

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA¹

© 2025 г. Т. В. Кулевой^{a,*}, Г. Н. Кропачев^a, А. Л. Ситников^a, А. И. Семенников^a,
Вл. С. Скачков^a, И. В. Кильметова^a, Р. П. Куйбида^a, А. В. Козлов^a, Е. Р. Хабибуллина^a,
А. А. Малышев^a, С. Н. Андреев^a, А. О. Гребешков^a, С. В. Григорьев^{b,c}, Н. А. Коваленко^{b,c},
М. В. Булавин^{b,i}, К. А. Мухин^{b,i}, Е. В. Москвин^{b,c}, К. А. Павлов^{b,c}, Н. А. Григорьева^f,
В. А. Скалыга^d, И. В. Изотов^d, А. Ю. Гойхман^e, Е. А. Кравцов^{f,g}, С. А. Гаврилов^h

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25

^b Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

^c Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 188300, Гатчина, Ленинградская обл., Орлова роща, 1

^d Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^e Балтийский федеральный университет им. И. Канта
Россия, 236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14

^f Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук
Россия, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

^g Уральский федеральный университет
Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 2

^h Институт ядерной физики Российской академии наук
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

ⁱ Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

* e-mail: kulevoy@itep.ru

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

Представлены результаты разработки ключевых элементов компактного источника нейтронов (КИН) DARIA (neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Applications), предназначенного для научных исследований и промышленного применения. Для КИН DARIA разрабатывается импульсный протонный линейный ускоритель с энергией 13 МэВ, током 100 мА, длиной импульса 100 мкс и частотой повторения 100 имп/с. Для генерации пучка разработана усовершенствованная версия источника ионов GISMO. В результате численного моделирования определены параметры ускоряющего канала, состоящего из ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и резонаторов с трубками дрейфа (DTL). Также представлены параметры и модель гибридной магнитной линзы, предназначенной для фокусировки пучка. Для диагностики высокоинтенсивного пучка изготовлен и протестирован цилиндр Фарадея. Разработанные макеты мишенной сборки на основе бериллия и мезитиленового моде-

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

ратора подтвердили правильность выбранных технических решений. Определены физические параметры узлов нейтронных систем, исходя из достижения максимальной светосилы прибора при условии удовлетворительного инструментального разрешения.

DOI: 10.7868/S3034564225070038

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в XX веке значительной степени основан на достижениях в области материаловедения, изучении природы вещества и создании искусственных материалов. Успех в решающей степени зависит от овладения методами исследования, способными получить максимум информации о строении и свойствах материи. Одним из таких проводников для разгадки характеристик веществ является нейтрон. Благодаря уникальной комбинации свойств нейтрон обладает высокой ценностью и как объект фундаментальных исследований, и как зонд для нужд прикладных наук.

Исторически сложилось, что основными источниками нейтронов для нужд нейтронного рассеяния явились ядерные реакторы, такие как, например, ILL в Гренобле во Франции [1]. Однако в связи с ужесточением требований безопасности, предъявляемых к ядерным реакторам, все большую популярность стали приобретать нейтронные источники на основе протонных ускорителей с энергией налетающих ионов порядка 1–2 ГэВ. Согласно рекомендациям Организации для экономической кооперации и развитию, Форум мегапроектов (OECD Megascience Forum – Organization for Economic Co-operation and Development Megascience Forum), на каждом континенте необходимо иметь хотя бы один нейтронный генератор последнего поколения. Сегодня уже действуют установки в США (SNS, OKNL) [2], Англии (ISIS, Rutherford) [3], Японии (J-PARC) [4]. Близка к завершению строительства такая установка в Европе (ESS, г. Лунд, Швеция) [5]. Важным является тот факт, что протонные ускорители способны работать в импульсном режиме. Это позволяет естественным образом использовать времяпролетную технику измерений, предоставляющую дополнительную информацию об исследуемом объекте. Однако у таких установок есть слабое место – потребление электроэнергии подобными установками сопоставимо с нуждами небольшого города.

Оба рассмотренных метода генерации нейтронных пучков требуют колоссальных финан-

совых затрат как при строительстве (более 100 млрд руб.), так и при эксплуатации (около 10 млрд руб./год). Большая стоимость обуславливает малое количество нейтронных центров в мире, что ограничивает их доступность. Такая ситуация ведет к неполному использованию потенциала методики нейтронного рассеяния в науке и промышленности. Ответом на этот вызов призвано стать создание сети компактных источников нейтронов (КИН), которые обеспечили бы доступность нейтронных пучков широкому кругу исследователей [6, 7]. Стоимость источника при этом составляет 7–10 млрд руб., а его эксплуатация около 500 млн руб./год. Недавние достижения в области ускорительных технологий и нейтронного проектирования сделали возможным строительство маломасштабных нейтронных установок на базе ускорителей. Это открывает новые возможности для научных и образовательных центров войти в область нейтронной физики со скромными инвестициями и без проблем, связанных со строительством нового исследовательского реактора. Такие установки могут быть использованы в разнообразных областях, например в материаловедении, ядерной физике, медицинской физике, инженерии и культурном наследии. В марте 2010 г. в Гриндельвальде в Швейцарии было объявлено об организации союза компактных источников нейтронов на ускорителях (UCANS) [8], который объединяет специалистов, работающих над созданием компактных источников нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц.

На волне всемирного интереса к компактным источникам нейтронов мы представляем российскую инициативу создания подобного источника – проект DARIA (neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Application), создаваемый для научных исследований и применения в промышленности [9]. Задачей проекта является разработка новой концепции и связанной с ней элементной базы построения импульсно-периодических ускорителей протонов для создания компактных источников нейтронов с целью оснащения ими научных и образовательных центров Российской Федерации.

Решение этой задачи позволит создать инфраструктуру нейтронных исследований, охватывающую всю территорию страны от Калининградской области до Дальнего Востока.

С практической точки зрения КИН характеризуется следующими основными чертами.

1. Плотность потока нейтронов на образце сравнима с установками, расположенными на ядерных реакторах средней мощности (10 МВт).

2. Стоимость комплекса составляет по крайней мере на два порядка меньше традиционных источников (7–10 млрд руб.) [10].

3. Площадь, необходимая для создания комплекса, составляет около 1000 м².

4. Сертификация подобного источника сравнительно проста, так как в ходе эксплуатации не используются и не производятся делящиеся материалы.

В сумме эти факторы позволят размещать подобные источники в университетах и небольших исследовательских центрах.

Следует отметить, что создание в рамках проекта DARIA сильноточного ускорителя протонов, помимо использования его для генерации нейтронного потока, найдет применение и в микроэлектронике для улучшения методами радиационной модификации параметров *p-n*-перехода для нужд силовой электроники, ВЧ-электроники и т.д. Также ускоритель будет полезен в медицине для промышленной наработки короткоживущих изотопов для радиофармпрепаратов, бор-нейтронозахватной терапии и т.д.

В рамках проекта DARIA создается линейный ускоритель протонного пучка с энергией 13 МэВ, током 100 мА, длиной импульса 100 мкс и частотой повторения 100 имп/с.

2. СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЯ

2.1. Общая компоновка ускорителя

Для КИН DARIA разрабатывается импульсный протонный линейный ускоритель с энергией 13 МэВ, частотой 162.5 МГц и током пучка 100 мА (рис. 1).

Ускоритель состоит из источника ионов на основе электронно-циклотронных резонансных (ЭЦР) разрядов, поддерживаемого излучением гиротрона, ускорителя с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и ускорителя с трубками дрейфа (DTL). Секция DTL имеет модульную структуру и состоит из шести отдельных индивидуально фазированных

резонаторов Н-типа (Н-DTL) с магнитными квадрупольями, расположенными между резонаторами для фокусировки луча. Эта структура Н-DTL обеспечивает компактность линака и позволяет проводить его последовательную настройку и ввод в эксплуатацию (табл. 1).

Таблица 1. Параметры ускоряющего канала для КИН DARIA

Параметр	Величина
Рабочая частота, МГц	162.5
Ускоряемые ионы	Протоны
Ток инжекции, мА	100
Энергия ускоренного пучка, МэВ	13
Максимальная напряженность электрического поля	1.8 Кр
Отношение акцептанса канала к эмиттансу пучка	3
Длина ускоряющего канала, м	~16
Трансмиссия пучка, %	99.5
Суммарные потери мощности, МВт	~2.2

2.2. Ионный источник на основе плазмы ЭЦР-разряда

Для импульсного варианта предлагается использовать вариант ускорителя под параметры пучка с источником ионов GISMO, разработанный в ИПФ РАН (Нижний Новгород) [11]. Для генерации плазмы используется 28 ГГц/10 кВт гиротрон, что позволяет достигать ее плотности до 10¹³ см⁻³ и обеспечивать рекордные плотности экстрагируемого ионного пучка. В источнике используется компактная магнитная ловушка, полностью изготовленная из постоянных магнитов, оригинальная система формирования ионного пучка с неоднородным ускоряющим полем, а также реализуется рекордный удельный энерговыход в плазму до 250 Вт/см³ (рис. 2) [12]. Совокупность уникальных параметров установки и специально разработанных инженерных решений позволяет получать на выходе системы ионные пучки с током более 100 мА и уникальным составом – протонный пучок без молекулярной примеси, не требующий сепарации перед инжекцией. Все составные части источника изготовлены и проходят испытания [13].

Источник разрабатывается на основе прототипа, уже действующего в ИПФ РАН. На прототипе были проведены измерения эмиттанса пучка, что позволило приступить к разработке ускоряющего канала под эти параметры [14].

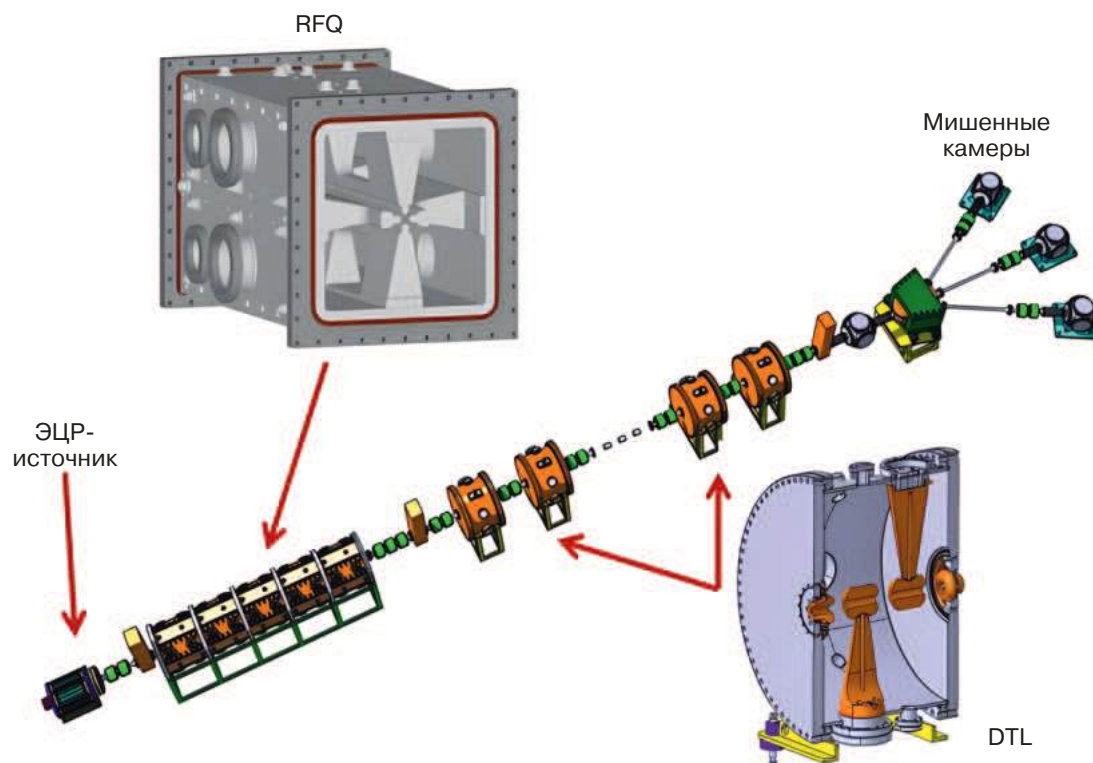


Рис. 1. Структура ускорителя для КИН DARIA.

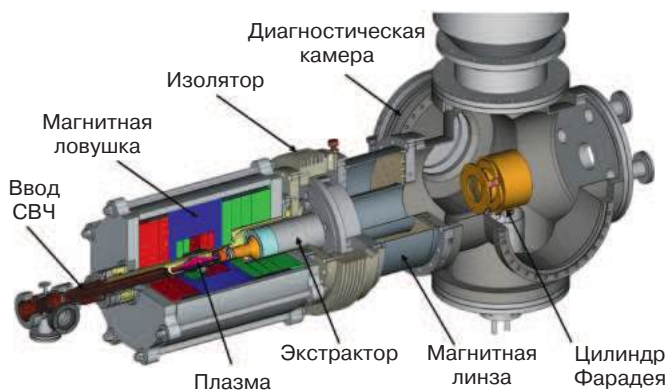


Рис. 2. Конструкция ионного ЭЦР-источника для проекта DARIA.

Для моделирования динамики пучка был взят протонный пучок с нормализованным эмиттансом $2\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ с гауссовым распределением на выходе источника ионов.

2.3. Ускоряющий канал

2.3.1. RFQ. Параметры ускорителя RFQ для КИН DARIA представлены в табл. 2 [15]. При выборе параметров RFQ, была использована методика, основанная на законах подобия [16]. Для компактности линака рабочая резонансная частота была выбрана равной 162.5 МГц.

Максимальная напряженность электрического поля на поверхности ограничена величиной 250 кВ/см, что составляет 1.8 Кр (в единицах Килпатрика) [17]. Адиабатическое группирование пучка осуществляется в квазистационарном режиме сгустка [18]. Выходная энергия RFQ определяется требованиями полного захвата пучка в режим ускорения в секции DTL и составила 3.3 МэВ.

Для моделирования динамики пучка протонов в ускоряющем канале использовался пакет TraceWin [19]. Результат моделирования представлялся в графическом виде с использованием программы PlotWin (рис. 3) [20].

Для RFQ выбрана структура со смещенными окнами связи [21]. По результатам моделирования динамики пучка [15] на основе численного моделирования [22] разработана конструкция секции RFQ (рис. 4) и ведется изготовление полномасштабного макета силами ВНИИТФ им. Забабахина и ИЯФ СО РАН им. Будкера. Параметры ускорителя RFQ для КИН DARIA представлены в табл. 2.

2.3.2. DTL. Пучок, ускоренный в RFQ, перезахватывается и ускоряется до 13 МэВ в ускорителе с трубками дрейфа (DTL) [23]. Для канала DTL выбрана схема в виде цепочки из шести

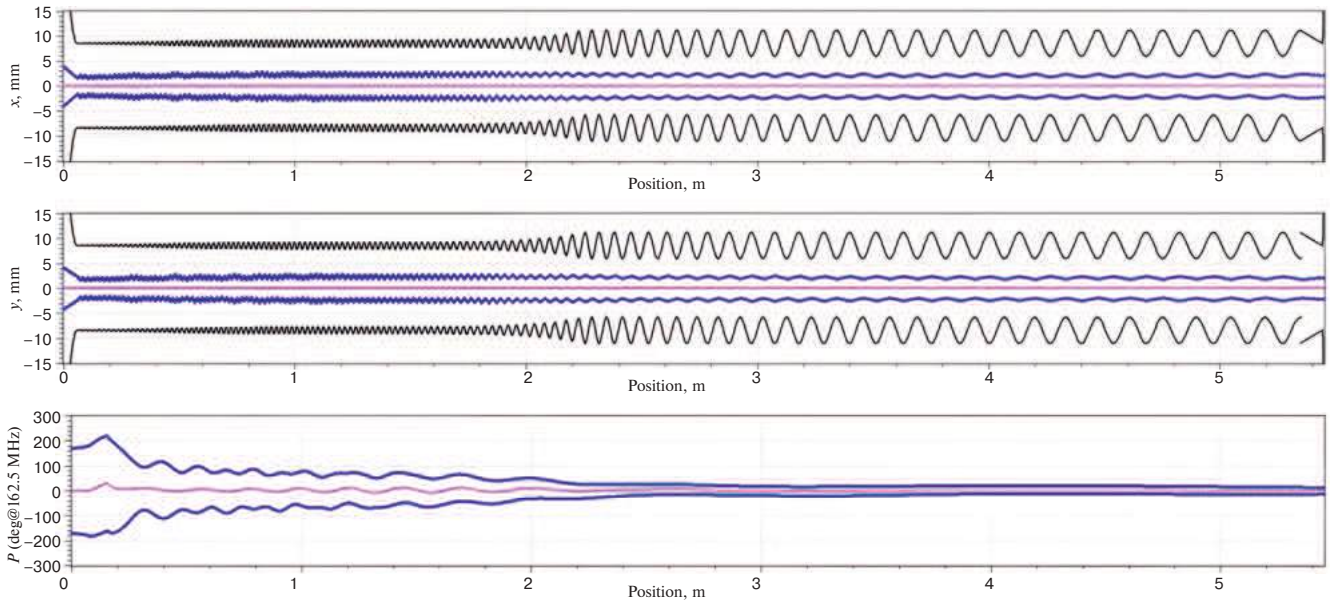


Рис. 3. Результат моделирования динамики пучка в канале RFQ.

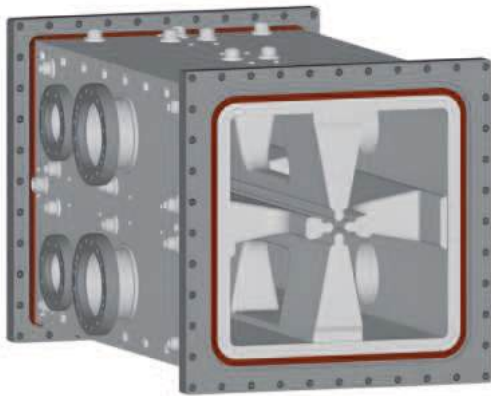


Рис. 4. Секция резонатора RFQ со смещенными окнами связи.

резонаторов ИН-DTL. Поперечная фокусировка пучка обеспечивается магнитными квадрупольными линзами, расположенными между резонаторами. Анализ различных периодов DTL показал, что период FOD с использованием пяти зазорных резонаторов ИН-DTL является предпочтительным. Выполненное моделирование динамики пучка (рис. 5) позволило сформировать канал, обеспечивающий 100-процентный захват пучка в режим ускорения. По результатам численного моделирования были определены геометрические параметры резонаторов и разработана конструкция макета полномасштабного резонатора DTL (рис. 6, табл. 3).

Для шестимерного согласования пучка, ускоренного RFQ, с входными параметрами DTL используется МЕВТ (канал транспортировки пучка средней энергии), состоящий из четырех квадрупольных линз и двух группирователей.

Таблица 3. Основные параметры DTL

Наименование показателей	Величина
Частота ускоряющего поля, МГц	162.5
Энергия пучка, МэВ	3.3–13
Число периодов фокусировки	6
Максимальная напряженность поля на поверхности трубок дрейфа	1.8 Кр
Длина апертурного канала, м	5.9
Трансмиссия, %	100
Диаметр резонаторов DTL, мм	420
Длина резонаторов DTL, мм	425–701
Собственная добротность	11 000
ВЧ-мощность, кВт	150–350

Таблица 2. Параметры ускоряющей структуры RFQ

Наименование показателей	Величина
Режим работы	Импульсный
Ток инъекции, мА	100
Рабочая частота, МГц	162.5
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов	1.8 Кр
Энергия пучка, МэВ	0.06–3.3
Длина, м	5.4
Трансмиссия, %	99.5
Диаметр RFQ, мм	420
Добротность	13 000
ВЧ-мощность, кВт/м	125
ВЧ-мощность, кВт	680

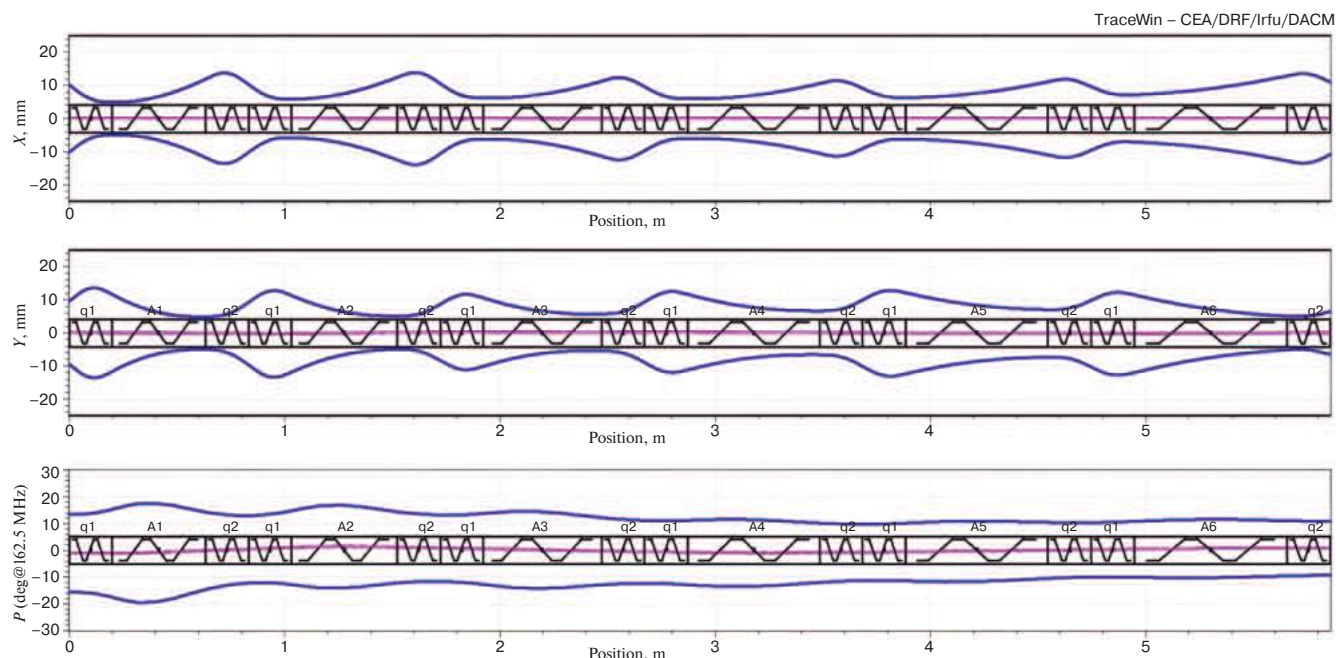


Рис. 5. Огибающие пучка в канале DTL КИИ DARIA.



Рис. 6. Схема резонатора DTL.

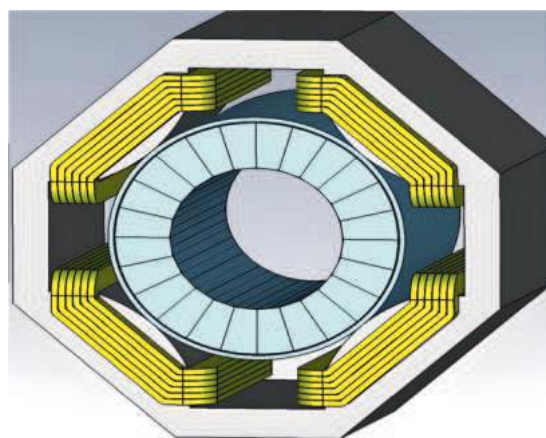


Рис. 7. Модель гибридной линзы с постоянным электромагнитом.

2.3.3. Магнитные элементы ускорителя. Разрабатываемый DTL состоит из 6 периодов фокусировки типа FOD, каждый из которых содержит 5-зазорный резонатор и две квадрупольные линзы на постоянных магнитах с постоянными градиентами 14.64 Тл/м, различающимися только знаком. Предлагается для канала использовать гибридные линзы, где основное поле создается системой из постоянных магнитов, а для обеспечения возможности вариации величины поля используются дополнительные обмотки, расположенные вокруг постоянных магнитов (рис. 7) [24].

По результатам проведенного моделирования определены параметры квадрупольной линзы, созданной на базе постоянных магнитов из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (табл. 4). Для проведения динамических расчетов определено 3D-распределение магнитного поля в секторной квадрупольной линзе из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ сплава намагниченности $\mu_0 I = 1.05$ Тл, обеспечиваемой современным уровнем производства постоянных магнитов этого класса. В предложенной конструкции эффективность гибридной линзы достигается при диапазоне регулировки интеграла градиента до $\pm 20\%$ от

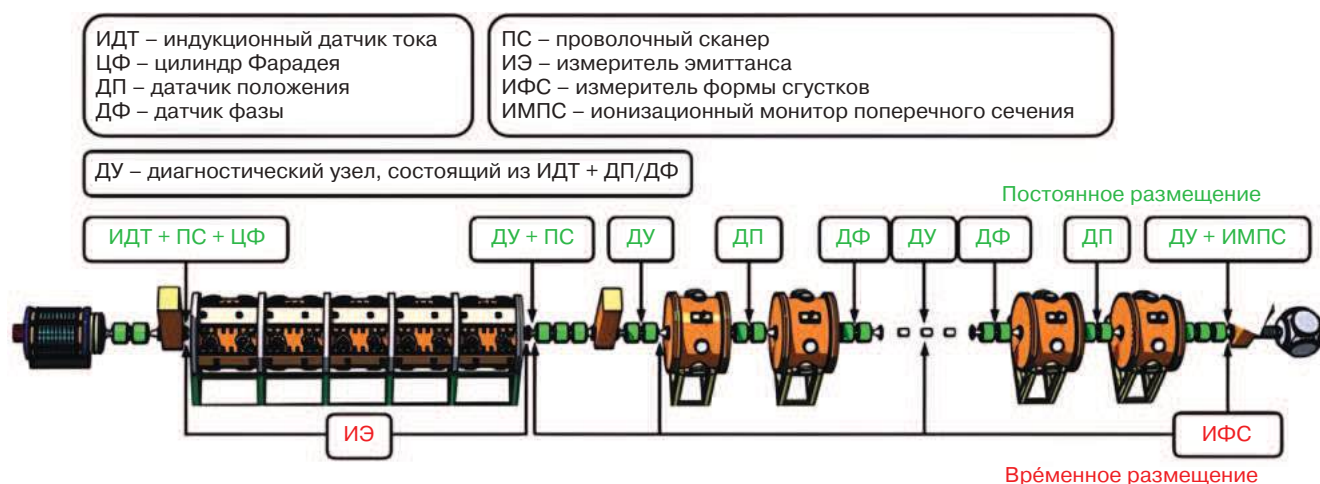


Рис. 8. Схема системы диагностики.

средней величины поля, что позволяет обеспечить настройку канала при работе с пучком.

Таблица 4. Основные параметры гибридной квадрупольной линзы

Наименования показателей	Величина
Геометрическая длина, мм	120
Градиент поля гибрида, Тл/м	30
Интеграл градиента, Тл	3.7
Нелинейность на расстоянии 75% от радиуса апертуры, %	Менее 0.7
Ток возбуждения, А	210
Мощность рассеяния (постоянный ток), кВт	5

2.3.4. Диагностика пучка. Для измерения параметров пучка в процессе наладки и регулярной работы ускорителя предусмотрена система диагностики, контролирующая ток, поперечные и продольные характеристики пучка [25]. Одной из основных проблем диагностики в данном ускорителе является значительная импульсная и средняя мощность пучка в совокупности с относительно низкой энергией, что существенно ограничивает выбор возможных диагностических приборов и методов, поэтому предусмотренный комплект оборудования (рис. 8) включает в себя три типа измерителей:

- надежные быстрые детекторы, показывающие основные параметры пучка и используемые для непрерывной проверки общей функциональности ускорителя неразрушающим способом: индукционные датчики тока, емкостные датчики положения и фазы, ионизационный монитор поперечного сечения пучка;

- оборудование, используемое для ежедневных проверок качества и стабильности парамет-

ров пучка, а также для измерений в процессе перестройки параметров ускорителя: проволочные сканеры-профилометры, охлаждаемый цилиндр Фарадея (рис. 9) для измерений тока и запираания пучка в начальной части ускорителя;

- сложное диагностическое оборудование, используемое для настройки новых режимов работы или новых компонентов ускоряющей структуры, а также для поиска решений по оптимизации и расширению функциональных возможностей машины: измерители эмиттанса и формы сгустков.

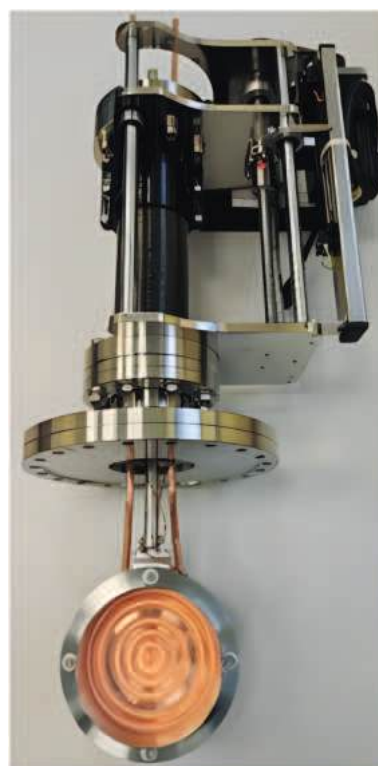


Рис. 9. Цилиндр Фарадея.

Цилиндр Фарадея (ЦФ) размещается на выходе источника и помимо измерения тока пучка выполняет функцию аварийного прерывателя тока пучка. Цилиндр Фарадея разработан в ИЯИ РАН и прошел тестовые испытания на источнике в этом институте (рис. 9).

2.3.5. Мишенная камера. Выбор мишени для генерации нейтронов является одной из ключевых задач. Мишени для КИН ускорительного типа с пучком протонов в средних энергетических диапазонах изготавливаются из легких химических элементов. Основным критерием

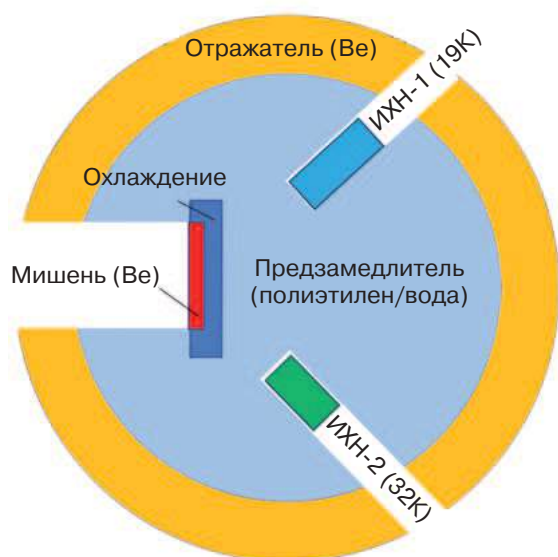


Рис. 10. Схема мишенной сборки КИН.

выбора материала является высокое сечение $p-n$ -реакции. В случае использования бериллиевой мишени дифференциальный выход нейтронов составляет 33 нейтрона на 1000 протонов. Компактные размеры мишени (около 5 см в диаметре и 1.1 мм в толщину) обеспечат относительно высокую плотность потока нейтронов [26, 27].

Для решения актуальных задач в области физики конденсированного состояния вещества требуются источники, способные генерировать нейтроны в диапазоне длин волн 1–12 Å. Практически весь спектр нейтронов, генерируемых бериллиевой мишенью, лежит вне указанного интервала. Для смягчения спектра нейтронов и увеличения количества нейтронов с большими длинами волн в составе мишенной сборки используются замедлитель и, как правило, набор холодных источников нейтронов (ИХН) (рис. 10).

Малые размеры мишени и теплового замедлителя, размещаемого вокруг мишени, обуславливают и компактную биологическую защиту. Разрабатываемая система охлаждения предназначена отводить около 40 кВт среднего тепловыделения мишени и ее окружения [28, 29]. При указанных ранее параметрах ускорителя и мишени возможно добиться плотности потока нейтронов в импульсе до $5 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Нейтронные установки оптимизируются совместно с соответствующими им замедлителями нейтронов. На сегодняшний день прорабатываются концепции и проводится численное моделиро-

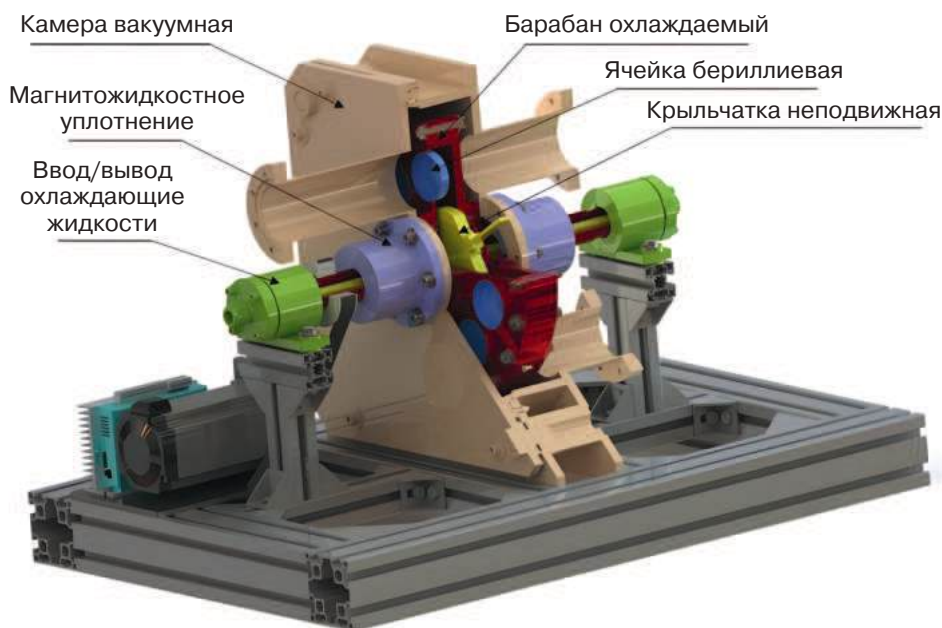


Рис. 11. Мишенная сборка КИН DARIA.

вание трех базовый нейтронных станций: дифрактометра, рефлектометра и установки малоуглового рассеяния [30–33].

В рамках проекта силами БФУ им. И. Канта разработан и изготовлен полномасштабный макет вращающейся и активно охлаждаемой мишенной сборки для проверки основных конструктивных решений (рис. 11). Основные элементы системы: неподвижная вакуумная камера; вращающийся охлаждаемый барабан; бериллиевые ячейки, вмонтированные в крышку барабана; неподвижная крыльчатка, предназначенная для изменения направления потоков воды; магнитожидкостные уплотнения; герметичные стойки ввода/вывода охлаждающей жидкости. Фотография макета представлена на рис. 12 [28].

Мишенная сборка представляет собой один из сложнейших и ключевых элементов компактного источника нейтронов, в котором необходимо получить максимально возможный выход тепловых или даже холодных нейтронов и при этом обеспечить умеренные температуры на мишени, т.е. “снять” с мишени около 40 кВт. Окончательное решение этой задачи еще не получено, и еще одним способом охлаждения мишени является использование малогабаритной системы охлаждения с использованием миниканалов [29].

В максимальной комплектации КИН будет оснащен двумя мишенными сборками (одной холодной и одной тепловой), и каждая из сборок будет иметь от трех до пяти нейтронных станций к нейтронным станциям [30–33]. В зависимости от решаемых задач в начальной части нейтронных станций устанавливается соответствующий модератор. Это может быть мезитиленовый модератор, модератор на параводороде или метане.

Моделирование нейтронных систем проводилось методом Монте-Карло в программном пакете McStas [34]. Для трассировки нейтронных траекторий создается модель, последовательно имитирующая работу всех узлов станции, оказывающих непосредственное влияние на профиль используемого нейтронного пучка: модель источника с временной зависимостью генерации и светосильными характеристиками, оптический тракт, каскад прерывателей, детектор с временным разрешением. Физические параметры узлов определены, исходя из достижения максимальной светосилы прибора при условии удовлетворительного инструментального разрешения.

Нейтронный дифрактометр предназначен для определения кристаллической и магнитной структуры твердых тел. Для оптимального соотношения разрешение–светосила определены диапазон длин волн нейтронов, частота и длительность импульсов. Времяпролетный дифрактометр с пролетной базой $L = 23.5$ м имеет рабочий спектральный диапазон $\lambda = 1–5$ Å, разрешение $\Delta d/d = 0.005$ и длину импульса нейтрона $\Delta t = 30$ мкс [30].

Установка малоуглового рассеяния нейтронов – классический инструмент точечной геометрии для исследования структур нано- и субмикромасштабов. В качестве прототипа рассматриваем установку ЮМО на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. В состав установки входят такие ключевые элементы, как холодный замедлитель нейтронов, каскад прерывателей пучка, нейтронный канал, коллимационная система, узел образца и широкоапертурный позиционно-чувствительный детектор (ПЧД). Рассматривается установка, использующая лишь часть спектра нейтронного излучения. Такое решение является ключевым для маломощного источника, так как позволяет максимально увеличить частоту импульсов и, таким образом, поднять среднюю по времени мощность/интенсивность источника. При общей длине установки времяпролетной базы $L = 15$ м длина нейтронного импульса может достигать $\tau = 400$ мкс, а частота повторения импульсов – величины $f = 40$ Гц (коэффициент заполнения 1.6%) для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 6$ Å (2–8 Å или 6–12 Å) и разрешения $\Delta\lambda = 0.14$ Å. Расчеты показывают, что метод малоуглового рассеяния нейтронов может быть реа-

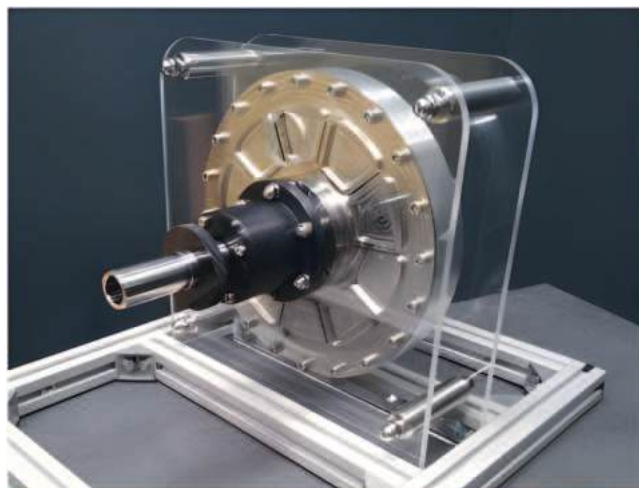


Рис. 12. Прототип мишенной сборки.

лизован на КИН со светосилой $4 \cdot 10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для коллимационной схемы (1 + 1) м и $2 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для коллимационной схемы (5 + 5) м в диапазоне переданных импульсов $3 \cdot 10^{-3} - 0.5 \text{ \AA}^{-1}$ [31].

Времяпролетный нейтронный рефлектометр с горизонтальной плоскостью рассеяния предназначен для определения профиля плотности длины рассеяния нейтронов в глубь пленки, обусловленного изменениями ее структуры или намагниченности. Рефлектометр нацелен на исследование процессов диффузии, сорбции, окисления и других явлений на поверхностях и границах раздела сред в полупроводниковых, металлических, полимерных или биологических наноструктурах. На рефлектометре, работающем по времяпролетному методу, измеряется интенсивность отражения от плоскости нейтронного пучка с широким спектральным распределением в зависимости от длины волны при фиксированном угле скольжения. Дополнительная опция рефлектометра для КИН DARIA – измерения с использованием как поляризованных, так и неполяризованных нейтронов, – существенно расширяет круг материаловедческих задач. Рабочий диапазон рефлектометра по длинам волн нейтронов располагается в интервале $1-7 \text{ \AA}$, а по переданным импульсам $0.001-0.5 \text{ \AA}^{-1}$ [32]. Рабочий диапазон длин волн, при заданной плотности потока нейтронов на образце, определяет окончательный выбор частоты и длины импульса нейтронов. Спектр шириной $\Delta\lambda$ выре-

зается с помощью двухдискового прерывателя из нейтронных импульсов, имеющих широкое спектральное распределение, превышающее $\Delta\lambda$. При длине нейтронного импульса $\tau = 100 \text{ мкс}$ и общей длине времяпролетной базы $L = 8 \text{ м}$ для диапазона длин волн $\Delta\lambda = 3 \text{ \AA}$ и разрешения $\Delta\lambda \approx 0.05 \text{ \AA}$ частота повторения импульсов может достигать $f = 165 \text{ Гц}$ при коэффициенте заполнения 1.66%. Если же диапазон длин волн выбран шире, $\Delta\lambda = 6 \text{ \AA}$, то при тех же параметрах частота должна быть не больше, чем $f = 82 \text{ Гц}$ (коэффициент заполнения 0.83%) [32].

В зависимости от решаемых задач в начальной части нейтронного канала устанавливается соответствующий модератор. Это может быть мезитиленовый модератор, модератор на параводороде или метане. В ходе проекта разработан и изготовлен макет криогенного мезитиленового модератора (рис. 13). Проведены успешные испытания на специально собранном стенде в ОИЯИ [35]. Максимальная поглощенная доза в криогенном замедлителе компактного нейтронного источника за один сеанс (10–12 суток) не превышает 10–15 МГр, что позволяет использовать цельный замороженный кусок мезитилена. Ключевой особенностью мезитиленового холодного замедлителя является возможность изменять температуру хладагента в широком интервале температур $T = 25-220 \text{ К}$, регулируя тем самым положение максимума нейтронного спектра. Недостаток замедлителя на мезитилене состоит в меньшем выходе нейтронов в холодном режиме по сравнению с параводородом.

Предварительно проведены измерения выхода нейтронов из бериллиевой мишени при облучении ее протонным пучком с током



Рис. 13. Криогенный мезитиленовый модератор, разработанный для КИН DARIA.

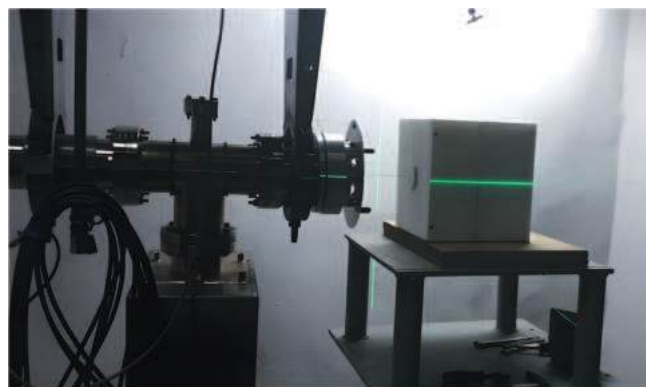


Рис. 14. Установка бериллиевой мишени и полиэтиленового замедлителя на выходе протонного линейного ускорителя И2.

100 мА на выходе линейного ускорителя И2 (рис. 14) [36]. Определены скорости реакций, плотности потока частиц (протонов и нейтронов) и их погрешности.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные макеты ключевых элементов КИН убедительно показывают, что установка может быть построена в заявленном виде (13 МэВ, 100 мА, 100 мкс, 100 имп/ч, 3–5 мишенных станций) за пять лет, причем первые эксперименты можно будет проводить уже через три года.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- <https://www.ill.eu/>
- <https://neutrons.ornl.gov/sns>
- <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>
- <https://j-parc.jp/c/en/>
- <https://europeanspallationsource.se/>
- Brückel T., Gutberlet T., Schmidt S., Alba-Simionesco C., Ott F., Menelle A.* // *Neutron News*. 2020. V. 31. Iss. 2-4.
<https://doi.org/10.1080/10448632.2020.1819125>
- International Atomic Energy Agency. Compact Accelerator Based Neutron Sources. Report, IAEA-TEC-DOC-1981, IAEA, Vienna. 2021.
- <https://ucans.org/publication.html>
- Павлов К.А., Коник П.И., Коваленко Н.А., Кулевой Т.В., Серебренников Д.А., Субботина В.В., Павлова А.Е., Григорьев С.В.* // *Кристаллография*. 2022. Т. 67. № 1. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S002347612201009X>
(*Pavlov K.A., Konik P.I., Kovalenko N.A., Kulevoy T.V., Serebrennikov D.A., Subbotina V.V., Pavlova A.E., Grigorev S.V.* // *Crystallogr. Rep.* 2022. V. 67. № 1. P. 5.)
<https://doi.org/10.1134/S1063774522010096>)
- LENS Ad-hoc Working Group CANS. Low energy accelerator-driven neutron sources. Report. 2020.
<https://www.lens-initiative.org/wp-content/uploads/2021/02/LENS-Report-on-Low-Energy-Accelerator-driven-Neutron-Sources.pdf>
- Skalyga V.A., Izotov I.V., Golubev S.V., Razin S.V., Sidorov A.V., Viktorov M.E.* // *The Review of scientific instruments*. 2022. V. 93(3). P. 033502.
<https://doi.org/10.1063/5.0075486>
- Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А.* // *Прикладная физика*. 2022. № 4. С. 29.
<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-4-29-33>
- Выбин С.С., Изотов И.В., Миронов Е.А., Палашов О.В., Скалыга В.А.* // *Поверхность. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2023. № 7. С. 4.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023070191>
- Барабин С.В., Кропачев Г.Н., Лукашин А.Ю., Кулевой Т.В., Выбин С.С., Голубев С.В., Изотов И.В., Киселева Е.М., Скалыга В.А., Григорьев С.В., Коваленко Н.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47. № 10. С. 7.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50964.18628>
- Кропачев Г.Н., Кулевой Т.Н., Ситников А.Л., Хабибуллина Е.Р., Виноградов С.В.* // *Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2022. Т. 18. № 4. С. 567.
- Wadlinger E.A.* // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1985. V. NS-32. № 5.
- Kilpatrick W.D.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1957. V. 28. № 10. P. 824–826.
<https://doi.org/10.1063/1.1715731>
- Капчинский И.М.* // *Теория линейных резонансных ускорителей*. Москва: Энергоиздат, 1982. С. 163.
- <http://irfu.cea.fr/en/Phocea/Page/index.php?id=780>
- <http://irfu.cea.fr/en/Phocea/Page/index.php?id=783>
- V. A. Andreev, G. Parisi* // *Proceedings of EPAC'94*. 1994. P. 1300.
- Kropachev G., Sitnikov A., Kulevoy T.* // *Cybernetics and Physics*. 2022. V. 11. № 4. P. 205.
<https://doi.org/10.35470/2226-4116-2022-11-4-205-209>
- Кропачев Г.Н., Кулевой Т.Н., Ситников А.Л., Хабибуллина Е.Р., Скачков В.С., Сергеева О.С.* // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2023. № 7. С. 27.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023070075>
- Kilmetova I.V., Kozlov A.V., Kropachev G.N., Kulevoy T.V., Liakin D.A., Sergeeva O.S., Skachkov V.S., Stasevich Yu. B.* // *J. Surf. Investig.* 2023. V. 17. № 4. P. 772.
<https://doi.org/10.1134/S1027451023040067>
- Гаврилов С.А., Тумов А.И.* // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2023. № 7. С. 52.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023070051>
- Subbotina V.V., Pavlov K.A., Kovalenko N.A., Konik P.I., Voronin V.V., Grigoriev S.V.* // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2021. V. 1008. P. 165462.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165462>
- Мороз А.Р., Коваленко Н.А.* // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2023. № 7. С. 71.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023070099>

28. Швец П.В., Прокопович П.А., Фатьянов Е.И., Клементьев Е.С., Мороз А.Р., Коваленко Н.А., Гойхман А.Ю. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 7. С. 63.
<https://doi.org/10.31857/S102809602307018X>
29. Mastinu P., Martin-Hernández G., Praena J., Gramegna F., Prete G., Agostini P., Aiello A., Phoenix B. // IL Nuovo Cimento C. 2016. № 6. P. 193.
<https://doi.org/10.1393/ncc/i2015-15193-y>
30. Москвин Е.В., Григорьева Н.А., Коваленко Н.А., Григорьев С.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 7. С. 77.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023070105>
31. Павлов К.А., Коваленко Н.А., Азарова Л.А., Кравцов Е.А., Кулевой Т.В., Григорьев С.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 7. С. 84.
<https://doi.org/10.31857/S1028096023070130>
32. Сыромятников В.Г., Григорьева Н.А., Григорьев С.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 7. С. 93.
<https://doi.org/10.31857/S102809602307018X>
33. Григорьев С.В., Коваленко Н.А., Павлов К.А., Москвин Е.В., Сыромятников В.Г., Григорьева Н.А. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 11. С. 1561.
<https://doi.org/10.3103/S1062873823703690>
34. Lefmann K., Nielsen N.K. // Neutron News. 1999. V. 10. № 3. P. 20.
<https://doi.org/10.1080/10448639908233684>
35. Булавин М.В., Галушко А.В., Скуратов В.А., Мухин К.А., Ыскаков А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 10. С. 1.
<https://doi.org/10.31857/S1028096022100053>
36. Титаренко Ю.Е., Батяев В.Ф., Бландинский В.Ю., Живун В.М. // Ядерная физика. 2022. Т. 85. № 6. С. 388.
<https://doi.org/10.31857/S0044002722060137>