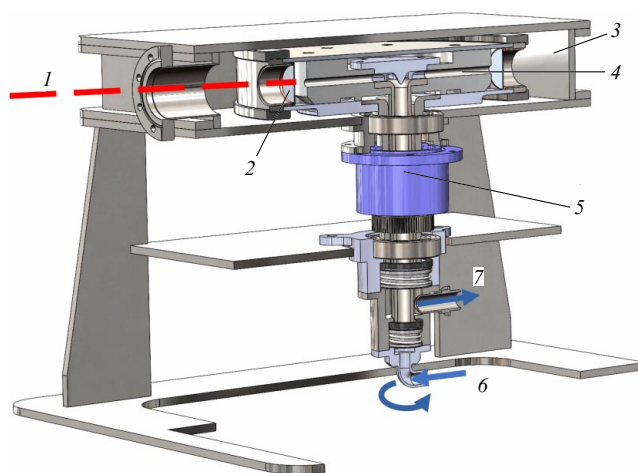


Рис. 7. Конструкция мишенного узла в виде вращающегося диска с инжекторным охлаждением: 1 — протонный пучок, 2 — мишень, 3 — вакуумная камера, 4 — водоохлаждаемый барабан, 5 — система инжекторного охлаждения мишеней, 6 — вход воды, 7 — выход воды.

В части вывода нейтронных пучков и строительства нейтронных станций изменений не потребуется. При этом увеличение потоков нейтронов на 1–2 порядка приведет к сокращению времени измерения одного спектра и/или уменьшению времени набора статистики.

5. Разработка российского высокоэнергетичного импульсного источника нейтронов на базе протонного ускорителя

Третьим направлением в стратегии развития импульсных источников нейтронов и нейтронной науки является создание импульсной установки мегакласса — высокопоточного импульсного источника нейтронов на базе каскадно-испарительной реакции (так называемый Spallation Neutron Source — SNS). В современном мире введено в строй и эксплуатируется четыре успешных импульсных источника нейтронов этого типа (ISIS, Оксфорд, Великобритания; SNS, Окридж, США; J-SNS, Ибараки, Япония; CSNS, Дунгуань, Китай) и один находится в стадии строительства (ESS, Лунд, Швеция) [108–112]. Основные параметры существующих источников схожи: а именно, усредненный по времени поток нейтронов на замедлителе $(1–10) \times 10^{12} \text{ н с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, частота повторения импульсов 10–60 Гц при длительности импульса 20–50 мкс. Ускорительная система высокопоточного импульсного источника нейтронов на базе каскадно-испарительной реакции состоит из линейного ускорителя и накопительно-ускорительного кольца (рис. 8). Исключением является проект ESS, в котором протоны ускоряются огромным линейным ускорителем с энергией 2 ГэВ и мощностью выделяемой на мишени в 5 МВт. Проектные параметры нейтронного источника ESS: усредненный по времени поток на замедлителе $(2–3) \times 10^{14} \text{ н с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, частота повторения импульсов 14 Гц при длительности импульса 2800 мкс.

Разработка и создание в России научного центра мирового уровня (Ru-SNS) на базе мощных импульсных нейтронных пучков, получаемых на основе каскадно-испарительной реакции в результате взаимодействия высокоинтенсивного ускоренного протонного пучка с

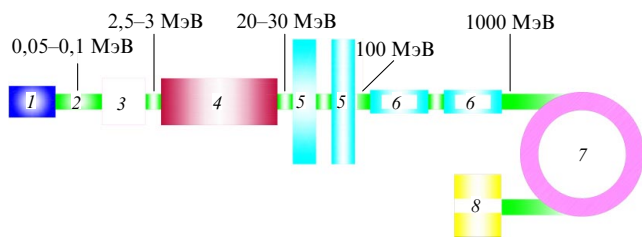


Рис. 8. Компоновочная схема ускорителя мощного протонного пучка для источника нейтронов на базе каскадно-испарительной реакции. Ионный ЭЦР источник (1), низкоэнергетический канал согласования (2), ускоритель с ПОКФ/RFQ (3), резонаторы с трубками дрейфа РТД/DTL линейного ускорителя (4), сверхпроводящие резонаторы различного типа (5, 6), синхротрон (7), нейтрон-генерирующая мишень (8).

нейтрон-генерирующей мишенью, не только обеспечит российских учёных современными высокоинтенсивными нейтронными установками, но и приведёт к освоению и развитию передовых ускорительных технологий, необходимых для различных прикладных и научных применений.

Возможная компоновочная схема ускорителя мощного протонного пучка на энергию порядка 1,2 ГэВ и средней мощности пучка 1–5 МВт и выше показана на рис. 8.

Разработка проекта, моделирование и строительство источника и ускорителя протонов, мишенного комплекса и исследовательских установок потребует проведения комплексных работ по ряду направлений. Согласно компоновочной схеме на рис. 8, необходимо разработать газодинамический ЭЦР ионный источник (протонный инжектор) с высоким удельным энерговыделением и большим ресурсом наработки на отказ, включающий следующие элементы: магнитная система удержания плазмы, охлаждаемая плазменная камера, система извлечения пучка из плазмы (экстрактор), система формирования пучка (магнитная линза), система прерывания пучка (чоппер), поглотитель отклонённого пучка [5, 6, 113]. Потребуется разработать канал согласования пучка протонов низкой энергии с первым резонатором ускоряющего канала, а так же разработать и сконструировать высокоточные резонаторы ПОКФ/RFQ для работы в режиме малой скважности, вплоть до непрерывного режима [114]. ПОКФ/RFQ используются для группировки и ускорения пучка при начальных энергиях от единиц кэВ до 2,5–3 МэВ и обеспечивают большой средний ток и высокий (близкий к 100 %) коэффициент токопрохождения. Следует разработать и сконструировать короткие малогабаритные РТД/DTL резонаторы, ускоряющие пучок протонов до энергии 20–30 МэВ, с фокусировкой пучка квадрупольными линзами, размещенными между резонаторами. Особенно важно освоить технологию высокочастотной сверхпроводимости и разработать малогабаритные сверхпроводящие (МСП) резонаторы позволяющие увеличить энергию протонов до 1000 МэВ. Сверхпроводящие резонаторы делаются одинаковыми или разбиваются на небольшое число групп геометрически одинаковых резонаторов (СН-, четверть- и полуволновые, Spoke-cavity, резонаторы эллиптического типа). Такой подход существенно упрощает и удешевляет процесс изготовления. Среди важных задач — разработка системы высокочастотного питания на основе твердотельных уси-

лителей мощности, обеспечивающих стабильность за счёт компенсации подсадки высокочастотного напряжения при ускорении высокоинтенсивного пучка [115–117]. Необходимо разработать систему управления элементами ускоряющего тракта и схему размещения приборов диагностики, контроля и мониторинга пучка протонов в ускорителе. Нужно промоделировать электродинамику резонаторов с определением ускоряющих и фокусирующих электромагнитных полей и определить энергии перехода с нормально проводящих резонаторов на сверхпроводящие, минимизирующие потери пучка. Следует промоделировать динамику пучка через весь ускорительный тракт с учётом "реального" распределения ускоряющих и фокусирующих электромагнитных полей в ускоряющих структурах и в каналах транспортировки. В зависимости от выбранной стратегии реализации ускорителя, в его состав может быть включен быстро циркулирующий синхротрон, с которого протонный пучок выводится на нейтрон-генерирующую мишень.

Мишень бомбардируется пучком высокоэнергетических протонов. В ходе этого процесса мощность теплового осаждения мишени превышает половину мощности пучка. Поэтому система водяного охлаждения критически важна для отвода тепла. В качестве материала мишени с низким тепловыделением наиболее подходит вольфрам с тонкостенным танталовым покрытием (300 мкм), что значительно повышает безопасность мишени. Для генерации нейтронов под конкретные исследовательские задачи, рассмотренные в разделе 3, используется набор замедлителей и отражателей, чтобы получать холодные нейтроны с узкой длительностью импульса, холодные нейтроны с высоким потоком и тепловые нейтроны с высоким потоком. Замедлители располагаются над и под мишенью, что позволяет располагать исследовательские станции в веерной геометрии. Кроме мишени, замедлителей и отражателей, в мишенном комплексе входят криогенная система для холодных замедлителей, система каналов, выводящих нейтроны от замедлителя до нейтронной станции через систему биологической защиты, сама биологическая защита и система водяного охлаждения для отвода тепла. Детально разработанный пример мишенной сборки с описанием конкретных узлов и технологических решений можно найти в работе [111]. Физическую конструкцию мишенной сборки следует оптимизировать с учётом опыта, полученного при разработке других источников нейтронов на базе каскадно-испарительной реакции, и опираясь на значительный прогресс в разработке программного обеспечения для моделирования методом Монте-Карло в области нейтронной физики.

Для строительства нейтронных станций потребуется дополнительное моделирование и оптимизация отдельных узлов для определения их рабочих параметров в условиях высокой плотности нейтронного потока, возможного изменения длительности, частоты и профиля нейтронного импульса.

Легко видеть, что при создании российского источника нейтронов на основе каскадно-испарительной реакции можно использовать технологии создания ускорителей, которые уже были освоены при реализации проекта КИН DARIA. Все технологии и подходы к созданию КИН DARIA напрямую могут быть использованы при разработке и создании начальной части крупномасштабной установки. Характеристики ионного ЭЦР источника

на энергию 50–100 кэВ и система формирования пучка не отличается от таковой для компактного источника нейтронов малой и средней мощности, как и ускорительная часть с ПОКФ/RFQ на энергию 2,5–3 МэВ, и нормально проводящие (металлические) резонаторы с трубками дрейфа РТД/DTL и фокусирующими элементами между ними, разгоняющие протонный пучок до энергии 20–30 МэВ. Таким образом, можно говорить, что проделанные работы в рамках проекта DARIA позволили решить несколько важных задач.

6. Источник нейтронов на реакции каскадно-испарительного типа (Russian Spallation Neutron Source — RuSNS)

В двух научных центрах Российской Федерации эксплуатируются ускорители ионов близкие по своим параметрам к требуемым для генерации нейтронов на основе каскадно-испарительной реакции. Это — ускорительные комплексы в Институте физики высоких энергий имени А.А. Логанова НИЦ "Курчатовский институт" (ИФВЭ) (г. Протвино) [118] и в Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) (г. Троицк) [119]. В рамках действующей Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. в ИФВЭ на пучках протонов, ускоренных в быстро-циклирующем синхротроне на 1,5 ГэВ, планируется создание прототипа источника нейтронов на основе реакции каскадно-испарительного типа [118]. Однако мощность протонного пучка для генерации нейтронов на действующем ускорителе в ИФВЭ будет на три порядка ниже той, что достигается на современных установках такого типа (1,2 кВт против 1,4 МВт средней мощности на SNS), что приводит к снижению на порядки плотности потока нейтронов на мишени и модераторе. Быстроциркулирующий синхротрон может работать в пакетно-импульсном режиме 16 имп с⁻¹ с числом импульсов в пакете не более 29 и периодом следования пакетов 8–10 с. При этом интенсивность одного импульса составляет $(1-4) \times 10^{11}$ протонов. Для сравнения, на компактном источнике DARIA интенсивность одного импульса составляет 6×10^{13} протонов. Увеличить интенсивность протонного пучка можно за счёт перехода на ускорение отрицательных ионов водорода с накоплением пучка в синхротроне за счёт перезарядки [120]. Инжектор УРАЛ-30М ускорительного комплекса ИФВЭ позволяет ускорять пучок отрицательных ионов с током 25 мА, что позволяет увеличить мощность протонного пучка. Дополнительно, повысить интенсивность протонного пучка можно переходом от пакетно-импульсного режима к импульсному. Правда, такой переход потребует модернизацию действующих магнитов быстро-циклирующего синхротрона из-за недостаточной эффективности системы их охлаждения. Таким образом, без глубокой реконструкции и идеологической перестройки ускорительный комплекс ИФВЭ может работать только как источник нейтронов малой мощности.

ИЯИ РАН имеет линейный ускоритель на энергию 600 МэВ, который на сегодняшний день эксплуатируется на 240 МэВ, но это ограничение обусловлено лишь небезопасностью установки источниками ВЧ питания резонаторов. Обеспечение ВЧ питанием линейного уско-

рителя позволит получить пучок с энергией 600 МэВ, частотой следования 50–100 имп с⁻¹, длительностью импульса 100 мкс и током 20 мА. На площадке ИЯИ РАН предусмотрена возможность создания специализированного быстро-циклирующего кольцевого ускорителя/накопителя на 1,6 ГэВ с частотой следования циклов 25 Гц. Модернизация начальной "тёплой части" линейного ускорителя, создание высокоэнергетической части на СП резонаторах и быстро-циклирующего синхротрона на средний ток 62,5 мкА позволит выйти на уровень нейтронных источников эксплуатируемых в центрах ISIS [108] и CSNS [111]. При реализации такого проекта можно ожидать вывод на мишень импульсов мощностью 100 кВт на каждый цикл работы синхротрона.

Таким образом, возможны несколько сценариев создания отечественного источника нейтронов на реакции каскадно-испарительного типа. Первый — это перевод линейного ускорителя ИФВЭ в режим ускорения отрицательных ионов водорода и модернизация быстро-циркулирующего синхротрона. Второй — обеспечение ВЧ усилителями линейного ускорителя ИЯИ РАН с выходом на энергию пучка протонов 600 МэВ с последующим созданием быстро-циклирующего синхротрона. Оба проекта имеют требуемую инженерную инфраструктуру, но для обеспечения параметров пучка, сопоставимых с импульсным нейтронным пучком, получаемым на основе каскадно-испарительной реакции в результате взаимодействия высокоинтенсивного ускоренного протонного пучка с нейтрон-генерирующей мишенью, потребуется полная замена всего ускорительного парка комплексов. Тем не менее, используя имеющееся оборудование обе установки (в достаточно короткий срок и с умеренными финансовыми затратами), можно модернизировать в нейтронные источники средней мощности и обеспечить отечественных исследователей импульсными нейтронными потоками для проведения исследований.

Третий сценарий — разработать и построить Российский высокоинтенсивный импульсный источник нейтронов, на базе каскадно-испарительной реакции Ru-SNS, имеющий в своем составе высокоинтенсивный линейный ускоритель и синхротрон. Важной особенностью при создании такой крупномасштабной установки является возможность поэтапной реализации, при этом каждый этап имеет свои технологические особенности и находит свои конкретные применения. Работы, описанные в разделе 5, реализуются в два этапа. На первом этапе, по аналогии с источником нейтронов CSNS в Китае, предлагается создать установку с "тёплым" линейным ускорителем на энергию порядка 70 МэВ и быстро-циклирующий синхротрон на энергию 1–1,5 ГэВ. Параллельно с этими необходимо вести разработку и изготовление сверхпроводящих резонаторов, а также моделирование, разработку и строительство мишенной станции с биологической защитой и нескольких базовых нейтронных станций по дифракции, рефлектометрии и малоугловому рассеянию нейтронов.

По мере освоения технологии высокочастотной сверхпроводимости можно будет приступить ко второму этапу создания Ru-SNS — за счёт добавления СП резонаторов последовательно увеличивать энергию протонного пучка в линейном ускорителе с выходом на энергию вплоть до 1 ГэВ. При этом, когда энергия пучка протонов на выходе линейного ускорителя достигнет 600–800 МэВ, синхротрон можно будет перевести в режим накопителя пучка с повышением величины им-

пульсного тока, выводимого на нейтрон-генерирующую мишень. Параллельно проводить работы по расширению парка нейтронных станций до 17–20 для проведения исследований в трёх областях: физика твёрдого тела, науки о жизни (биология, физика и химия полимеров) и прикладные исследования с использованием двух типов взаимодействия нейтронов с исследуемым объектом — рассеяние нейтронов и поглощение нейтронов при взаимодействии с объектом.

Реализация проекта создания Российского высокоинтенсивного импульсного источника нейтронов Ru-SNS рассчитана на 15 лет. Разработка концептуального дизайн-проекта мега-установки Ru-SNS — 1 год, разработка технического проекта мега-установки Ru-SNS — 2 года. Затем в течение 5 лет планируется отработать и реализовать технологии, необходимые для производства основных узлов и компонентов ускорителя, в том числе:

- создать протонный источник и ускоритель протонов непрерывного действия на энергию до 70 МэВ и произвести физический пуск, что совпадает с задачами решаемыми в проекте компактного источника нейтронов DARIA;

- создать лаборатории по производству/тестированию малозазорных сверхпроводящих резонаторов различного типа, позволяющих увеличить энергию протонов до 1000 МэВ с системой ВЧ питания на основе твердотельных усилителей мощности;

- разработать систему управления элементами ускоряющего тракта, систему диагностики, контроля и мониторинга пучка протонов, отработать основные режимы эксплуатации ускорителя;

- разработать конструкции нейтрон-производящей мишени.

На последнем этапе в течение 8 лет планируется создание ускорителя-драйвера на 600–1000 МэВ со средней мощностью ускоренного пучка 1–5 МВт и нейтрон-производящей мишенью, сопровождаемой конструированием и производством экспериментальных нейтрон-выводящих каналов и 5–6 нейтронных станций первой очереди. Последнее также совпадает с задачами решаемыми в проекте компактного источника нейтронов DARIA.

Для проектирования и строительства мега-установки Ru-SNS Российская Федерация обладает всеми необходимыми компетенциями. Институт Прикладной Физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (г. Нижний Новгород) обладает всеми компетенциями для создания газодинамического ионного источника на основе электронного циклотронного резонанса с параметрами, требуемыми для проекта. НИЦ "Курчатовский институт" продемонстрировал свою способность создать линейный ускоритель протонов, включающий ПОКФ/RFQ и нормально проводящий РТД/DTL для работы в режиме малой скважности, вплоть до непрерывного. Освоение технологии создания сверхпроводящих ВЧ малозазорных резонаторов ведётся совместными усилиями национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" (г. Москва) и Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна) [117]. Хорошие заделы по созданию ВЧ СП резонаторов есть в Новосибирском государственном университете (г. Новосибирск) и Университете науки и технологий МИСиС (г. Москва). Быстроциркулирующий синхротрон, работающий для повышения величины импульсного тока в режиме накопителя пучка протонов рассчитывается, оптимизируется и конструируется в

НИЦ "Курчатовский институт" с привлечением специалистов из ИЯИ РАН (г. Троицк) и ОИЯИ (г. Дубна). Институт ядерных исследований Российской академии наук (г. Троицк) совместно с Петербургским институтом ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт" (г. Гатчина) имеют компетенции по моделированию и разработке мишенного комплекса с биологической защитой. Опыт моделирования и строительства научно-исследовательских нейтронных станций, работающих по времяпролётной методике есть в Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна) и Санкт-Петербургском государственном университете (г. Санкт-Петербург).

Решение отдельных задач предлагается сопровождать созданием опытных образцов устройств и приборов для практического применения. Например, элементы для установок бор-нейтронозахватной и адронно-лучевой терапии [121, 122]; для астрофизических исследований; твердотельные генераторы для радиолокации, телевидения и ускорительных комплексов. Такой подход позволит проводить комплексные испытания найденных технических решений.

7. Заключение

В настоящее время в России действует первоклассный центр коллективного пользования на базе импульсного быстрого реактора (ИБР-2М), расположенного в Дубне, а в самые короткие сроки ожидается вывод исследовательского реактора ПИК в Гатчине на проектную мощность в 100 МВт [123] с параллельным вводом с эксплуатацию его приборной базы [124].

Широкие горизонты технологического развития открываются в части иных, современных способов генерации нейтронов для физических исследований с помощью нейтронных пучков. В стратегии развития нейтронных исследований в России должно появиться направление "Генерация нейтронов с помощью ускорителей заряженных частиц". В рамках действующей Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. уже разработаны научные и технологические основы Российского компактного источника нейтронов DARIA с параметрами (плотность потока, частота и длительность импульсов), оптимизированными для работы исследовательских установок нейтронного рассеяния: дифрактометры, рефлектометры и установки малоуглового рассеяния нейтронов. К сегодняшнему дню разработаны технологии создания всех ключевых компонентов КИН DARIA, прошедшие проверку при изготовлении полномасштабных макетов.

В предлагаемой Стратегии импульсных источников нейтронов на базе проекта DARIA рассмотрены три направления. В рамках первого направления — мультиплицирование компактного источника нейтронов DARIA в части углубленной специализации нейтронных установок при соответствующей модернизации и доработки мишенной сборки, но сохранении параметров протонного ускорителя с энергией 13 МэВ, в качестве специализации источников рассмотрены исследования в области 1) магнетизма и кристаллографии, 2) биологии и медицины, 3) материаловедения и промышленных применений.

Показано, что второе направление в предлагаемой Стратегии развития, нацеленное на увеличение плотно-

сти потока на нейтронных станциях и расширение круга решаемых научных задач, можно развивать за счёт увеличения мощности компактного источника DARIA до энергии протонов 70 МэВ за счёт модернизации линейного ускорителя протонов с заменой материала мишени на тантал. Серия таких компактных источников нейтронов позволит создать экспериментальную инфраструктуру в Российской Федерации для исследований на нейтронных пучках с интенсивностями, сопоставимыми с малыми и средними исследовательскими реакторами с непрерывным потоком. То есть заменить исследовательские ядерные реакторы, которые к настоящему моменту уже выведены (или выводятся) из эксплуатации.

Определённым научно-техническим вызовом является создание Российского высокоинтенсивного импульсного источника нейтронов Ru-SNS на базе высокоточного, высокоэнергетичного (до 1 ГэВ) ускорителя протонов и каскадно-испарительной реакции. Это — третье направление в предлагаемой Стратегии развития нейтронных исследований. Проект КИИ DARIA является начальной частью источника Ru-SNS. Из всех технологий, которые требуются для реализации установки Ru-SNS, в России отсутствует только технология производства высокочастотных малозазорных сверхпроводящих резонаторов. Однако, реализуя проект в два этапа: 1) строительство Ru-SNS на базе "теплого" линейного ускорителя на энергию порядка 70 МэВ и быстроциклирующего синхротрона на энергию 1–1,5 ГэВ с мишенной станцией и тремя базовыми нейтронными установками по дифракции, рефлектометрии и малоугловому рассеянию нейтронов; 2) модернизация линейного ускорителя за счёт добавления малозазорных СП резонаторов с последовательным увеличением энергии протонного пучка до 1 ГэВ и переводом быстроциклирующего синхротрона в режим накопителя пучка с повышением величины импульсного тока, выводимого на нейтрон-генерирующую мишень и увеличение парка нейтронных станций до 17–20, можно построить импульсный источник нейтронов Ru-SNS в короткий срок (за 15 лет).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15-2022-830 (Продление договора № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.). Авторы благодарят коллег, участвовавших в разработке отдельных узлов проекта: М.В. Булавина, К.А. Мухина (ОИЯИ) — за разработку и адаптацию источника холодных нейтронов на основе мезитилена, А.Ю. Гойхмана, П.А. Прокоповича (БФУ им. И. Канта) — за разработку вращающейся бериллиевой мишени.

Список литературы

- LENS Report Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources (2021), <https://lens-initiative.org/>
- Павлов К А и др. *Кристаллография* **67** (1) 5 (2022); Pavlov K A et al. *Crystallogr. Rep.* **67** (1) 3 (2022)
- Kulevoy T V et al. *Instrum. Exp. Tech.* **67** (Suppl. 1) S16 (2024) DOI:10.1134/S0020441224701239
- Skalyga V A et al. *Rev. Sci. Instrum.* **93** 033502 (2022)
- Выбин С С и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 4 (2023); Vybin S S et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 739 (2023)
- Барабин С В и др. *Письма в ЖТФ* **47** (10) 7 (2021); Barabin S V et al. *Tech. Phys. Lett.* **47** 485 (2021)
- Семенников А И и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 20 (2023); Semennikov A I et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 753 (2023)
- Кропачев Г Н и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 27 (2023); Kropachev G N et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 759 (2023)
- DRA.300.19M. Ультранийный усилитель мощности для радиовещания DRM 19-го вещательного КВ диапазона 300 Вт RMS. ООО НПП Триада-ТВ (TRIADA TV), https://triadatv.ru/catalog/usiliteli_moshnosti/12028/
- Кильметова И В и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 40 (2023); Kilmetova I V et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 772 (2023)
- Мороз А Р, Коваленко Н А *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 71 (2023); Moroz A R, Kovalenko N A *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 799 (2023)
- Subbotina V V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **1008** 165462 (2021)
- Moroz A R, Kovalenko N A, Grigoriev S V *J. Neutron Res.* **24** 299 (2022)
- Kobayashi T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **994** 165091 (2021)
- Baxter D V *Eur. Phys. J. Plus* **131** 83 (2016)
- Niita K et al. *Radiat. Meas.* **41** 1080 (2006)
- Baggemann J et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **1069** 169912 (2024)
- Булавин М В и др. *Атомная энергия* **135** (3–4) 145 (2023); Bulavin M V et al. *Atom. Energy* **135** 189 (2024)
- Lefmann K, Nielsen K *Neutron News* **10** (3) 20 (1999)
- Григорьев С В и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **87** 1526 (2023); Grigoriev S V et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **87** 1561 (2023)
- Москвин Е В и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 77 (2023); Moskvina E V et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 804 (2023)
- Павлов К А и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 84 (2023); Pavlov K A et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 810 (2023)
- Pavlov K A et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **18** (1) S1 (2024)
- Сыромятников В Г, Григорьева Н А, Григорьев С В *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 93 (2023); Syromyatnikov V G, Grigoryeva N A, Grigoryev S V *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 818 (2023)
- Григорьева Н А, Коваленко Н А, Григорьев С В *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (12) 102 (2024); Grigoryeva N A, Kovalenko N A, Grigoriev S V *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **18** 1602 (2024)
- Аксёнов В Л, Балагуров А М *УФН* **186** 293 (2016); Aksenov V L, Balagurov A M *Phys. Usp.* **59** 279 (2016)
- Балагуров А М, Головин И С *УФН* **191** 738 (2021); Balagurov A M, Golovin I S *Phys. Usp.* **64** 702 (2021)
- Григорьева Н А, Мистонов А А, Григорьев С В *Кристаллография* **67** (1) 103 (2022); Grigoryeva N A, Mistonov A A, Grigoriev S V *Crystallogr. Rep.* **67** 93 (2022)
- Grigoriev S V et al. *Phys. Rev. B* **72** 214423 (2005)
- Авдеев М В *УФН* **177** 1139 (2007); Avdeev M V *Phys. Usp.* **50** 1083 (2007)
- Авдеев М В, Аксенов В Л *УФН* **180** 1009 (2010); Avdeev M V, Aksenov V L *Phys. Usp.* **53** 971 (2010)
- Алтынбаев Е В, Чубова Н М, Григорьев С В *Кристаллография* **67** (1) 130 (2022); Altynbaev E V, Chubova N M, Grigoriev S V *Crystallogr. Rep.* **67** 118 (2022)
- Григорьев С В, Алтынбаев Е В, Пшеничный К А *Кристаллография* **67** (1) 90 (2022); Grigoriev S V, Altynbaev E V, Pshenichnyi K A *Crystallogr. Rep.* **67** 118 (2022)
- Grigoryeva N A et al. *Magnetochemistry* **8** (12) 167 (2022)
- Кожеников С В, Жакетов В Д, Раду Ф *ЖЭТФ* **154** 698 (2018); Kozhevnikov S V, Zhaketov V D, Radu F *J. Exp. Theor. Phys.* **127** 593 (2018)
- Боднарчук В И и др. *Кристаллография* **67** (1) 57 (2022); Bodnarchuk V I et al. *Crystallogr. Rep.* **67** 50 (2022)
- Плешанов Н К, Булкин А П, Сыромятников В Г *Физика твёрдого тела* **52** 954 (2010); Pleshanov N K, Bulkin A P, Syromyatnikov V G *Phys. Solid State* **52** 1018 (2010)
- Grigoriev S V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **384** 451 (1997)
- Syromyatnikov V G et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **528** 012021 (2014)
- Takeda M et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **83** 012010 (2007)
- Zhan X Z et al. *Sci. Rep.* **9** 6708 (2019)
- Callori S J et al. *J. Appl. Phys.* **116** 033909 (2014)
- Gilbert D A et al. *Sci. Rep.* **6** 32842 (2016)
- Luo X et al. *Sci. Rep.* **7** 6341 (2017)
- Glover S E et al. *J. Phys. Condens. Matter* **30** 065801 (2018)
- Grigoryeva N A et al. *Magnetochemistry* **8** (12) 167 (2022)
- Coates L, Sullivan B *Methods Enzymol.* **634** 87 (2020)
- Markó M et al. *Methods Enzymol.* **634** 125 (2020)
- Borgstahl G E O et al. *Rev. Sci. Instrum.* **93** 064103 (2022)
- Schröder G C et al. *Acta Cryst. D* **74** 778 (2018)
- Correy G J et al. *Sci. Adv.* **8** eabo5083 (2022)
- Hanazono Y et al. *Sci. Adv.* **8** eabn2276 (2022)
- Oksanen E, Chen J C-H, Fisher S Z *Molecules* **22** 596 (2017)
- Liebschner D et al. *Methods Enzymol.* **634** 225 (2020)
- Chiba K et al. *Protein Sci.* **32** e4765 (2023)
- Hanazono Y et al. *Biophys. Physicobiol.* **20** e200035 (2023)
- Chatake T, in *Nucleic Acid Crystallography* (Methods in Molecular Biology, Vol. 1320, Ed. E Ennifar) (New York: Humana Press, 2016) p. 283, DOI:10.1007/978-1-4939-2763-0_18

58. Куклин А И и др. *Кристаллография* **66** (2) 230 (2021); Kuklin A I et al. *Crystallogr. Rep.* **66** 231 (2021)
59. Авдеев М В *Введение в малоугловое рассеяние нейтронов* (М.: Физический факультет МГУ, 2023) Учебное пособие
60. Свергун Д И и др. *Кристаллография* **56** 777 (2011); Svergun D I et al. *Crystallogr. Rep.* **56** 725 (2011)
61. Ivankov O I et al. *Adv. Biomembran. Lipid Self-Assembly* **31** 185 (2020)
62. Kuklin A et al. *Sci. Rep.* **10** 5749 (2020)
63. Grigoriev S V et al. *Phys. Rev. E* **104** 044404 (2021)
64. Iashina E G et al. *Phys. Rev. E* **104** 064409 (2021)
65. Josts I et al. *Methods Enzymol.* **677** 417 (2022)
66. Eremin R A et al. *Chem. Phys.* **461** 1 (2015)
67. Артикульный А П и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (12) 3 (2018); Artykulnyi O P et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **12** 1142 (2018)
68. Masalov V M et al. *Nano* **8** 1350036 (2013)
69. Le Brun A P, Darwish T A, James M J. *Chem. Biol. Interfaces* **1** (1) 3 (2013)
70. Wacklin H P *Current Opin. Colloid Interface Sci.* **15** 445 (2010)
71. Caselli L, Nylander T, Malmsten M *Adv. Colloid Interface Sci.* **325** 103120 (2024)
72. Theis-Bröhl K et al. *Nanomaterials* **10** 1231 (2020)
73. Glascock M D "Instrumental neutron activation analysis and its application to cultural heritage materials", in *Handbook of Cultural Heritage Analysis* (Eds S D'Amico, V Venuti) (Cham: Springer, 2022) pp. 69-94, DOI:10.1007/978-3-030-60016-7_5
74. Landsberger S, Yellin J J. *Archaeolog. Sci. Rep.* **20** 622 (2018)
75. Mutin B, Minc L J. *Archaeolog. Sci. Rep.* **23** 881 (2019)
76. Sharonov I A et al. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **334** 5785 (2025)
77. Балагуров А М и др. *Успехи химии* **83** 1120 (2014); Balagurov A M et al. *Russ. Chem. Rev.* **83** 1120 (2014)
78. Farkas G et al. *Mater. Sci. Eng. A* **685** 284 (2017)
79. Васин Р Н *Кристаллография* **67** (1) 72 (2022); Vasin R N *Crystallogr. Rep.* **67** 64 (2022)
80. Shen C et al. *J. Alloys Compd.* **778** 280 (2019)
81. Beran P et al. *Intermetallics* **54** 28 (2014)
82. Shuitcev A et al. *Intermetallics* **125** 106889 (2020)
83. Shuitcev A et al. *J. Alloys Compd.* **899** 163322 (2022)
84. Kozlenko D P et al. *Phys. Procedia* **69** 87 (2015)
85. Kichanov S E et al. *Romanian J. Phys.* **64** 803 (2019)
86. Zel I Yu et al. *Cement Concrete Composites* **119** 103993 (2021)
87. Сапрыкина И А, Кичанов С Е, Козленко Д П *Кристаллография* **64** (1) 152 (2019); Saprykina I A, Kichanov S E, Kozlenko D P *Crystallogr. Rep.* **64** 177 (2019)
88. Сапрыкина И А и др. *Российская археология* (3) 36 (2018)
89. Li Y et al. *Sci. Rep.* **14** 28982 (2024)
90. Lukin E V et al. *Phys. Procedia* **69** 271 (2015)
91. Zhou J et al. *Nucl. Eng. Technol.* **52** 1277 (2020)
92. Zakharchenko T K et al. *Nanoscale* **11** 6838 (2019)
93. Napolskiy F et al. *Energy Technol.* **8** 2000146 (2020)
94. Рогожкин С В и др. *Физика металлов и металловедение* **125** (1) 101 (2024); Rogozhkin S V et al. *Phys. Met. Metallogr.* **125** 93 (2024)
95. Wang Y et al. *Food Hydrocolloids* **96** 161 (2019)
96. Yang Z et al. *Food Hydrocolloids* **124** 107350 (2022)
97. Li Z et al. *Food Hydrocolloids* **79** 170 (2018)
98. Karlsson M et al. *ACS Mater. Au* **4** 346 (2024)
99. На Н М, Fritzsche H J. *Electrochem. Soc.* **166** C3064 (2019)
100. Каменецких А С и др. *Письма в ЖТФ* **50** (17) 34 (2024); Kamenetskikh A S et al. *Tech. Phys. Lett.* **50** 31 (2024)
101. Chen Z et al. *ACS Nano* **19** 20072 (2025)
102. Jülich Forschungszentrum. Die High Brilliance Neutron Source, <https://hbs.fz-juelich.de/de>
103. Pérez M et al. *Neutron News* **31** (2–4) 19 (2020)
104. 2FDN Federation Francaise de Diffusion Neutronique. ICONE High Current Accelerator-based Neutron Source, <https://2fdn.cnrs.fr/en/compact-advanced-neutron-source-2>
105. Yamagata Y et al. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **305** 787 (2015)
106. Astrelin V T et al. *J. Nucl. Mater.* **396** (1) 43 (2010)
107. Швец П В и др. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* (7) 63 (2023); Shvets P V et al. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* **17** 792 (2023)
108. ISIS Neutron and Muon Source. Science and Technology Facilities Council, <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>
109. Spallation Neutron Source, Oak Ridge National Laboratory, <https://sns.gov/>
110. Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC, <https://j-parc.jp/c/en/>
111. Chen H et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **1078** 170431 (2025)
112. European Spallation Source, <https://ess.eu/>
113. Выбин С С и др. *Прикладная физика* (4) 29 (2022)
114. Капчинский И М и др. *Приборы и техника эксперимента* (2) 19 (1970)
115. Sechi F, Vujatti M *Solid State Microwave High-Power Amplifiers* (Boston: Artech House, 2009)
116. Smirnov A, Krasnov A, Rezanov I, Ivanov E, Nikolskiy K, Polikhov S, Sharkov G "The layout of 352 MHz 400 kW RF power amplifier", in *Proc. of the North American Particle Accelerator Conf., PAC2013, 29 September–04 October 2013, Pasadena, CA, USA*, p. 937–939
117. Bychanok D et al. "Design and characteristics of cryostat for testing of low-beta 325 MHz half-wave resonators", in *XXVII Russian Particle Accelerator Conf., RuPAC2021, Russia, Alushta, Crimea, 2021*, p. 165, DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA16
118. Ковальчук М В и др. *Кристаллография* **67** 795 (2022); Kovalchuk M V et al. *Crystallogr. Rep.* **67** 739 (2022)
119. Институт ядерных исследований РАН, <https://www.inr.ru/>
120. Лапин Р Л и др. *Физика плазмы* **49** (2) 193 (2023); Lapin R L et al. *Plasma Phys. Rep.* **49** 272 (2023)
121. Выбин С С и др. *Письма в ЖТФ* **49** (24) 61 (2023); Vybin S S et al. *Tech. Phys. Lett.* **49** (12) 123 (2023)
122. Кропачев Г Н и др. *Сибирский физический журн.* **19** (4) 20 (2024)
123. Ковальчук М В, Смольский С Л, Коноплев П Л *Кристаллография* **66** (2) 184 (2021); Kovalchuk M V, Smolskiy S L, Konoplev P L *Crystallogr. Rep.* **66** 188 (2021)
124. Ковальчук М В и др. *Кристаллография* **66** (2) 191 (2021); Kovalchuk M V et al. *Crystallogr. Rep.* **66** 195 (2021)

Compact neutron source DARIA in Russian strategy for developing neutron research

T.V. Kulevoy⁽¹⁾, S.V. Grigoriev^(2,3,*), N.A. Kovalenko^(2,3), K.A. Pavlov^(2,3), E.V. Moskvina^(2,3), N.A. Grigoryeva⁽⁴⁾, E.A. Kravtsov⁽⁴⁾, V.A. Skalyga⁽⁵⁾, I.V. Izotov⁽⁵⁾, G.N. Kropachev⁽¹⁾, A.L. Sitnikov⁽¹⁾, N.V. Mushnikov⁽⁴⁾, L.V. Kravchuk⁽⁶⁾

⁽¹⁾ National Research Center 'Kurchatov Institute', pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ St. Petersburg State University, Universitetskaya naberezhnaya 7-9, 199034 St. Petersburg, Russian Federation

⁽³⁾ The National Research Center 'Kurchatov Institute', Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,

Orlova Roshcha 1, 188300 Gatchina, Leningradskii region, Russian Federation

⁽⁴⁾ Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. S. Kovalevskoi 18, 620137 Ekaterinburg, Russian Federation

⁽⁵⁾ A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ulyanova 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁽⁶⁾ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Otktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(*) grigoryev_sv@npni.nrcki.ru

The scientific and technological basis of the Russian compact neutron source DARIA (Dedicated for Academic Research and Industrial Applications) based on a linear proton accelerator have been developed. The DARIA source is designed to create beams of thermal and cold neutrons. We discuss the strategy for developing pulsed neutron sources based on the DARIA project in three directions: (1) the multiplication of the DARIA source in terms of deep specialization of neutron facilities, (2) increasing the DARIA source power to proton energies of 30–70 MeV, and (3) developing high-flux pulsed neutron source based on a high-current, high-energy (up to 1 GeV) proton accelerator and cascade-spallation reaction.

Keywords: compact neutron source, proton accelerator, target assembly, thermal neutrons, diffraction, reflectometry, small-angle neutron scattering

PACS numbers: 01.10.Hx, **07.07**–a, 07.77.Ka, **07.90** +c, 28.20.Cz, 28.50.Dr, 29.25.Dz

Bibliography — 124 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **196** (4) 388–402 (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2026.03.040107>

Received 22 January 2026

Physics–Uspekhi **69** (4) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2026.03.040107>