

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 8, 2025

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Новые возможности применения изогнутых кристаллов на современных ускорителях

А.Г. Афонин, А.Г. Васильева, М.Ю. Чесноков, Ю.А. Чесноков, А.А. Янович 4

Диагностика пучка для стенда облучения линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

С.А. Гаврилов, В.А. Гайдаш, А.И. Титов 11

Флуоресцентный монитор на низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН

С.А. Гаврилов, Ю.Ж. Калинин, И.И. Полоник, А.И. Титов 17

Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса

Т.В. Кулевой, Н.В. Завьялов, Г.Н. Кропачев, А.Л. Ситников, В.С. Скачков, В.Г. Кузьмичев, Д.А. Лякин, С.В. Барабин, А.И. Семенников, Д.Н. Селезнев, В.К. Семячкин, В.С. Столбунов, А.Ю. Орлов, Р.П. Куйбида, А.В. Козлов, Ю.Б. Стасевич, В.И. Николаев, А.И. Марченков, Н.М. Кристи, А.В. Шумиуров, Ю.А. Сатов, А.Н. Балабаев, А.А. Васильев, А.А. Лосев, И.А. Хрисанов, С.В. Виноградов, Е.Р. Хабибуллина, И.В. Кильметова, А.А. Мальшев, М.С. Саратовских, А.С. Борисков, М.А. Гузов, Л.Е. Поляков, М.И. Макарова, Д.С. Труфанов, И.А. Машин, А.В. Машагин, М.Л. Сметанин, А.В. Тельнов, А.М. Опекунов, М.В. Смирнов, П.А. Соколов, Н.М. Сереброва 23

Каналы транспортировки пучков циклотрона У400Р для нового экспериментального зала

В.И. Лисов, В.И. Басс, И.А. Иваненко, И.В. Калагин, Н.Ю. Казаринов, А.С. Забанов 32

Накопительное кольцо для комптоновского источника гамма-квантов в диапазоне от одного до 200 МэВ

Д.А. Никифоров, Н.А. Винокуров 39

Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего RFQ-резонатора

А.Л. Ситников, Д.Н. Селезнев, Г.Н. Кропачев, А.И. Семенников, Т.В. Кулевой, Л.Е. Поляков, А.В. Тельнов 45

Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего двухазорного резонатора с трубками дрейфа

А.Л. Ситников, Д.Н. Селезнев, Г.Н. Кропачев, А.И. Семенников, Т.В. Кулевой, А.М. Опекунов, М.Л. Сметанин 50

Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего пятиазорного резонатора с трубками дрейфа

*А.Л. Ситников, Д.Н. Селезнев, Г.Н. Кропачев, А.И. Семенников, Т.В. Кулевой,
А.М. Опекунов, М.Л. Сметанин*

54

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Система управления Новосибирским комплексом ЛСЭ и пользовательскими станциями

Н.А. Винокуров, В.Р. Козак, Е.Н. Дементьев, С.С. Середняков, С.В. Тарарышкин

59

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Концепция объединителя высокой мощности на основе прямоугольного волновода

Ю.Ю. Лозеев, Т.А. Лозеева, Г.Б. Шарков, А.А. Морозов

66

Резонаторы для блока высокочастотных переходов в поляризованных атомах водорода и дейтерия

В.В. Парамонов, А.С. Белов

74

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Получение пучков ионов металлов из ЭЦР-источников в ЛЯР ОИЯИ

*А.Е. Бондарченко, С.Л. Богомолов, А.А. Ефремов, В.Н. Логинов, В.Е. Миронов,
Д.К. Пугачев, А.А. Протасов*

79

Создание каналов пучков ионов углерода для проведения радиобиологических и предклинических исследований на ускорительном комплексе У-70

*В.И. Гаркуша, С.В. Иванов, В.А. Калинин, А.В. Максимов, А.М. Маркин,
Ф.Н. Нивоскольцев, В.А. Пикалов, А.П. Солдатов, Р.Ю. Синюков*

83

Калибровка датчиков положения пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса

Ю.А. Rogovskiy, Е.А. Бехтенов

88

Энергосберегающий источник синхротронного излучения на постоянных магнитах

Н.А. Винокуров, Ш.Б. Лачынов, Д.А. Никифоров, В.Г. Ческидов

95

Измерение параметров постоянных магнитов для прототипов поворотных магнитов энергосберегающего источника синхротронного излучения

Я.И. Горбачёв, В.Г. Ческидов, О.А. Шевченко, Ш.Б. Лачынов, Н.А. Винокуров

100

Сверхпроводниковые магниты источников ионов

*Е.Р. Запретилина, Ю.А. Климченко, О.А. Ковальчук, А.Н. Лабусов, Е.А. Ламзин,
И.Ю. Родин, В.Н. Танчук, Н.А. Хитров, Т.А. Хон* 105

Серийные магнитные измерения структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA

*Д.А. Золотых, В.В. Борисов, И.И. Донгузов, О.М. Голубицкий, Г.Г. Ходжибагиян,
Б. Кондратьев, С.А. Костромин, А.В. Кудашкин, Д.Н. Никифоров, И.Ю. Николайчук,
М.М. Омеляненко, М.М. Шандов, А.В. Шемчук, И.А. Смирнов, Е.В. Золотых* 110

Изготовление сверхпроводящего квадруполья FFS

*С.С. Козуб, Ю.В. Алтухов, И.В. Богданов, А.В. Двойченков, А.П. Лунев,
А.А. Олюнин, В.М. Смирнов, Л.М. Ткаченко, В.И. Шувалов* 120

Статус производства элементов магнитно-криостатной системы коллайдера NICA. Результаты криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов

*Д.Н. Никифоров, Ю.Г. Беспалов, Г.Г. Ходжибагиян, А.А. Котова, Д.А. Золотых,
В.В. Борисов, Ю.В. Гусаков, С.А. Коровкин, А.В. Кудашкин, П.И. Кудряшов,
Г.Л. Кузнецов, М.В. Петров, Е.В. Сергеева, Р.В. Талызин* 126

Сверхпроводящий вигглер с полем 2.7 Тл и периодом 27 мм для станции “Быстропротекающие процессы” на источнике СКИФ

*А.А. Седов, А.В. Брагин, А.А. Волков, А.Н. Ерохин, А.В. Зорин, Ф.П. Казанцев,
П.В. Каноник, Н.А. Мезенцев, А.Н. Сафронов, О.А. Тарасенко, С.В. Хрущев,
В.М. Цуканов, В.А. Шкаруба* 132

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Статус экспериментальной установки радиобиологической стенд на выведенном пучке ядер углерода из ускорительного комплекса У-70

*Ю.М. Антипов, А.Г. Васильева, Д.А. Васильев, В.А. Калинин, А.В. Кошелев, С.В. Маконин,
А.В. Максимов, Е.В. Парменова, В.А. Пикалов, М.К. Полковников, А.П. Солдатов, Е.В. Корякина,
С.Н. Корякин, В.О. Сабуров, А.Н. Соловьёв, М.В. Трошина, А.А. Перевезенцев, А.С. Штемберг,
Н.П. Сирота, Е.Н. Смирнова, О.М. Розанова, Т.А. Белякова* 139

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA и его применение

*М.И. Бикчурина, Т.А. Быков, Г.Д. Верховод, И.С. Ибрагим, А.И. Касатова, Д.А. Касатов,
Я.А. Колесников, В.Д. Коновалова, А.М. Кошкарев, А.С. Кузнецов, Г.М. Остреинов, В.В. Поросев,
С.С. Савинов, Н.Ш. Сингатулина, Е.О. Соколова, И.Н. Сорокин, Т.В. Сычева, Ю.С. Таскаева,
А.А. Шуклина, И.М. Шудло, С.Ю. Таскаев* 145

Сцинтилляционный детектор для мониторинга потока нейтронов на установке для бор-нейтронозахватной терапии

В.В. Леонов, В.В. Поросев, Г.А. Савинов, С.Ю. Таскаев 151

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ НА СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ¹

© 2025 г. А. Г. Афонин^а, А. Г. Васильева^{а, *}, М. Ю. Чесноков^а,
Ю. А. Чесноков^а, А. А. Янович^а

^а Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

* e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлены новые применения изогнутых кристаллов в ускорительной науке, которые могут стимулировать не проводимые ранее эксперименты по физике высоких энергий: каналы частиц нового типа для положительных вторичных частиц, получение пучков высокоэнергетичных нейтрино и кристаллический мюонный коллайдер. Сформулированы предложения для применения кристаллов на больших адронных коллайдерах, подкрепляемые экспериментальными исследованиями как на ускорителях ЦЕРН, так и на отечественном ускорителе У-70.

DOI: 10.7868/S3034564225080019

1. ВВЕДЕНИЕ

На крупных ускорителях для исследований физики высоких энергий траекториями частиц управляют магнитооптические системы, использующие поперечное магнитное поле. В 1970-х годах профессор Э.Н. Цыганов из Дубны предложил использовать для отклонения пучков частиц изогнутые монокристаллы (рис. 1) [1]. За счет процесса каналирования (финитного движения в межплоскостном потенциале, где плотность ядер мала) частицы поворачиваются, следуя за изгибом атомных плоскостей. Идея была успешно проверена во многих экспери-

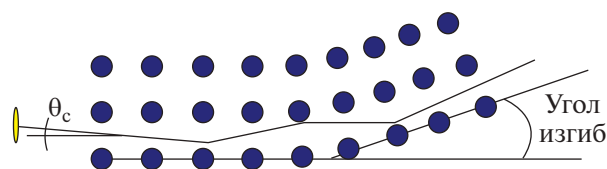


Рис. 1. Схема поворота траектории частицы в изогнутом кристалле.

ментах и внедрена на ускорителях для вывода, коллимации и деления пучков [2].

Этот метод нашел наиболее широкое практическое применение на ускорителе У-70 в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, где кристаллы используются в регулярных сеансах работы для вывода и деления пучка. Теоретические вопросы физики каналирования были детально описаны в [2], наиболее подробные экспериментальные данные были получены в эксперименте UA9 в ЦЕРН с участием ученых из России [3]. Здесь лишь кратко отметим, что эффективность отклонения частиц изогнутым кристаллом определяется отношением критического угла каналирования θ_c к расходимости пучка ϕ и убывает экспоненциально с длиной кристалла L :

$$Eff \sim (\theta_c / \phi) \cdot \exp(-L/L_d),$$

где характерный параметр L_d , называемый длиной деканалирования, линейно растет с энергией частиц и для протонов с энергией 100 ГэВ составляет 5 см в слабоизогнутом кристалле.

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

Изгиб кристалла приводит к возникновению центробежной силы, уменьшающей эффективность каналирования. Существует критический радиус каналирования R_c , при котором оно становится невозможным. Для частиц с энергией 100 ГэВ этот радиус равен 20 см для плоскости (110) кремния и также линейно растет с энергией, как и параметр L_d . Следует отметить, что критический угол каналирования (угол Линдхарда) довольно мал: $\theta_c \sim (1/E)^{1/2} = 0.02-0.002$ мрад для протонов с энергиями $E = 100-10\,000$ ГэВ. По этой причине данный метод управления пучками не является универсальным, но может быть очень полезным в нескольких случаях, особенно для вывода циркулирующего пучка и его деления в каналах частиц, где изогнутые кристаллы выполняют роль миниатюрных магнитов.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

В настоящее время на ускорителе У-70 действуют 10 специальных станций, на которых установлены 13 различных кристаллических дефлекторов CD [4]. Расположение станций с изогнутыми кристаллами в У-70 представлено на рис. 2а. Часть циркулирующего пучка направляется к кристаллу медленно нарастающим магнитным полем дополнительных катушек (так называемых бамп-магнитов). Система с обратной связью может регулировать эту часть пучка в широком диапазоне как наведение к внутренним мишеням. Данная система позволяет реализовать режим одновременного вывода пучка в разных направлениях несколькими кристаллами. Одним из способов использования изогнутых кристаллов является прямой вывод протонов из кольца ускорителя кристаллом. В этом случае используются протяженные кристаллы, которые дают возможность получать большие углы отклонения, сравнимые с $\theta_{max} = 250$ мрад. Существуют две станции такого типа в ускорителе. Они выводят пучки протонов на экспериментальные установки, которые обычно работают со вторичными частицами от внутренних мишеней. Углы изгиба для таких дефлекторов составляют (80–90) мрад, а длина – (60–70) мм.

Из-за большой длины кристалла и изгиба эффективность вывода низкая и составляет порядка 10^{-4} . Причина невысокой эффективности вывода в этих экспериментах заключается

в том, что при больших длинах и углах изгиба кристаллов захват частиц в режим каналирования происходит в основном при первом прохождении кристалла, не захваченные же частицы сильно рассеиваются и в итоге теряются. Для реализации эффективного многооборотного вывода, когда частицы, не захваченные при первом прохождении кристалла, могут захватиться в последующие прохождения, требуются кристаллы небольшой длины (около 1 мм) с малыми

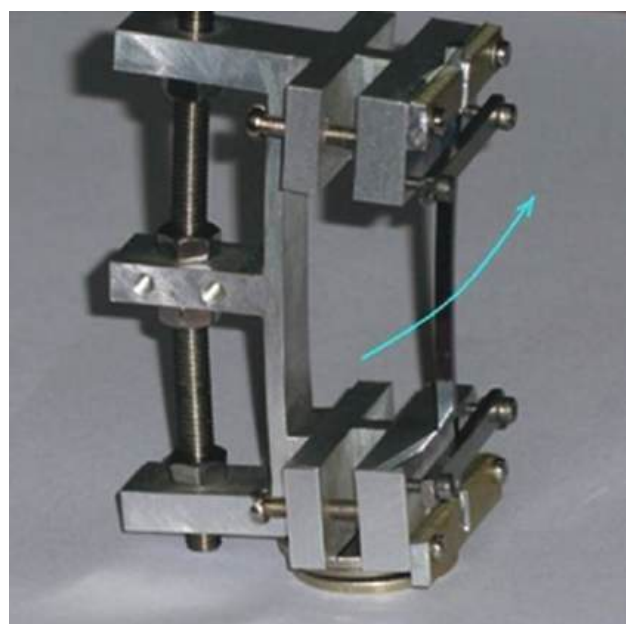
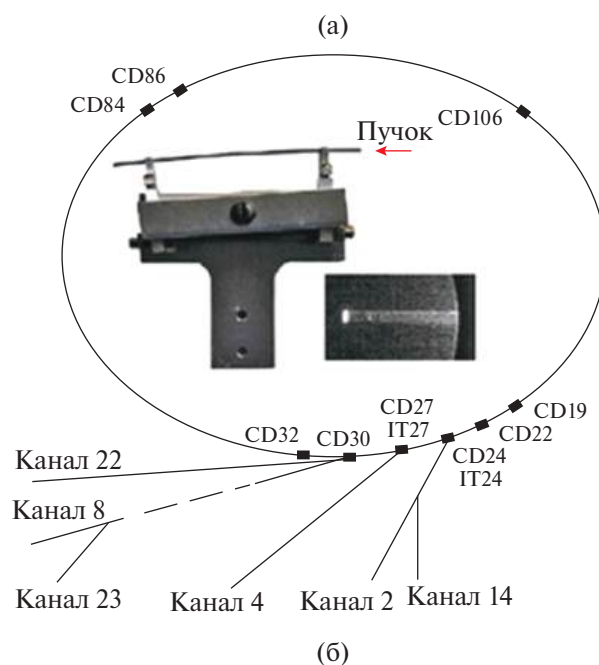


Рис. 2. а – Схема расположения кристаллов в кольце У-70 (на вставке показаны изогнутый кристалл и изображение отклоненного им пучка), б – полосковый кристаллический дефлектор.

углами изгиба. Эта возможность была реализована в [5] кристаллами, показанными на рис. 2б. На рис. 3а обобщаются данные по измерению эффективности кристаллического вывода из У-70 кристаллами, изогнутыми на разные углы.

В результате многолетней практики было установлено, что кристаллы могут выводить пучки с варьируемой интенсивностью от 10^6 до 10^{12} частиц в цикле без специального охлаждения в течение тысячи часов и без видимого ухудшения эффективности. Радиационная стойкость для кристаллов кремния в режиме каналирования составляет 10^{20} см $^{-2}$. Этот метод вывода пучка является хорошим дополнением к медленному классическому выводу пучка интенсивностью до 10^{13} частиц в импульсе. Он показывает надежную воспроизводимую работу с предсказуемым результатом. Пучки от кристаллов

обладают малым эмиттансом, имеют высокую по сравнению с обычными пучками пространственную стабильность, легко перестраиваются в широком диапазоне по интенсивности.

3. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ НА СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

В последние несколько лет метод формирования пучков кристаллами был существенно развит. Большим успехом стало применение кристаллов в системе коллимации пучка БАК [3]. Также интересны эксперименты по фокусировке частиц кристаллами, проведенные в ЦЕРН в рамках коллаборации UA9 и на отечественном ускорителе У-70 [6–12]. Разработанные фокусирующие кристаллы раскрывают возможности новой оптики для сверхвысоких энергий. Современные ускорители уходят в область энергий порядка нескольких ТэВ, БАК уже оперирует энергией 7 ТэВ. Планируется БКК (будущий кольцевой коллайдер) с энергией до 50 ТэВ. В этой области энергий разлет частиц с мишенью очень узок, угол составляет доли миллирадиан.

Для формирования пучков частиц таких энергий созданы специальные кристаллические элементы с фокусирующей кромкой (рис. 3б). Эти кристаллы могут работать как сверхсильные линзы с фокусным расстоянием менее 1 м, с эквивалентным магнитным полем 1000 Тл. На ускорителях СПС и У-70 проведена серия экспериментов с такими кристаллическими элементами: фокусировка параллельного пучка в точку, фокусировка из точки в параллель, фокусировка на экстремально малые расстояния.

Также показана возможность управлять вторичными частицами, рожденными на фиксированной мишени [13]. Эта идея в пилотном режиме реализована на У-70 [14], где построен тестовый канал положительных π -мезонов нового типа, который не потребляет электрической энергии. Перед кольцевым магнитом открытого типа (рис. 4) установлена внутренняя мишень. Положительно заряженные π -мезоны выталкиваются горизонтальным магнитом во внутреннюю часть кольцевого зала ускорителя, фокусируются и отклоняются фокусирующим кристаллом по вертикали в зону физической установки. Кристалл действует на пучок локально, не имеет обратных полей, как у магнитов, поэтому на короткой базе обеспечивает

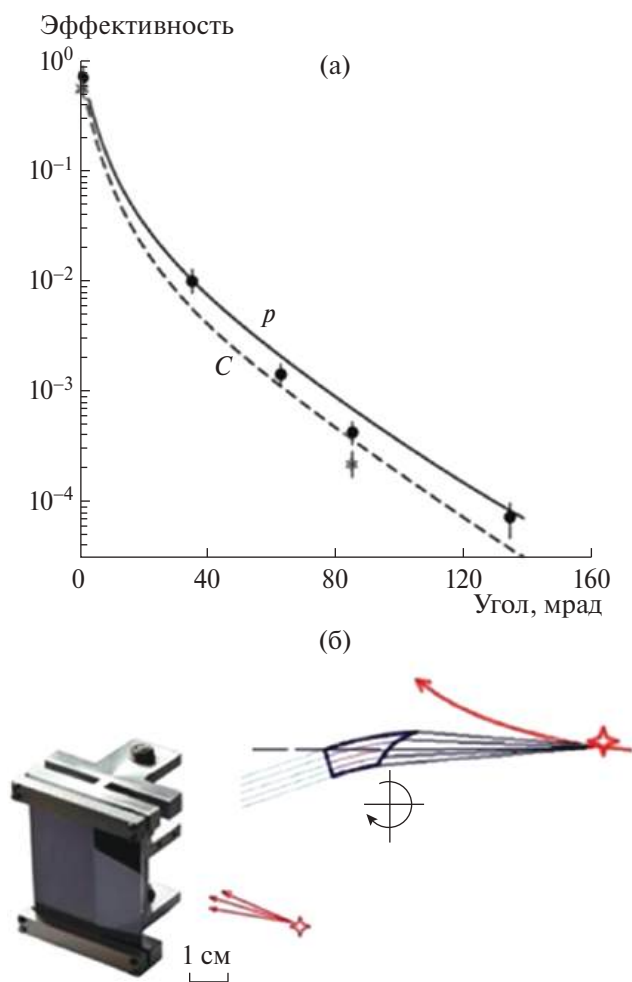


Рис. 3. а – Эффективность кристаллического вывода в зависимости от угла изгиба, б – фокусировка и отклонение пучка частиц кристаллом со скошенным торцом.

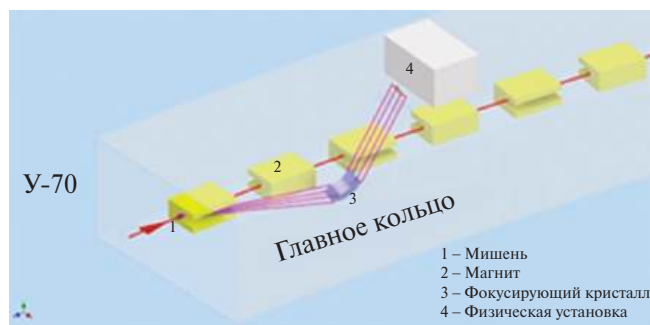


Рис. 4. Схема формирования пучка вторичных положительно заряженных π -мезонов с помощью внутренней мишени и фокусирующего кристалла.

очистку от нежелательных фоновых частиц, что делает возможным вывод пучка из кольцевого зала через небольшое отверстие в защите.

При применении нитевидной внутренней мишени, на которую наводятся 10^{12} протонов в цикле, интенсивность пучка вторичных π -мезонов составила порядка 10^5 частиц за цикл. Низкая интенсивность пучка связана с относительно невысокой энергией протонного пучка в U-70, равной 50 ГэВ. На будущих ускорителях в диапазоне ТэВ, где вторичные частицы имеют узкий конус разлета, эффективность кристаллической системы резко вырастет.

Фокусирующие кристаллы позволяют также осуществить новый метод формирования пучков нейтрино, который отличается существенной простотой по сравнению с применяемыми на данный момент схемами. Подобные схемы обычно требуют вывода протонного пучка, его взаимодействия с внешней мишенью и дальнейшую фокусировку π -мезонов и K -мезонов, родителей нейтрино, специальными сильноточными электромагнитными устройствами – горнами. Такая громоздкая схема позволяет получить пучок нейтрино только в одном заданном направлении, в то время как кристаллы легко могут быть установлены в произвольных точках ускорителя для зондирования Земли с помощью высокоэнергетичных нейтрино. Рис. 5 демонстрирует такую возможность. Количественная информация о спектрах и потоках нейтрино подробно представлена в работе [15].

Следует отметить, что, помимо дальних нейтрино, существует большой интерес к исследованиям и с ускорительными нейтрино высоких энергий. Например, в проектах [16–18] рассматриваются схемы мечения нейтрино и измерения сечений взаимодействий нейтрино, где нужны качественные пучки π - и K -мезонов. В этих

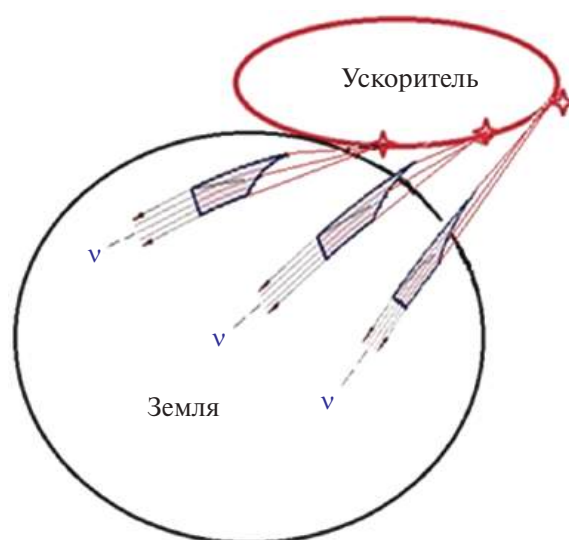


Рис. 5. Иллюстрация зондирования Земли пучком нейтрино от кристаллов. В этой схеме пучки π - и K -мезонов генерируются на внутренних струйных газовых мишенях, отклоняются и фокусируются кристаллами, далее образуют нейтрино в распадных тоннелях.

проектах предполагается традиционный способ получения нейтрино с помощью фокусировки электромагнитами. Очевидно, при высоких энергиях рассмотренные схемы с кристаллами позволяют сделать это лучше. Кристаллы обеспечивают высокую параллельность мезонного пучка с углом Линдхарда 10 мкрад и простой отбор частиц по импульсу по схеме, приведенной на рис. 4.

Еще одно интересное применение фокусирующего кристалла связано с возможностью создания мюонного коллайдера, идея которого разрабатывалась с 70-х годов [19]. В настоящее время рассматриваются проекты коллайдеров мюонов с разными энергиями, начиная от 120 ГэВ [20] для изучения бозона Хиггса и заканчивая энергиями в диапазоне ТэВ в пучке [21, 22] в качестве альтернативы проектам электронных линейных коллайдеров. Современные проекты мюонных коллайдеров очень дороги и сложны, требуют построения цепочки новых сверхпроводящих ускорителей для решения проблем с коротким временем жизни мюонов и уменьшением эмиттанса пучка. В этих проектах мюоны получают на мишенях при низких или промежуточных энергиях. Затем после уменьшения эмиттанса пучка они должны очень быстро ускориться, поскольку время жизни очень мало ($\tau_\mu = 2$ мкс в системе покоя). В работе [23] предложен вариант коллайдера, где мюоны можно

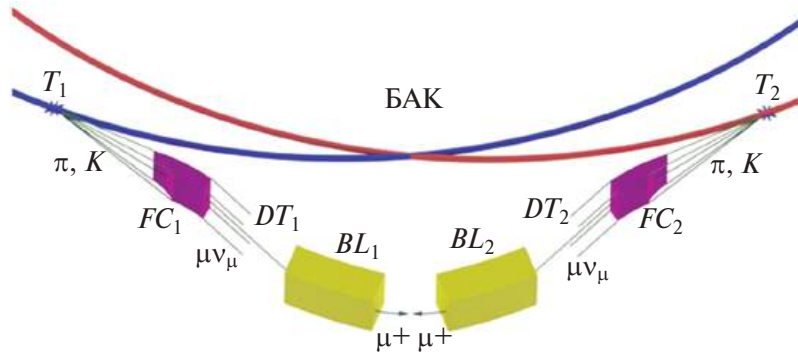


Рис. 6. Кристаллический мюонный коллайдер: $T_{1,2}$ – внутренние мишени в большом адронном коллайдере, $FC_{1,2}$ – фокусирующие кристаллические системы, $DT_{1,2}$ – распадные туннели, $BL_{1,2}$ – магнитооптические каналы.

получить на адронном коллайдере при высокой энергии с помощью фокусирующих изогнутых кристаллов.

Суть нашего предложения показана на рис. 6. Внутренние мишени $T_{1,2}$ установлены в двух различных кольцах одного из больших адронных коллайдеров (диапазона ТэВ). Две фокусирующие кристаллические системы $FC_{1,2}$, образуют параллельные пучки вторичных π -мезонов и K -мезонов, как описано выше. Мюонные пучки образуются в распадных туннелях $DT_{1,2}$ длиной около километра. Если энергия первичного протонного пучка составляет 7 ТэВ, как в БАК, то можно рассчитывать на образование мюонных пучков порядка сотен ГэВ в распадных туннелях. Углы образования мюонов в результате распада $\pi, K \rightarrow \mu\nu_\mu$ при таких энергиях находятся в пределах десятков мкрад. Это приводит к значению эмиттанса мюонного пучка около 1 мм·мрад в конце распадного туннеля длиной около 1 км. Размер мюонного пучка в интервале импульсов 450–550 ГэВ/с, как это видно на рис. 7, вписывается в апертуру типовых квадрупольных линз

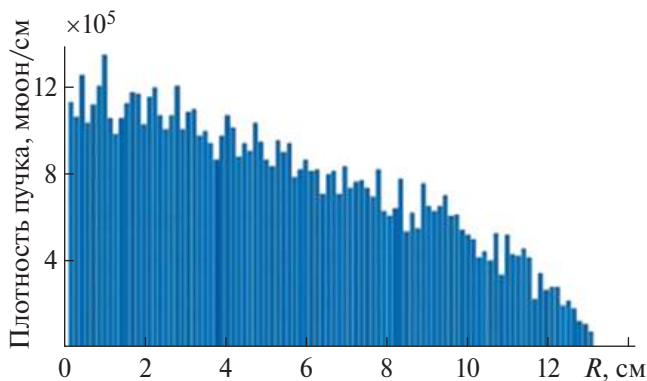


Рис. 7. Рассчитанное методом Монте-Карло распределение мюонов с импульсами 450–550 ГэВ/с по радиусу в конце распадного туннеля длиной 1 км.

диаметром 250 мм. В этом случае магнитооптические каналы транспортировки частиц $BL_{1,2}$ с начальным и конечным объективами линз с высоким градиентом магнитного поля могут захватывать и фокусировать мюонные пучки в большом (несколько процентов) диапазоне импульсов.

Далее мы дадим очень приблизительную оценку светимости такого мюонного коллайдера. Известна формула для определения светимости коллайдера:

$$LUM = f \frac{N^2}{4\pi\sigma^2},$$

где f – частота столкновений, N – число частиц в пучке, σ – размер пучка. Например, для БАК, где вращаются около 3000 сгустков с частотой обращения около 10 000 оборотов в секунду (т.е. $f = 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$) с интенсивностью 10^{11} частиц в сгустке и пучком размерами в несколько десятков микрон в месте встречи, эта величину составляет $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Сгустки π -мезонов величиной $10^{-3} \cdot 10^{11} = 10^8$ частиц будут генерироваться на тонких струйных мишенях $T_{1,2}$ толщиной 0.1 г/см² (взаимодействие интенсивного циркулирующего пучка с тонкими мишенями рассмотрено в [13]). Принимая во внимание выбранный диапазон импульсов 10% и размер сфокусированных мюонных пучков порядка долей миллиметра в точке пересечения мюонов, получаем значение светимости $LUM_\mu = 10^7 \cdot 10^{14} \cdot 10^3 = 10^{24} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Этого недостаточно для полномасштабных мюонных экспериментов, но такую схему мюонного коллайдера можно использовать по крайней мере в качестве пилотного варианта для будущих экспериментов. Неоспоримое положительное качество этого предложения заключается в его простоте. Нет необходимости строить

новый ускоритель. Проект может быть реализован либо в существующих ускорителях БАК и Теватрон, либо в строящемся БКК и законсервированном российском проекте УНК.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представили новые применения изогнутых кристаллов в ускорительной науке: каналы частиц нового типа для положительных вторичных частиц, получение пучков высокоэнергетических нейтрино и кристаллический мюонный коллайдер. Мы надеемся, эти предложения будут стимулировать новые эксперименты по физике высоких энергий. Сформулированные предложения с кристаллами применимы для настоящих и будущих адронных коллайдеров. Изложенные идеи подкрепляются экспериментальными исследованиями как на ускорителях ЦЕРН, так и на отечественном ускорителе У-70.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsyganov E.N. // Fermilab preprint ТМ-684, Batavia, 1976.
2. Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I. Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin: Springer, 1997.
3. Arduini G., Assmann R., Bracco C., Butcher M., Cerutti F., D'Andrea M., Esposito L.S., Garattini M., Gilardoni S., Laface E., Lari L., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D. et al. // International Journal of Modern Physics A. 2022. V. 37. P. 2230004. <https://doi.org/10.1142/S0217751X22300046>
4. Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., Britvich G.I., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Kalinin V.A., Maishev V.A., Reshetnikov S.F., Savin D.A., Terekhov V.I. // International Journal of Modern Physics A. 2018. V. 33. P. 1850138. <https://doi.org/10.1142/S0217751X18501385>
5. Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M., Breese M.B.H., Chepegin V.N., Chesnokov Yu.A., Guidi V., Ivanov Yu.M., Kotov V.I., Martinelli G., Scandale W., Stefancich M., Terekhov V.I., Trbojevic D., Troyanov E.F., Vincenzi D. // Physical Review Letters. 2001. V. 87. P. 948021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.094802>
6. Gordeeva M.A., Gur'ev M.P., Denisov A.S., Platonov Yu.P., Skorobogatov V.V., Smirnov A.I., Fedin O.L.,

- Shchetkovskii A.I., Baranov V.I., Galyaev N.A., Dudenko V.V., Zapol'skii V.N., Kotov V.I., Tsarik S.V., Chesnokov Yu.A. // JETP Letters. 1991. V. 54. P. 487.
7. Baranov V.I., Biryukov V.M., Bugorsky A.P., Chesnokov Y.A., Kotov V.I., Tarakanov M.V., Terekhov V.I., Tsarik S.V., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gur'ev M.P., Platonov Y.P., Smirnov A.I. // Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference. Dallas. IEEE. 1995. P. 426.
8. Afonin A.G., Baranov V.I., Baranov V.T., Britvich G.I., Bugorskii A.P., Bulgakov M.K., Durum A.A., Lobanov I.S., Lun'kov A.N., Lutchev A.V., Maishev V.A., Sandomirskii Y.E., Skleznev A.V., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N. et al. // JETP Letters. 2012. V. 96. P. 424. <https://doi.org/10.1134/S0021364012190022>
9. Scandale W., Arduini G., Butcher M., Cerutti F., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D., Montesano S., Redaelli S., Smirnov G., Bandiera L., Baricordi S. et al. // Physics Letters B. 2014. V. 733. P. 366. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.05.010>
10. Afonin A.G., Vasilyeva A.G., Durum A.A., Kostin M. Yu., Maishev V.A., Sandomirsky Yu.E., Pitalev V.I., Poluektov I.V., Chesnokov M.Yu., Chesnokov Yu.A., Yanovich A.A. // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2022. V. 19. P. 389. <https://doi.org/10.1134/s1547477122040021>
11. Afonin A.G., Britvich G.I., Bugorskii A.P., Bulgakov M.K., Durum A.A., Kostin M.Y., Lutchev A.V., Maishev V.A., Sandomirskii Y.E., Pitalev V.I., Poluektov I.V., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Yanovich A.A. // JETP Letters. 2016. V. 104. P. 12. <https://doi.org/10.1134/S0021364016130051>
12. Scandale W., Arduini G., Cerutti F., Garattini M., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Mirarchi D., Montesano S., Natochii A., Redaelli S., Rossi R., Smirnov G., Murtas F. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2019. V. 446. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.024>
13. Britvich G.I., Durum A.A., Kostin M.Y., Maishev V.A., Chesnokov Y.A., Yanovich A.A. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2019. V. 129. P. 229. <https://doi.org/10.1134/S1063776119070045>
14. Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., Britvich G.I., Lobanov I.S., Poluektov I.V., Reshetnikov S.F., Savin D.A., Sandomirskiy Y.E., Smaglyuk D.S., Terekhov V.I., Chesnokov M.Y., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Yanovich A.A. // JETP Letters. 2021. V. 113. P. 226. <https://doi.org/10.1134/S002136402104007X>
15. Chesnokov Y.A., Maishev V.A. // Nuclear Physics A. 2020. V. 1003. P. 122012. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.122012>

16. *Berra A., Cecchini S., Cindolo F., Jollet C., Longhin A., Ludovici L., Mandrioli G., Mauri N., Mereaglia A., Paoloni A., Pasqualini L., Patrizii L., Pupilli F., Pozzato M., Prest M. et al.* // Proceedings of the XVII International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities. Rio de Janeiro. 2015. P. 368.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.08202>
17. *Charitonidis N., Pari M., Parozzi E.G., Longhin A., Terranova F.* // Applied Sciences. 2021. V. 11. P. 1.
<https://doi.org/10.3390/app11041644>
18. *Berra A., Bonesini M., Brizzolari C., Calviani M., Catanesi M.G., Cecchini S., Cindolo F., Collazuol G., Conti E., Dal Corso F., De Rosa G., Gola A., Intonti R.A., Jollet C. et al.*, ENUBET Collaboration // CERN preprint SPSC-EOI-014. 2016.
19. *Skrinsky A.N.* $\mu^+\mu^-$ possibilities. Intersecting Storage Rings // Morges Seminar. Novosibirsk. 1971.
20. *Neuffer D., Palmer M., Alexahin Y., Ankenbrandt C., Delahaye J.P.* // Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference. Shanghai. 2013. P. 1472.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.02042>
21. *Wang M.-H., Nosochkov Y., Cai Y., Palmer M.* // Proceedings of the 15th International Particle Accelerator Conference. Richmond. 2015. P. 2226.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/09/P09003>
22. *Antonelli M., Boscolo M., Di Nardo R., Raimondi P.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 807. P. 101.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.10.097>
23. *Chesnokov M.Y., Chesnokov Y.A., Yanovich A.A.* // International Journal of Modern Physics A. 2020. V. 35. № 1. P. 2050002.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X20500025>

УДК 621.384.66

ДИАГНОСТИКА ПУЧКА ДЛЯ СТЕНДА ОБЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ВОДОРОДА ИЯИ РАН¹

© 2025 г. С. А. Гаврилов^{a, b, *}, В. А. Гайдаш^a, А. И. Титов^{a, b}^a *Институт ядерных исследований Российской академии наук
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а*^b *Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9** *e-mail: s.gavrilov@inr.ru*

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

Стенд облучения, действующий на линейном ускорителе протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН, используется не только для задач в области радиационной стойкости, но и для проведения других исследований по взаимодействию пучков заряженных частиц с веществом. Отличительной чертой стенда является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях в широком диапазоне энергий и интенсивностей пучка, для чего необходимо обеспечить соответствующую универсальную диагностику пучка. В работе описаны принципы проектирования, изготовления и использования различных диагностических устройств стенда для разных типов пучков, представлены особенности их эксплуатации в разных облучательных режимах, а также приведены примеры вспомогательных функций предусилительной и интегрирующей электроники.

DOI: 10.7868/S3034564225080022

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН [1] на базе сильноточного линейного ускорителя (ЛУ) протонов и отрицательных ионов водорода включает в себя стенд облучения, используемый для широкого круга исследований, в том числе для задач оптимизации ускорения и транспортировки пучков отрицательных ионов водорода. Стенд [2] преимущественно предназначен для облучения мишеней пучками протонов, выведенных на воздух, когда облучаемый объект закрепляется на двухкоординатном позиционере, позволяющем обеспечить поле облучения около 300×300 мм², однако также существует возможность облучения стационарных мишеней в вакууме как пучками H^-/H^+ , так и объединенным пучком частиц с разными зарядовыми состояниями.

В связи с этим стенд может работать в облучательных режимах, принципиально различающихся зарядом частиц, энергией, током и временной структурой ускоренного пучка (табл. 1).

Таблиц 1. Параметры пучка на стенде облучения

Параметр	Значение
Тип частиц на входе в стенд	ионы H^-/H^+
Энергия пучка на входе в стенд, МэВ	20–247
Максимальное число частиц в импульсе	10^{12}
Минимальное число частиц в импульсе	10^6
Длительность импульса тока, мкс	0.3–120
Частота следования импульсов тока, Гц	1–50

Таким образом, система диагностики пучка (СДП) должна обеспечивать измерения в широком динамическом диапазоне ключевых параметров, таких как амплитуда и длительность импульсов тока, амплитуда среднего тока, попе-

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

речный профиль и положение пучка в облучаемой зоне.

СДП стенда состоит из следующих датчиков.

1. Индукционный датчик тока (ИДТ) на основе ферритового сердечника.
2. Цилиндры Фарадея (ЦФ), совмещенные с контрольными четырехсекционными датчиками ореола.
3. Многопроволочный профилометр (МПП) на основе вольфрамовых проволочек.
4. Многоламельный профилометр (МЛП) на основе керамических печатных плат.
5. Многоанодный газовый счетчик (МГС) с люминесцентным экраном [3] для контроля процесса облучения мишеней на воздухе.

2. ДАТЧИКИ ТОКА

2.1. Индукционный датчик тока

Индукционный датчик тока (рис. 1) установлен на входе стенда для контроля амплитуды и длительности импульса тока первичного пучка, пришедшего из ЛУ.

В качестве сердечника выбрано ферритовое кольцо без диэлектрического покрытия фирмы FerroxCube T107/65/25-3C11 с одновитковой индуктивностью при нормальных условиях равной примерно $(11\,000 \pm 25\%)$ нГн.

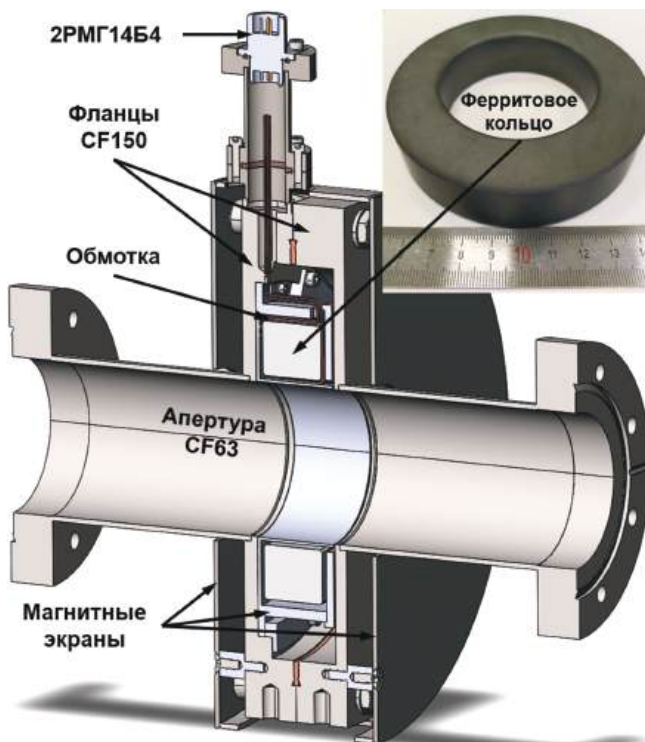


Рис. 1. ИДТ в собранном виде с магнитной защитой.

Выбор ферритового сердечника объясняется существенным снижением стоимости итоговой сборки ИДТ благодаря отказу от дорогостоящих ленточных сердечников из аморфных или нанокристаллических сплавов и металлокерамической вставки, необходимой для их использования в условиях высокого вакуума с остаточным давлением менее 10^{-7} мбар. Типичный уровень газовыделения изостатически спрессованных ферритов при комнатной температуре без предварительной термической дегазации поверхности составляет $10^{-11} - 10^{-10}$ мбар·л/(с·см²) [4].

В связи с высоким ожидаемым уровнем статических и низкочастотных магнитных полей от различных систем ускорителя предусмотрено использование многослойной магнитной защиты: внутренний и внешний экраны из магнитных сталей.

Установленный ИДТ обладает следующими рабочими характеристиками:

- суммарный диапазон измеряемой амплитуды импульса тока равен 0.02–10 мА на основе четырех переключаемых коэффициентов усиления электроники;
- суммарный диапазон измеряемой длительности импульса тока составляет 0.3–150 мкс;
- время нарастания фронта импульса в рабочем диапазоне равно примерно 0.1 мкс,
- спад вершины импульса в рабочем диапазоне составляет около 0.02 %/мкс.

2.2. Цилиндр Фарадея с датчиком ореола

Для контроля пучков на выходе стенда после зоны облучения было разработано несколько конструкций ЦФ: ЦФ для пучков H^-/H^+ с прямым измерением тока заряженных частиц и ЦФ для пучка частиц с произвольным зарядом, включая смесь зарядовых состояний с дополнительной системой обдирки и последующей прямой регистрацией пучка H^+ .

ЦФ для пучков H^-/H^+ (рис. 2) выполнены на основе стандартных ниппелей CF63, которые играют роль вакуумных корпусов. Регистрирующий узел закреплен во внутреннем кожухе из нержавеющей стали через изолирующие полиимидные прокладки и состоит из медного (М1) электрода и графитовой вставки, выполненной из изостатического графита (С-48).

В случае работы с пучками отрицательных ионов водорода присутствует существенный канал утечки измеряемого тока: обратно рассеянные слабосвязанные электроны, которые

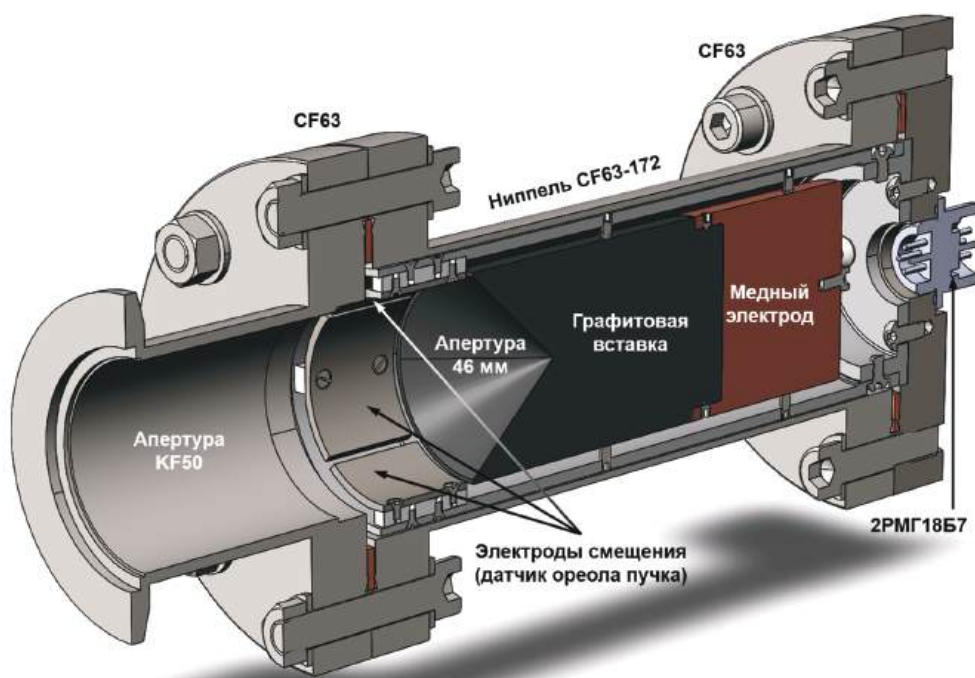


Рис. 2. ЦФ для пучков H^-/H^+ с датчиком ореола.

обдираются в поверхностном слое электрода ЦФ. Для пучков с энергиями выше нескольких МэВ энергия таких электронов превышает 1 кэВ и их подавление высоковольтным потенциалом представляет существенную технологическую проблему, поэтому для данного случая необходимо использование магнитной системы и/или сильно вытянутой конусообразной конструкции. При этом известно, что для электронов с энергиями менее 1 МэВ доля обратно рассеянных электронов составляет примерно 10% для легких материалов с малым Z (например, углерод) и до 50% для тяжелых материалов (вольфрам, тантал).

Входная поверхность вставки представляет собой конус с высотой равной диаметру основания, тем самым обеспечивается более равномерное распределение ионизационных потерь на поверхности и снижение вероятности импульсной термоэмиссии электронов, а также дополнительно уменьшается эффект утечки тока через обратно рассеянные электроны обдирки и электроны вторичной эмиссии.

Толщина вставки (55 мм) позволяет поглощать ионы водорода с энергией менее 110 МэВ, таким образом, при работе с максимальной энергией начальной части ускорителя (около 100 МэВ) интенсивность нейтронных потоков и мощность дозы наведенной радиоактивности будут снижены. Общая толщина ЦФ (95 мм) рассчитана на энергию пучка порядка 225 МэВ. При этом суммарный диапазон измеряемой

амплитуды импульса тока равен 0.02–10 мА на основе четырех переключаемых коэффициентов усиления электроники по аналогии с предусилительной электроникой ИДТ.

Также для минимизации тока утечки обратно рассеянных электронов обдирки предусмотрено квазидипольное магнитное поле (около 100 мТл в центре апертуры ЦФ), создаваемое двумя сегментами кольцевого неодимового магнита.

Для эффективного подавления низкоэнергетической вторичной эмиссии предусмотрены 4 электрода в виде кольцевых сегментов, на которые подается потенциал смещения до -300 В. Помимо функции смещения, электроды формируют позиционно-чувствительный датчик ореола пучка, так как с них через трансимпедансные усилители снимаются токовые сигналы от попадания частиц ореола пучка и электронов вторичной эмиссии. Благодаря этой вспомогательной диагностической функции можно контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность измерений без использования дополнительного профилометра. Предусилительная электроника этих датчиков регистрирует сигнал обеих полярностей, что позволяет использовать эту функцию и для отрицательных, и для положительных ионов водорода.

Универсальный цилиндр Фарадея (рис. 3) выполнен по аналогичному принципу на основе более длинного ниппеля CF63, для того чтобы

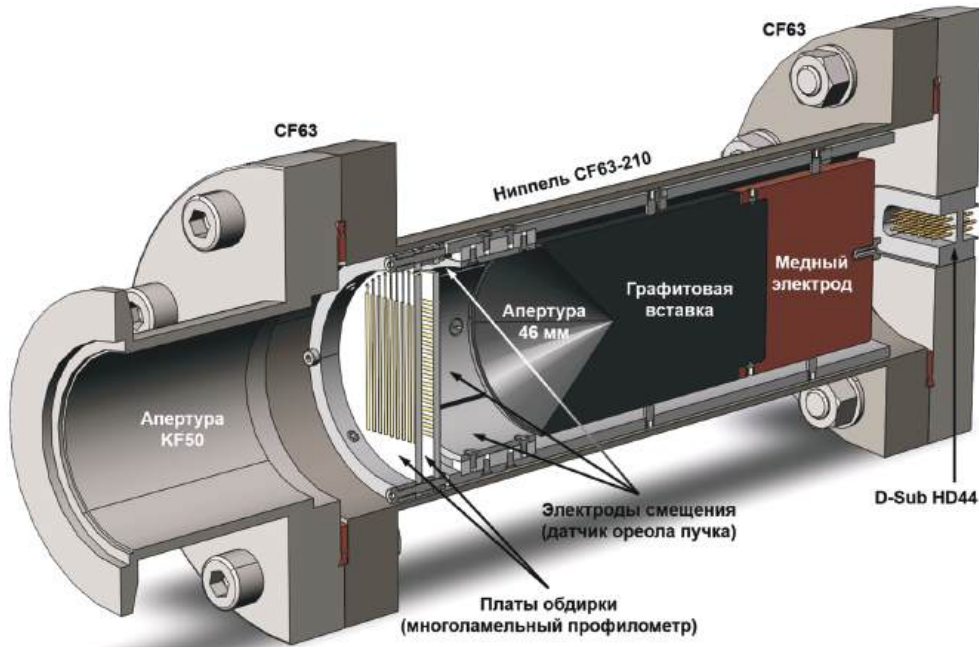


Рис. 3. ЦФ для произвольного зарядового состояния пучка с датчиком ореола и профилометром.

можно было разместить дополнительную систему обдирки частиц смешанного многозарядного пучка до состояния H^+ , совмещенную с многоламельным профилометром, описанным ниже. Частицы пучка, проходя через металлокерамические пластины профилометра суммарной толщиной около 1.7 мм, обдираются со 100-процентной вероятностью до протонов, которые и создают сигнальный ток ЦФ. Поток вторичных электронов с выходной поверхности второй пластины МЛП подавлен потенциалом смещения на электродах датчика ореола пучка.

3. ПРОФИЛОМЕТРЫ

3.1. Многоламельный профилометр

Многоламельный профилометр, предназначенный для прямого контроля профиля и положения как пучка частиц с одинаковым зарядом,

так и многозарядного пучка на входе в ЦФ, фактически является разновидностью многопроводочного профилометра, работая на тех же физических принципах. Однако благодаря эффекту обдирки в первой плоскости профилометра сигнал создается током электронов обдирки, а во второй плоскости – током электронов вторичной эмиссии, порождаемых уже перезаряженным пучком протонов. Профилометр изготовлен на основе двусторонних печатных плат из керамического ламината RO4003C толщиной 0.813 мм, покрытого с обеих сторон медной фольгой толщиной 35 мкм с иммерсионным золочением, на поверхности которых промышленным способом изготовлено с одной стороны 17 сигнальных дорожек шириной 1 мм с шагом 2 мм, с другой стороны – сплошной электрод размером $34 \times 34 \text{ мм}^2$ (рис. 4). На электрод первой платы подается потенциал смещения до



Рис. 4. Модель МЛП и фотография платы.

+300 В, что подавляет вторичную электронную эмиссию с самого электрода и дорожек первой платы, но усиливает эмиссию с дорожек второй платы, что и требуется для ее режима работы. Сплошной электрод второй платы, являющийся выходной поверхностью МПП, заземлен, для того чтобы выход вторичных электронов из него был эффективно подавлен потенциалом смещения на электродах датчика ореола пучка.

3.2. Многопроволочный профилометр

Для измерений профиля и положения пучка на входе стенда установлен классический многопроволочный профилометр в виде сетки, позволяющий проводить измерения профиля по обеим осям в единичном импульсе тока, что необходимо для одноимпульсного режима работы стенда.

При попадании частиц пучка на поверхность отдельной проволоочки возникает вторичная электронная эмиссия, а проволоочка приобретает заряд, равный сумме зарядов покинувших ее вторичных и δ -электронов, перехваченных ионов (в случае низких энергий) и оседающих электронов обдирки (в случае отрицательных ионов водорода).

Сетка МПП (рис. 5) образована 21+21 проволоочками диаметром 100 мкм из позолоченного

вольфрама, расположенными с переменным шагом 1–2 мм для достижения большего разрешения в центре апертуры.

Несущие рамки с контактами для проволоочек так же изготовлены в виде печатных плат из керамического ламината. Для борьбы с кросс-токами, возникающими из-за попадания вторичных электронов с одной проволоочки на другую, в конструкцию МПП добавлены промежуточные проволоочки для формирования потенциала смещения, а также в интегрирующей электронике МПП предусмотрена возможность подавать потенциал смещения до +300 В непосредственно на сигнальные проволоочки.

Начиная с энергий примерно 3 МэВ коэффициент вторичной эмиссии для вольфрама становится меньше единицы, поэтому в случае пучка H^- в электронике заложена возможность смены полярности сигнала для работы с током электронов обдирки, оседающих в проволоочках.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе развития стенда облучения на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН был разработан комплекс устройств диагностики ключевых параметров пучка для исследований по взаимодействию ускоренных пучков заряженных частиц с веществом. Отличительной чертой разработанной системы диагностики является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях во всем диапазоне энергий и интенсивностей пучков, подаваемых на стенд облучения. Индукционный датчик тока и многопроволочный профилометр установлены на входе в стенд и позволяют измерять ток и профили пучка частиц. На выходе стенда размещены цилиндры Фарадея.

Для повышения точности и надежности проводимых измерений в разработанных устройствах реализован как набор классических методик для оптимизации их работы, так и нестандартные решения, например датчики ореола пучка на входах цилиндров Фарадея, позволяющие контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность токовых измерений на длинных пролетных базах стенда без использования дополнительных профилометров. Также на входе одного из цилиндров установлен многоламельный профилометр на основе печатных плат, выполняющий функцию перезарядной мишени для возможности регистрации тока

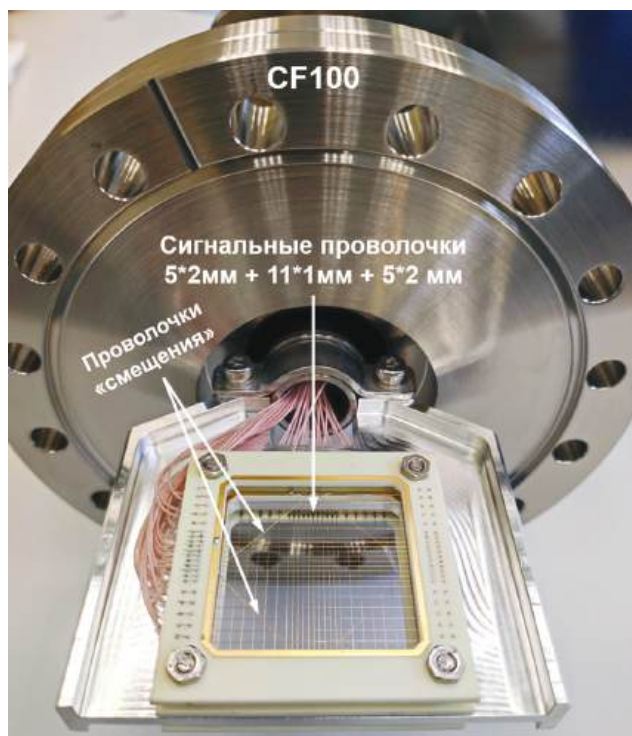


Рис. 5. Фотография “сетки” профилометра.

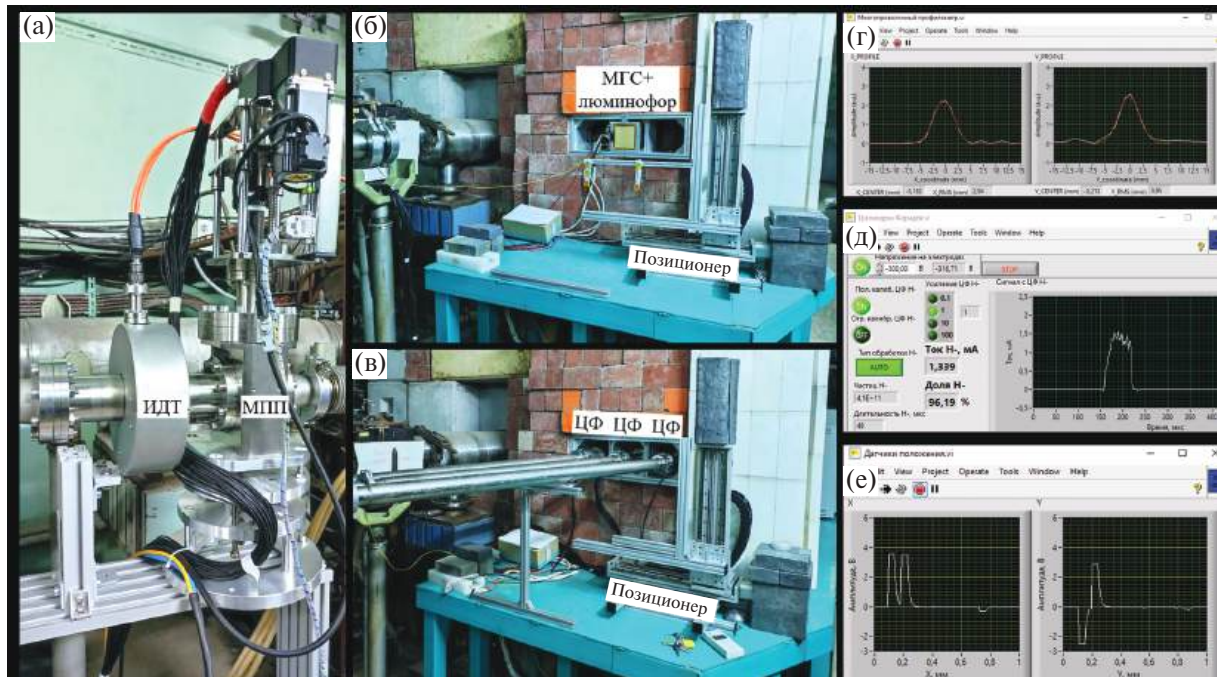


Рис. 6. Фотографии элементов СДП, установленных на стенде облучения: **а** – сборка ИДТ и МПП; **б** – установленная сборка МГС и люминесцентного экрана для контроля пучка, выведенного на воздух при облучении мишеней, закрепленных на позиционере; **в** – установленная система из трех ЦФ с датчиками ореола и МЛП. Примеры рабочих окон программ с измеренными сигналами датчиков; **г** – профили пучка H^- на МПП; **д** – ток пучка на ЦФ для пучка H^- ; **е** – разнополярные сигналы датчиков ореола пучка на входе в ЦФ для пучка H^- .

многозарядного пучка, образующегося на стенде в некоторых режимах облучения. Пучок смешанных зарядовых состояний полностью обдирается в пластинах профилометра до протонов, создающих сигнальный ток ЦФ, при этом сам профилометр позволяет регистрировать профиль многозарядного пучка.

Для всех устройств СДП стенда разработан полный комплект электроники: предварительные усилители ЦФ и ИДТ, интеграторы и коммутаторы профилометров и датчиков ореола, источники напряжения смещения, а также платы контроля и управления нижнего уровня для считывания сигналов и ручного управления коэффициентами усиления, напряжениями смещения и сигналами калибровки.

Фотографии устройств, размещенных на стенде, и примеры рабочих окон программ с измеренными профилями и током пучка, а также сигналами датчиков ореола показаны на рис. 6.

5. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.inr.ru/ckp-new/>
2. Gavrilo S., Bragin S., Feshchenko A., Gaidash V., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Lebedev S., Melnikov A., Serov V., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P., Tsbryaev S. Proton irradiation facility at INR RAS linac // Proc. of RuPAC'18. Protvino: LACoW Publishing, 2018. P. 142. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-FR-CAMH02>
3. Gavrilo S., Melnikov A., Titov A. Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac // Proc. of IBIC'18. Shanghai: JACoW Publishing, 2018. P. 40. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2018-MOPA07>
4. Barnes M., Ducimetiere L. Ferrite materials for in-vacuum instruments // Proc. of ARIES workshop "Materials and engineering technologies for particle accelerator beam diagnostics instruments", 2021. <https://indico.cern.ch/event/1031708/>

ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МОНИТОР НА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН¹

© 2025 г. С. А. Гаврилов^{a, b, *}, Ю. Ж. Калинин^a, И. И. Полоник^{a, b}, А. И. Титов^{a, b}

^a Институт ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

^b Московский физико-технический институт

(Национальный исследовательский университет)

Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, 9

* e-mail: s.gavrilov@inr.ru

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Для проведения неразрушающих измерений профиля и положения пучка протонов в низкоэнергетическом канале транспортировки линейного ускорителя ИЯИ РАН был установлен флуоресцентный монитор на основе свечения остаточного газа в вакуумной камере канала. В данной работе представлены конструктивные особенности устройства и экспериментальные результаты измерений в сеансах работы ускорителя, а также приведены оценки чувствительности, точности и разрешения монитора, на основе которых могут быть определены допустимые режимы работы и необходимые параметры оптической системы регистрации диагностических изображений для различных сочетаний параметров пучка и вакуумной системы ускорителя. Показана принципиальная возможность реализации данного типа диагностики для подобных каналов транспортировки сильноточных протонных пучков на основе системы стандартных камер машинного зрения без усилителей изображения и дополнительного напуска газа в объем канала.

DOI: 10.7868/S3034564225080039

1. ВВЕДЕНИЕ

Базовый принцип работы флуоресцентного монитора (ФЛУМ) основан на том, что пучок вызывает свечение остаточного газа в вакуумной камере, при этом время жизни возбужденных состояний молекул и атомов остаточного газа находится в диапазоне 10–100 нс, что соответствует процессу флуоресценции. Свечение газа вызвано как первичным взаимодействием пучка с газом, так и вторичными электронами, образующимися в результате ионизации газа. Основной вклад в свечение, вызванное высокоэнергетичными частицами пучка, вносят ионизация и диссоциация газа, в результате которых обра-

зуются атомы газа в возбужденном состоянии, испускающие в дальнейшем фотоны при переходе в основное состояние. Свой вклад также вносят первичные возбуждения нейтральных молекул остаточного газа, в то время как вторичные электроны вызывают свечение за счет возбуждения нейтральных молекул [1] и рекомбинации с ионами, сопровождающейся образованием нейтральных молекул в возбужденном состоянии и последующим испусканием фотонов [2]. На рис. 1 изображена базовая схема ФЛУМ.

Часть образовавшихся фотонов, прошедшая через окно, фокусируется оптической системой на ПЗС-матрицу, формируя изображение для восстановления поперечного профиля и поло-

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



Рис. 1. Схема базовой конфигурации ФЛУМ.

жения пучка. При энергиях протонов больше примерно 80 кэВ ионизационные потери снижаются, уменьшая число рождаемых фотонов. В таком случае для измерения профиля в камере локально повышается давление путем накачивания дополнительного газа либо впрыскивания газовой струи под высоким давлением, а также используются камеры с усилителями изображения на основе микроканальных пластин [3], однако стоимость и габариты общей сборки такого детектора существенно возрастают. Целью данной работы является проверка возможности использования относительно простого, экономичного и компактного устройства на основе стандартных камер машинного зрения (рис. 2) без напуска газа и усилителей изображения в типичных условиях каналов транспортировки пучков низких энергий на линейных ускорителях (ЛУ) ионов на примере канала инъекции пучка протонов энергией 400 кэВ и импульсным током до 70 мА в ЛУ ИЯИ РАН.

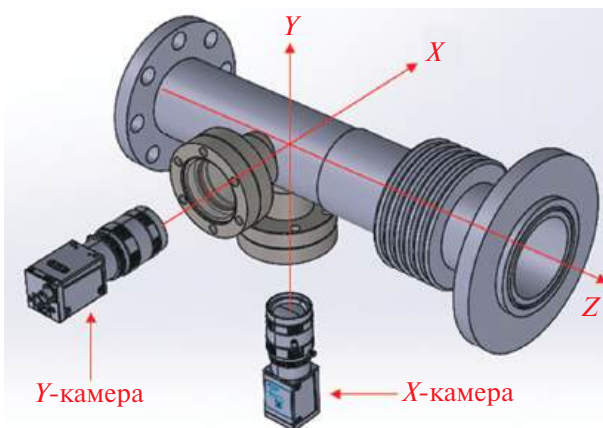


Рис. 2. Модель ФЛУМ, установленного на канале инъекции протонов ЛУ ИЯИ РАН.

2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Установленный ФЛУМ (рис. 3) состоит из вакуумной камеры апертурой 50 мм с двумя окнами стандарта SF35 из боросиликатного стекла. Для минимизации паразитных переотражений внутренние поверхности камеры и патрубков покрыты слоем лака на основе мелкодисперсного графита, растворенного в изопропанол: спирт испаряется после распыления и дополнительного прогрева, оставляя на поверхности тонкий матовый токопроводящий слой графита.

Рабочее давление в канале инъекции составляет примерно 10^{-7} – 10^{-6} мбар, при этом остаточный газ преимущественно состоит из паров воды (порядка 40%), водорода (около 18%) и азота (примерно 7%), а также содержит угарный газ (около 7%) и метан (порядка 10%) вследствие исторически сложившейся на канале предварительной откачки масляными форвакуумными насосами с последующей высоковакуумной откачкой магниторазрядными насосами.

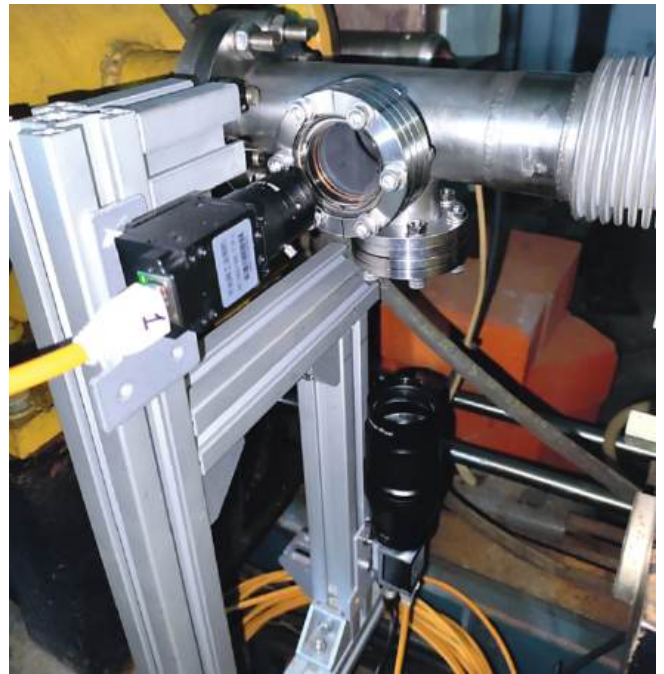


Рис. 3. Фотография ФЛУМ, установленного на канале инъекции протонов ЛУ ИЯИ РАН.

Свечение газа регистрируется двумя типичными черно-белыми ПЗС-камерами машинного зрения, основные параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры ПЗС-камер и объективов

	X-камера	Y-камера
Модель	Basler acA780-75gm	LEO 1200H-30gm
Разрешение, пкс	782 × 582	1280 × 960
Размер пикселя, мкм	8.3 × 8.3	3.75 × 3.75
Экспозиция	20 мкс – 5 с	34 мкс – 1 с
Динамический диапазон	1000	1000
Фокус объектива	Переменный	Фиксированный
Фокусное расстояние объектива, мм	25	6
Апертура объектива, мм	50	25
Расстояние до оси пучка, мм	180	120

Для подавления внешней оптической засветки ПЗС-камеры и вакуумные окна закрывали сине-фолью, а для радиационной защиты от паразитного гамма-фона расположенного рядом инжектора протонов использовались листы свинца.

Учитывая процентную долю каждой составляющей остаточного газа, их спектры излучения [4–7], спектральную зависимость коэффициента пропускания боросиликатного стекла и спектральную чувствительность ПЗС-камер, можно оценить спектральную эффективность регистрации. Пример такой оценки без учета неизвестного коэффициента пропускания линз в объективе, приведен на рис. 4.

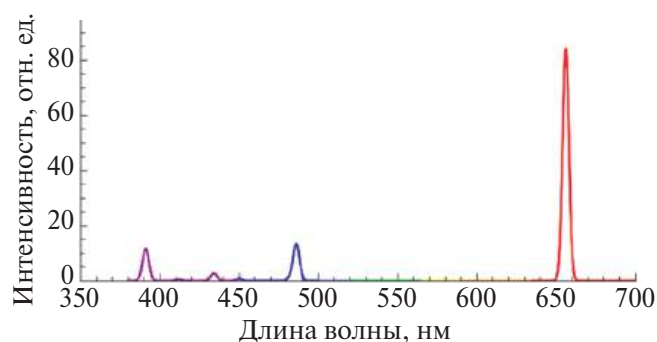


Рис. 4. Расчетная спектральная эффективность регистрации излучения X-камерой ФЛУМ.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Программа сбора и обработки данных

Для регистрации и обработки изображений в режиме реального времени было написано программное обеспечение в среде LabVIEW. Базовая версия программы позволяет применять к изображению процедуру выделения интересующей области и сопоставлять положения точек на изображении с их реальными координатами для калибровки, а также удаленно управлять усилением и экспозицией камеры, суммировать несколько сделанных камерой кадров и вычитать фоновый кадр. Для измерения профиля в программе строятся проекции распределения интенсивности, вычисляется положение центра тяжести и среднеквадратичный размер пучка.

На рис. 5а показано окно программы сбора и обработки данных с типичным результатом измерений при следующих параметрах: энергия пучка 400 кэВ, импульсный ток 52 мА, длительность импульса на полувысоте 300 нс, частота следования импульсов 50 Гц, экспозиция камеры 5 с, суммирование 3 кадров.

В процессе тестирования ФЛУМ к базовой версии программы были добавлены возможности усреднения фонового кадра по заданному количеству накопленных кадров и применения произвольной ранговой фильтрации как к каждому отдельному кадру до суммирования, так и к их сумме (рис. 5б).

Оттенки синего цвета на обрабатываемом изображении связаны с визуальными настройками контрастности отображения на мониторе оператора и не характеризуют реальный регистрируемый спектр.

3.2. Разрешение и точность измерений

Разрешение можно определить как минимальное расстояние между бесконечно тонкими пучками, при котором их изображения попадают в разные пиксели матрицы, что, например, соответствует примерно 90 мкм для используемой X-камеры. Таким образом, основными ограничениями разрешения ФЛУМ являются конечный размер пикселя и глубина резкости изображаемого пространства (ГРИП).

В случае, если пучки сдвигаются относительно фокальной плоскости, их изображения размываются, и разрешение можно оценить как

$$R = \sqrt{\delta_{\text{пк}}^2 + \delta_{\text{ГРИП}}^2}, \text{ где } \delta_{\text{пк}} \text{ — расстояние в фокальной}$$

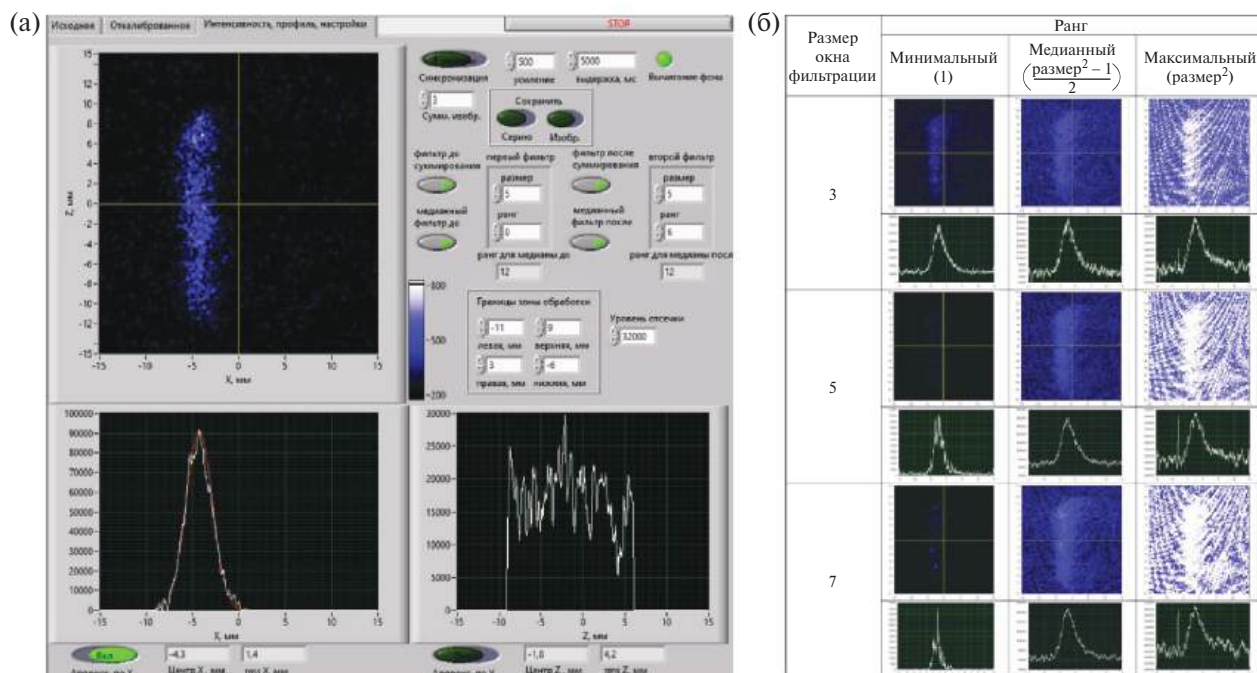


Рис. 5. а – Окно программы сбора и обработки данных ФЛУМ с типичным результатом измерений; б – примеры изображений с различными параметрами ранговой фильтрации суммы нефильтрованных кадров.

плоскости, приходящееся на 1 пиксель матрицы (определяется расстоянием до пучка, параметрами объектива и ПЗС-матрицы), $\delta_{\text{ГРИП}}$ – размытие изображения, вызванное смещением пучка.

Расчетная величина разрешения приведена на рис. 6. Ограничивая допустимый размер размытия изображения одним пикселем, получаем разрешение $R = \sqrt{2} \delta_{\text{пк}} = 127$ мм.

Точность ФЛУМ ограничивается ошибками постобработки, смещением пучка от фокальной плоскости, тепловым движением атомов и моле-

кул газа, размытием изображения пучка за счет недостаточной глубины резкости. Для используемой конфигурации ФЛУМ она составляет 10–15% во всей рабочей апертуре.

Пороговая чувствительность ФЛУМ ограничивается шумами ПЗС-матрицы, в частности вызванными ее неравномерным прогревом, фоновой засветкой, горячими пикселями и паразитными переотражениями внутри вакуумной камеры.

При смещении пучка относительно фокальной плоскости меняется масштаб наблюдаемого изо-

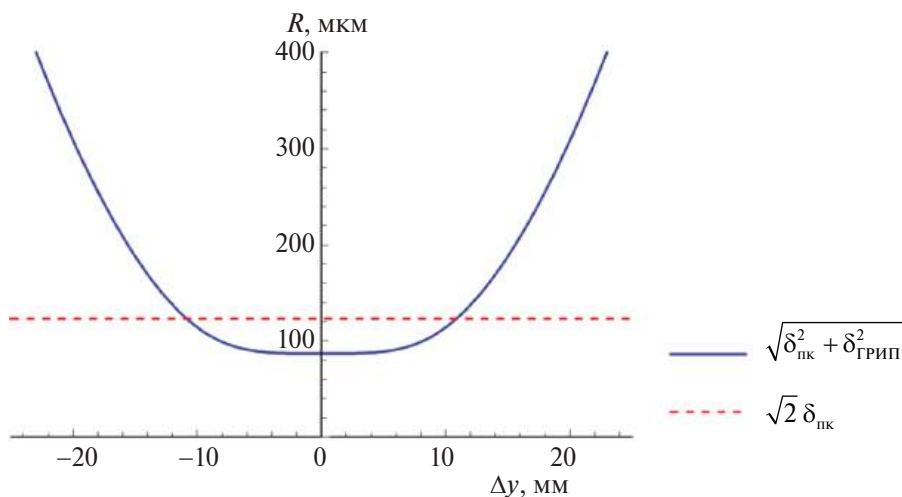


Рис. 6. Расчетное разрешение ФЛУМ.

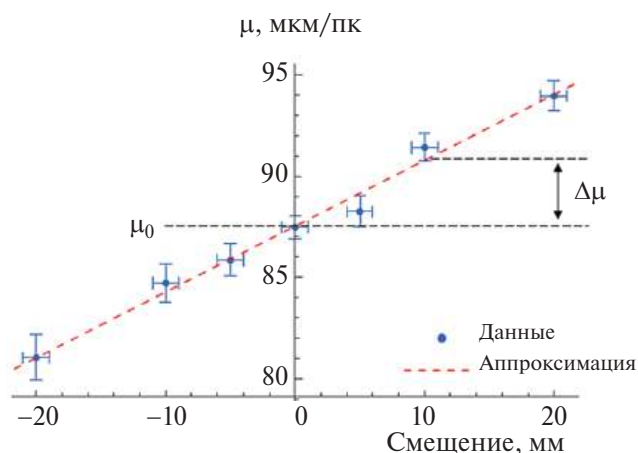


Рис. 7. Масштаб изображения в зависимости от смещения относительно фокальной плоскости.

бражения, что приводит к ошибке измерения размера пучка. Зависимость масштаба μ от смещения сетки относительно фокальной плоскости приведена на рис. 7. При смещении оси пучка на 10 мм от фокальной плоскости относительное изменение масштаба составляет примерно 4%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Флуоресцентный монитор для неразрушающей диагностики поперечного профиля и положения пучка по свечению остаточного газа был установлен и протестирован на низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов ЛУ ИЯИ РАН с пучками энергией 400 КэВ, током 50–70 мА, частотой следования импульсов 50 Гц и длительностью импульсов тока 0.25–170 мкс. В ходе тестирования были установлены оптимальные настройки ПЗС-камер и параметры постобработки получаемых изображений пучка. Также были отмечены основные эффекты, ограничивающие точность и разрешение датчика, и сделаны численные оценки для используемой конфигурации ФЛУМ. Полученные результаты подтверждают возможность использования ФЛУМ, работающего на основе стандартных ПЗС-камер машинного зрения без напуска газа и усилителей изображения, для подобных низкоэнергетических каналов инжекции сильноточных протонных пучков.

Постобработка с применением суммирования кадров и ранговой фильтрации изображений позволила уменьшить шумовую компоненту. Сравнение полученных результатов показывает, что при использовании низких рангов измеренный профиль соответствует только ядру пучка,

а при использовании высоких рангов профиль уширяется и искажается горячими пикселями. Фильтры с маленьким размером окна фильтрации плохо справляются с очисткой изображения от шумовой компоненты, а при использовании фильтров с большим размером окна фильтрации ухудшается эффективное разрешение изображения. В качестве оптимума был выбран медианный фильтр, применяемый как к каждому отдельному кадру, так и к их итоговой сумме.

Для уменьшения тепловых шумов ПЗС-матрицы можно рекомендовать использование камер с внешней синхронизацией, у которых частота срабатывания затвора может быть равна или кратна частоте следования сгустков пучка. В таком случае экспозиция камеры, если позволяют ее технические характеристики, может быть установлена равной длительности импульса тока пучка, что существенно ограничит время нагрева матрицы по сравнению с вынужденными длинными экспозициями, которые необходимы для захвата несколько сотен импульсов при использовании несинхронизованных с пучком камер. Кроме того, возможно использование относительно простого внешнего охлаждения корпуса камеры на основе элементов Пельтье.

Существенный вклад в погрешность измерений размера пучка вносит смещение оси пучка от фокальной плоскости объектива, однако измерение положения центра тяжести пучка по одной оси определяет смещение пучка относительно фокальной плоскости по второй оси и может быть использовано для оценки погрешности размера пучка по этой оси.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика” (НЦФМ62325-113).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Becker F., Andre C., Dorn C., Forck P., Haseitl R., Walasek-Hoehne B., Dandl T., Heindl T., Ulrich A. Beam Induced Fluorescence Monitors for FAIR // Proc. of IPAC12. New Orleans: IEEE. 2013. P. 798.

2. *Hampf R., Wieser J., Ulrich A.* // Eur. Phys. J. D. 2023. V. 77. № 51.
<https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-023-00624-6>
3. *Forck P.* Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics // Proc. of Joint Universities Accelerator School (JUAS 2023). Darmstadt. 2023.
4. *Monce M.N., Pan S., Radeva N.L., Pepper J.L.* // Phys. Rev. A. 2009. V. 79. Iss. 1. P. 012704.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.012704>
5. *Edwards J.L., Thomas E.W.* // Phys. Rev. 1968. V. 165. Iss. 1. P. 16.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.165.16>
6. *Dotchin L.V., Chupp E.L., Pegg D.J.* // J. Chem. Phys. 1973. V. 59. P. 3960.
<https://doi.org/10.1063/1.1680585>
7. *Hughes R., Philpot J.L., Fan C.Y.* // Phys. Rev. 1961. V. 123. Iss. 6. P. 2084.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.123.2084>

УДК 621.384.6

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ЛУ2 ДЛЯ СИНХРОТРОННОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА¹

© 2025 г. Т. В. Кулевой^{a, c, *}, Н. В. Завьялов^d, Г. Н. Кропачев^{a, b}, А. Л. Ситников^a, В. С. Скачков^a, В. Г. Кузьмичев^a, Д. А. Лякин^a, С. В. Барабин^a, А. И. Семенников^a, Д. Н. Селезнев^a, В. К. Семячкин^a, В. С. Столбунов^a, А. Ю. Орлов^a, Р. П. Куйбида^a, А. В. Козлов^a, Ю. Б. Стасевич^a, В. И. Николаев^a, А. И. Марченков^a, Н. М. Кристи^a, А. В. Шумшуров^a, Ю. А. Сатов^a, А. Н. Балабаев^a, А. А. Васильев^a, А. А. Лосев^{a, c}, И. А. Хрисанов^a, С. В. Виноградов^a, Е. Р. Хабибуллина^{a, c}, И. В. Кильметова^a, А. А. Малышев^{a, c}, М. С. Саратовских^a, А. С. Борисков^d, М. А. Гузов^d, Л. Е. Поляков^d, М. И. Макарова^d, Д. С. Труфанов^d, И. А. Машин^d, А. В. Машагин^d, М. Л. Сметанин^d, А. В. Тельнов^d, А. М. Опекунов^d, М. В. Смирнов^e, П. А. Соколов^e, Н. М. Сереброва^e

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

^b Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^c Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

^d Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

^e Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова
Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3

* 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.

В рамках реализуемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) проекта комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства коллективом НИЦ “Курчатовский институт” – ККТЭФ разработан технический проект и на его базе конструкторская документация на ускоритель тяжелых ионов (отношение массы к заряду находится в пределах 4–8) импульсного типа на энергию до 4 МэВ на нуклон с током 10 мА. Ускоритель состоит из лазерного источника ионов, секции RFQ и двух секций DTL, работающих на кратных частотах. Генерация пучка осуществляется самым мощным в мире лазерным источником ионов, обеспечивающим генерацию пучка ионов Bi^{27+} с током не менее 3 мА при длительности импульса 5 мкс. В режим ускорения захватывается не менее 95% инжектированного тока пучка. К настоящему времени разработаны эскизный и технический проекты ускорителя, а также рабочая конструкторская документация на все его элементы. Представлены достигнутые результаты.

DOI: 10.7868/S3034564225080049

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на базе Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспери-

ментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) разрабатывается проект комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Основой комплекса является синхротронный ускоритель, обеспе-

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

чивающий ускорение протонов и различных типов ионов вплоть до 209 Bi . В НИЦ “Курчатовский институт” – ККТЭФ разрабатывается ускоритель тяжелых ионов (отношение массы к заряду находится в пределах 4–8) импульсного типа на энергию до 4 МэВ на нуклон с током 10 мА. Ускоритель состоит из лазерного источника ионов, секции RFQ [1] и двух секций DTL, работающих на кратных частотах. В состав ускорителя также входят каналы транспортировки пучка на различных энергиях и канал вывода пучка для инъекции его в бустер.

Ускоритель для экспериментальных работ на ионных пучках состоит из основного синхротрона (ОС), бустера и двух линейных ускорителей-инжекторов [2, 3]. Один из линейных ускорителей (ЛУ1) предназначен для предварительного ускорения пучков легких ионов от протонов до кислорода. Второй, ЛУ2, предназначен для ускорения тяжелых ионов от натрия до висмута. Структура ускорителя ЛУ2 представ-

лена на рис. 1 [4]. Параметры ускорителя даны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры ускорителя ЛУ2

Параметр	Значение
Отношение заряда к массе иона	$1/8 \leq Z/A \leq 1/4$
Выходная энергия, МэВ/нуклон	4
Ток ускоренных ионов, мА	3 (Bi^{27+} при длительности импульса 5 мкс)
Длительность импульса тока, мкс	До 5
Частота повторения импульсов, Гц	До 1
Интенсивность, частиц/импульс	до $3 \cdot 10^9$
Продольный импульсный разброс на выходе высокоэнергетического транспортного канала, %	Не более ± 0.6
Коэффициент токопрохождения ускоряющего канала, %	Не менее 95
Режим работы	Импульсный

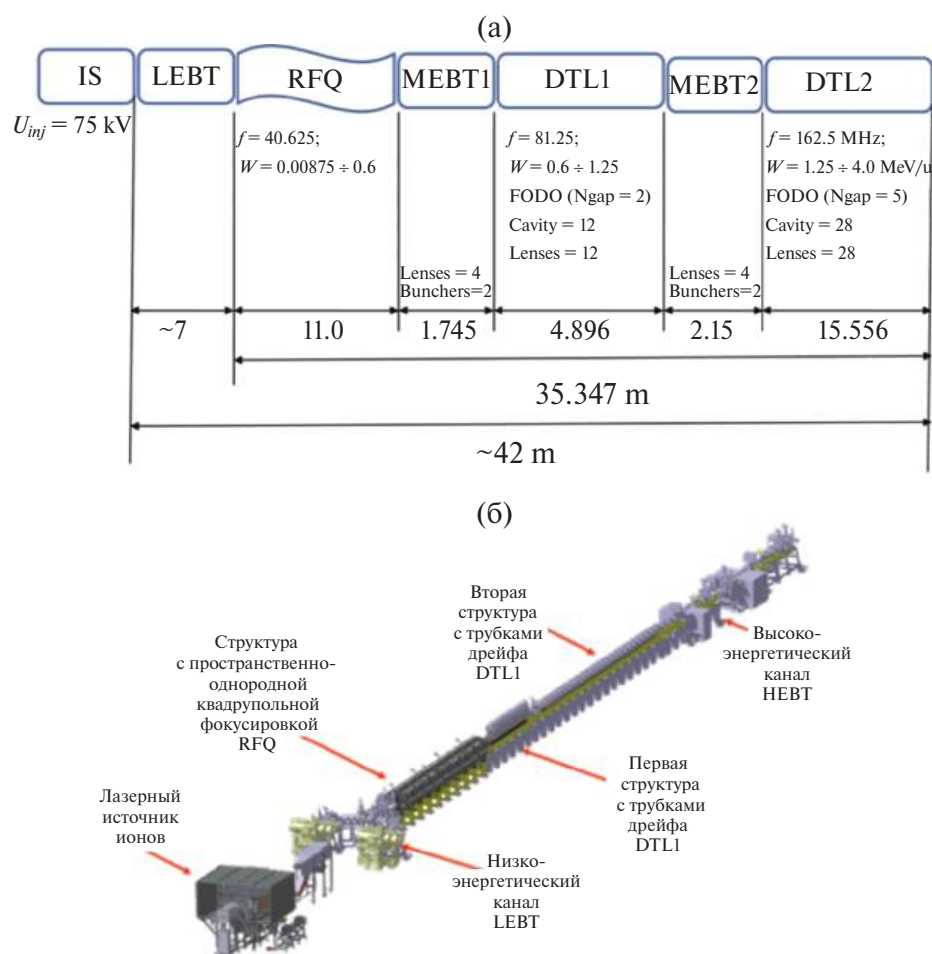


Рис. 1. Структура линейного ускорителя ЛУ2.

В качестве источника ионного пучка предполагается изготовить аналог лазерного источника ионов ЛИИ100, успешно работающего в ККТЭФ на протяжении многих лет [5, 6]. Выбор источника обусловлен как необходимостью обеспечить импульсную генерацию высокозарядных ионов большой интенсивности, так и необходимостью оперативно производить замену генерируемого пучка по требованию экспериментаторов.

На начальном этапе ускорение и группировка пучка осуществляется в резонаторе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) со смещенными окнами [7]. Дальнейшее ускорение осуществляется ускоряющими структурами на основе резонаторов с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂. DTL₁ – это цепочка из двенадцати двухзоровых четвертьволновых резонаторов с квадрупольными электромагнитными линзами между резонаторами. DTL₂ – цепочка из двадцати восьми пятизоровых ИР-резонаторов (ИР – interdigital, ИР-резонаторы) с такими же квадрупольными линзами для фокусировки пучка. Согласование параметров пучка между отдельными его элементами обеспечивается соответствующими транспортными каналами (ЛЕВТ, МЕВТ₁ и МЕВТ₂). Вывод пучка и его транспортировка до канала ввода пучка в бустер осуществляется в транспортном канале НЕВТ, где предусмотрено место для установки дипольного магнита для ввода в канал пучка легких ионов от ускорителя ЛУ1. На данный момент разработан технический проект ускорителя ЛУ2, выполнены работы по созданию рабочей конструкторской документации на изготовление всех его составных частей. В статье приводятся основные параметры ускорителя тяжелых ионов ЛУ2.

2. СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЯ

2.1. Лазерно-плазменный источник ионов на основе импульсно-периодического CO₂-лазера

Поскольку для проведения экспериментов по изучению радиационной стойкости электронной компонентной базы требуются пучки широкого спектра ионов, смена которых должна осуществляться в кратчайшее время, в качестве источника таких пучков практически нет альтернативы лазерно-плазменному источнику ионов. В ККТЭФ на протяжении многих лет для генерации пучков тяжелых ионов используется источник ЛИИ 100. В ходе проектных работ подготовлена конструкторская документация

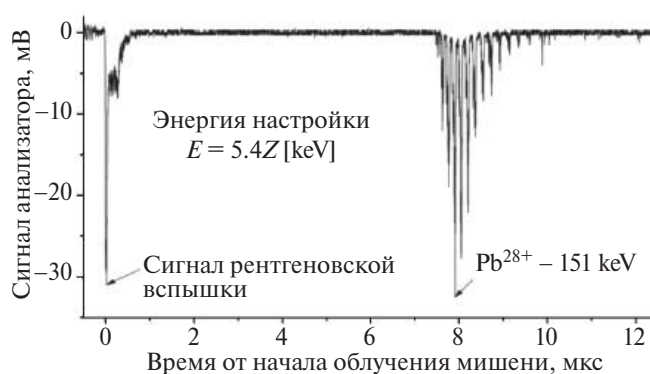


Рис. 2. Результат исследования пучка ионов свинца с помощью электростатического анализатора.

на изготовление аналога с учетом тех модернизаций, которые были осуществлены на действующем источнике за последние двадцать лет и которые позволяют обеспечить генерацию пучка требуемых ионов с заданной интенсивностью. На рис. 2 представлен результат исследования пучка ионов свинца с помощью электростатического анализатора. Показана возможность генерации ионов Pb²⁸⁺ при наличии зарядовых состояний вплоть до Pb³¹⁺. При этом обеспечивается необходимая для экспериментальных работ интенсивность пучка ионов в требуемом зарядовом состоянии. Стоит отметить, что это уникальные рекордные значения для источника данного типа. Информация об экспериментальных работах, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик источника, представлена в работе [8].

2.2. Ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ)

На начальном этапе ускорение ионного пучка проводится в резонаторе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. При разработке ускоряющего канала были приняты следующие параметры: ионы с отношением массы к заряду $4 \leq A/Z \leq 8$; ток ускоренных частиц не менее 10 мА; транспорт примерно 100%; трансмиссия не менее 95%; режим работы импульсный; максимальная напряженность на поверхности электродов (в единицах Килпатрика) $E = 1.8 \text{ Кр}$; отношение акцептанса канала к эмиттансу пучка не менее 3.

Анализ зависимости длины ускоряющей структуры от частоты ускоряющего поля привел к выбору рабочей частоты RFQ 40.625 МГц. Разработанный канал позволяет полностью удовлетворить указанным выше требованиям. Результат

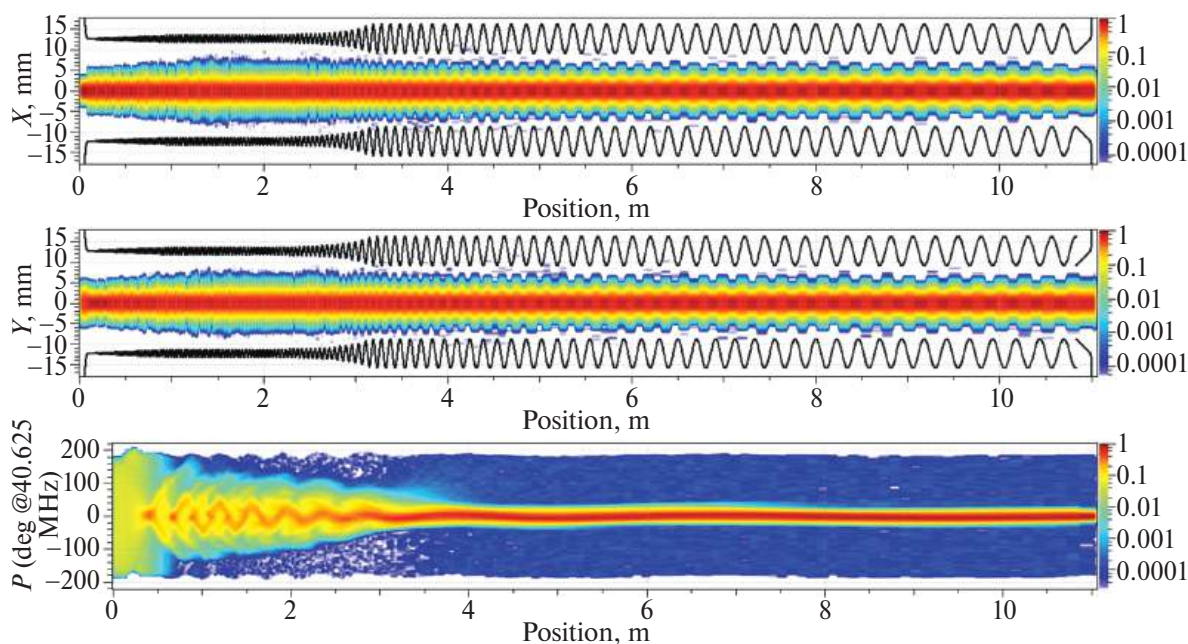


Рис. 3. Результат моделирования динамики пучка в канале RFQ.

моделирования динамики пучка в канале представлен на рис. 3 [4].

Резонатор реализован в виде структуры со смещенными окнами связи, позволяющей облегчить его настройку особенно при большом продольном размере [9]. Основные параметры ускоряющего канала, а также электродинамические характеристики резонатора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры ускоряющей структуры RFQ

Показатель	Величина
Режим работы	Импульсный
Ускоряемые ионы A/Z	8
Ток инжекции, mA	10
Рабочая частота, МГц	40.625
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов, Кв	1.8
Энергия инжекции пучка, МэВ/н	0.00875
Энергия экстракции пучка, МэВ/н	0.6
Длина электродов, м	10.998
Средний радиус апертуры канала, мм	12.5
Внутренний диаметр секции ускорителя RFQ, мм	1065
Длина окна связи, мм	740
Высота окна связи, мм	351
Ширина основания электрода, мм	158
Собственная добротность структуры	≈ 13 000
Длина ускоряющей структуры, м	≈ 11.16
Суммарная мощность ВЧ-потерь, кВт	≈ 500

2.3. Ускоряющие структуры на четвертьволновых резонаторах с трубками дрейфа (DTL₁) и малоазорных резонаторах с трубками дрейфа (DTL₂)

Для последующего ускорения используется цепочка из двенадцати двухазорных четвертьволновых резонаторов на удвоенной частоте 81.25 МГц [10]. Для фокусировки используются электромагнитные квадрупольные линзы, размещаемые между резонаторами (рис. 4). Цепочка резонаторов позволяет обеспечить ускорение без потерь всего пучка [4]. Геометрические размеры кожуха резонатора одинаковы для всех двенадцати резонаторов. Различия только в длинах трубок дрейфа и ускоряющих зазоров от резонатора к резонатору.

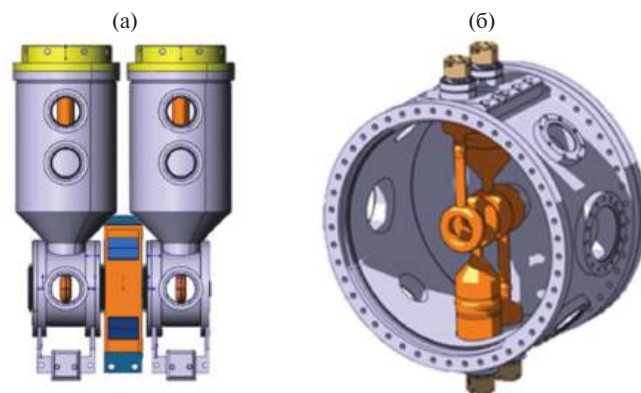


Рис. 4. а – Два четвертьволновых резонатора DTL₁ с квадрупольной линзой между ними [10], б – конструкция 5-азорного резонатора DTL₁ [11].

Таблица 3. Основные параметры DTL₁ и DTL₂

Показатель	DTL ₁	DTL ₂
Частота ускоряющего поля, МГц	81.25	162.5
Энергия пучка, МэВ/н	0.6–1.25	1.25–4
Число периодов фокусировки	12	28
Максимальная напряженность поля на поверхности трубок дрейфа	1.8 Кр	
Радиус апертуры канала в резонаторах/линзах, мм	21/22.5	25/22.5
Длина апертурного канала, м	4.896	15.556
Равновесная фаза в резонаторах, град	–50 ÷ –40	
Максимальный градиент фокусирующего поля, Тл/м	41	45.5
Длина резонатора, мм	208	280–442
Собственная добротность	≈9600	≈7000–10 800
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	≈60	≈150–200

Основные параметры DTL₁ и DTL₂ представлены в табл. 3.

Также, как и в DTL₁, весь пучок захватывается и ускоряется в канале DTL₂ [4], который состоит из двадцати восьми пятиазорных ИР-резонаторов (рис. 4, [11]) с теми же квадрупольными линзами как и в DTL₁.

2.4. Низкоэнергетический канал транспортировки пучка (LEBT)

Для выделения требуемых ионов из пучка, генерируемого лазерным источником ионов, и последующего согласования его с RFQ разработан низкоэнергетический канал транспортировки пучка – LEBT (рис. 5) [15].

Поскольку для обеспечения требуемой интенсивности при заданной длительности импульса

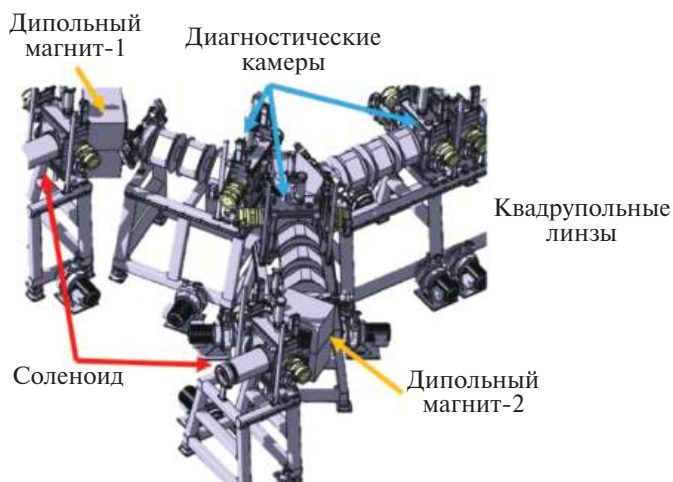


Рис. 5. Конструкция низкоэнергетического канала LEBT.

для разных веществ требуются различные длины участка разлета плазмы в ионном источнике, то, как было сказано выше, предусмотрены две мишенные камеры и, как следствие, разработаны два плеча LEBT, которые доставляют пучки от обеих мишенных камер ко входу в RFQ по мере необходимости.

В состав канала входят два дипольных магнита для сепарации пучка и один дипольный магнит для собирания пучка на ось RFQ. На выходе источника пучок аксиально симметричен и для его фокусировки можно использовать магнитный соленоид. После поворота симметричность нарушается и для фокусировки пучка на участке между поворотным и объединяющим магнитами используются магнитные квадрупольные линзы. В канале удается отсечь большую часть паразитных ионов. До входа в RFQ доходит пучок ионов амплитудой не менее 5 мА. При этом рост эмиттанса не превышает 1.3. В канале располагаются несколько диагностических камер, которые снабжены измерителями профиля пучка, его интенсивности и положения центра масс.

2.5. Канал транспортировки пучка на промежуточную энергию (MEBT₁ и MEBT₂)

Канал согласования пучка между RFQ и DTL₁ обеспечивает шестимерное согласование пучка для последующего захвата ускоренного в RFQ пучка в режим ускорения в DTL₁ [3]. Требуется шестимерное согласование, так как рабочая частота DTL₁ в два раза превышает рабочую частоту RFQ. Для согласования по поперечному движению используются четыре квадрупольные линзы, для согласования по продольному

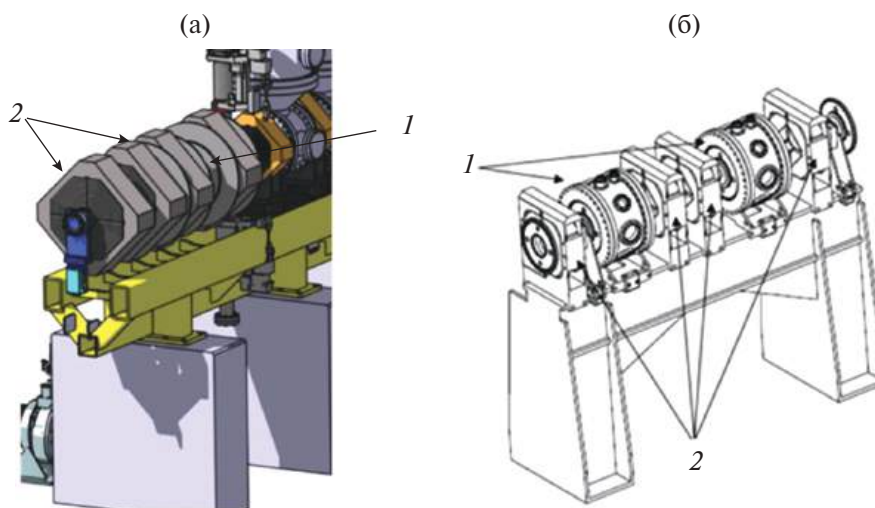


Рис. 6. Схема каналов МЕВТ₁ и МЕВТ₂.

движению два группирователя, работающие на частоте 81.25 МГц. В канале устанавливается диагностическая камера для измерения профиля пучка, положения его центра масс и интенсивности. Основные параметры канала приведены ниже: рабочая частота 81.25 МГц; длина 1745 мм; четыре квадрупольные магнитные линзы с радиусом по пучку 22.5 мм, длиной 130 мм, областью магнитного поля 200 мм; градиенты линз: $-39.1, 40.4, -38.3, 31.8$ Тл/м (максимально допустимый градиент 48 Тл/м); два двухззорных банчера, каждый длиной 170 мм и радиусом апертуры 20 мм; максимальное поле в зазоре первого банчера 22 кВ/см, второго – 50 кВ/см ($E_{s\max} < 1.8$ Кр).

Канал МЕВТ₂ обеспечивает шестимерное согласование ионного пучка, ускоренного в DTL₁, со входом DTL₂ (рис. 6). Принцип его построения аналогичен МЕВТ₁. Основные параметры: рабочая частота 162.5 МГц; длина 2150 мм; четыре квадрупольные магнитные линзы с радиусом по пучку 22.5 мм, длиной 130 мм, областью магнитного поля 200 мм; градиенты линз: $-28.3, 38.6, -38.5, 28.3$ Тл/м (максимально допустимый градиент 48 Тл/м); два двухззорных банчера, каждый длиной 254 мм и радиусом апертуры 20 мм; максимальное поле в зазоре первого банчера 70 кВ/см, второго – 96 кВ/см ($E_{s\max} < 1.8$ Кр).

2.6. Высокоэнергетический канал транспортировки пучка (НЕВТ)

Высокоэнергетический канал транспортировки пучка НЕВТ призван обеспечить доводку ускоренного пучка до перезарядной мишени. В конструкции канала учтено расположение

защитных стенок, отделяющих зал кольцевого ускорителя бустера от зала линейного ускорителя, а также предусмотрено место для установки дипольного магнита для вывода к той же перезарядной мишени пучка, ускоренного в ЛУ1 (рис. 7) [13]. Канал разбит на три логических участка. Начальная часть содержит четыре квадрупольные линзы, позволяющие сформировать параметры пучка, необходимые для его дальнейшей транспортировки. Затем идет регулярная часть канала, которая состоит из нескольких идентичных участков. На входе и выходе этих участков параметры пучка абсолютно идентичны. И, наконец, конечная часть канала содержит триплет квадрупольных линз, позволяющий сформировать практически любой профиль пучка на перезарядной мишени. В составе канала предусмотрены три диагностические

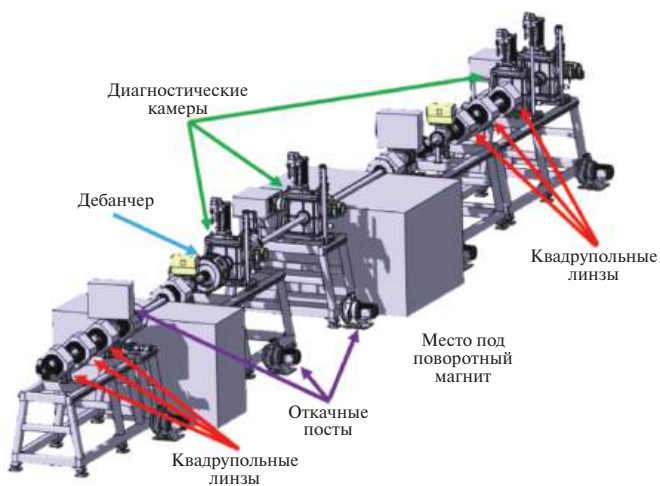


Рис. 7. Высокоэнергетический канал транспортировки пучка НЕВТ.

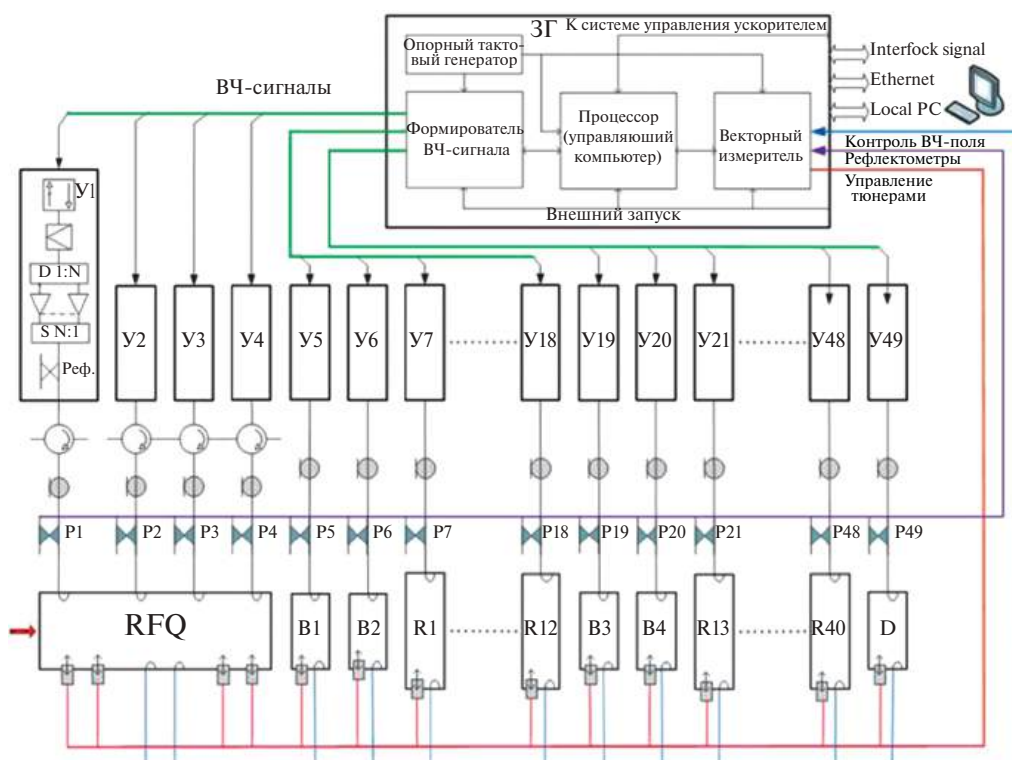


Рис. 8. Схема питания ВЧ-ускорителя ЛУ2.

камеры, обеспечивающие контроль за интенсивностью пучка и его профилем.

Схема подачи ВЧ-мощности в ускоряющие структуры представлена на рис. 8 [14].

Система построена на базе твердотельных усилителей производства компании “Триада-ТВ” на частотах 40.625, 81.25 и 162.5 МГц и состоит из набора стоек с выходной мощностью от 190 до 240 кВт. К данному моменту созданы и проходят испытания два блока на частотах 40.625 и 81.25 МГц мощностью 200 кВт каждый. Разработан, изготовлен и успешно прошел испытания пилотный образец ввода мощности для всех резонаторов ЛУ2, а также рефлектометр. Также разработана конструкция плунжера, изготовлен и протестирован ввод движения в вакуум для плунжера.

2.7. Магнитные элементы

Для ускорителя ЛУ2 разработано семейство магнитных элементов, а именно: соленоид LEVT (2 шт.); отклоняющий диполь LEVT (2 шт.) [15] собирающий магнит LEVT (1 шт.); квадрупольные линзы для LEVT (9 шт.), DTL (40 шт.), MEVT (8 шт.) и HEVT (12 шт.). Особое внимание было уделено разработке макета квадрупольной линзы для каналов DTL₁ и DTL₂, так как в этих

каналах сильно ограничение по продольному размеру, а также была поставлена задача разработать импульсную линзу с возможностью работы без водяного охлаждения [16]. Прототип такой линзы был разработан совместно со специалистами НИИЭФА им. Ефремова, где он и был изготовлен (рис. 9). Импульсный блок питания для линзы разработан в НИИЭФА-ЭНЕРГО. Предварительные результаты позволяют утвер-

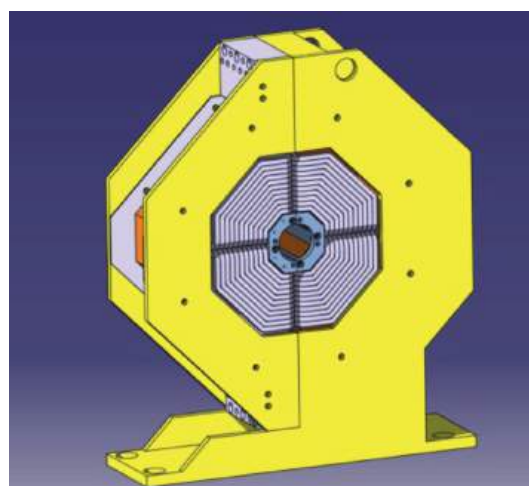


Рис. 9. 3D-модель пилотного образца квадрупольной линзы каналов DTL₁ и DTL₂.

ждать, что требуемый градиент магнитного поля линза обеспечивает. Сейчас готовятся ресурсные испытания, которые позволят сделать вывод о тепловой стабильности конструкции.

2.8. Система диагностики пучка

Система диагностики пучка ускорителя ЛУ2 включает в себя стандартные элементы – цилиндр Фарадея (ЦФ), индукционный датчик (ИД), профилометр (П), датчик положения пучка (ВРМ). Для настройки и аттестации пучка будет использован также пеппер-пот измеритель эмиттанса (Э), разработанный и успешно использованный для аттестации нескольких источников разного типа в разных лабораториях [17]. Измеритель не будет устанавливаться стационарно на канале. Он будет задействован в работах по настройке канала, а затем будет установлен на тестовом стенде ионного источника.

2.9. Вакуумная система

Для разработки вакуумной системы ускорителя ЛУ2 использовалась программа MolFlow+. Вакуумная система в структурах IS, LEBT, RFQ, МЕВТ, DTL должна обеспечивать получение рабочего вакуума не хуже $1.0 \cdot 10^{-7}$ мбар, а вакуумная система канала вывода пучка НЕВТ должна обеспечивать получение рабочего вакуума не хуже $1.0 \cdot 10^{-9}$ мбар. В результате выполненных работ подготовлены рабочие схемы вакуумной системы всей установки, составлены списки покупных стандартных изделий [18].

2.10. Система управления установки

Система предполагает широкое использование распределенных контроллеров с максимально унифицированной архитектурой и периферийным оснащением. Практически все процессы, требующие быстрого действия, протекают на уровне распределенных контроллеров. Времена отклика системы управления на верхнем уровне соизмеримо с человеческой реакцией. Предполагается повсеместное использование стандарта Ethernet для интеграции компонентов системы в единое целое. Гигабитный Ethernet и архитектура системы позволяют системе диагностики собирать и отображать в том числе и огибающие импульсов интересующих оператора процессов. Узлами верхнего уровня системы управления являются компьютеры в стоечном или настольном исполнении

под управлением ОС Windows. Предполагается возможность “горячей” замены компьютеров при необходимости. Технологические системы относительно медленны, при этом максимально полно используются стандартные или массово выпускаемые изделия, такие как насосы, вакуумметры, расходомеры и пр. Такое положение дел позволяет применять промышленные контроллеры широкой номенклатуры [19].

Лазерный источник сам по себе является сложной системой, включающей в себя высоковольтную платформу, вакуумное и газовое оборудование, прецизионную механику, управление мишенью.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для синхротронного комплекса исследований разработан проект и подготовлена рабочая конструкторская документация на изготовление линейного ускорителя тяжелых ионов ЛУ2. Изготовлены пилотные образцы квадрупольной линзы, петли ввода ВЧ-мощности, плунжера, которые подтвердили работоспособность заложенных в них конструктивных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капчинский И.М.* // Теория линейных резонансных ускорителей. Москва: Энергоиздат, 1982.
2. *Завьялов Н.В.* // УФН. 2022. Т. 192. С. 547. <https://doi.org/10.3367/UFN.2020.12.038933>
3. *Будников Д.В., Воронцов С.В., Глушков С.Л., Гордеев В.С., Гречушкин В.Б.* // ВАНТ Серия: физика ядерных реакторов. 2021. № 4. С. 5. https://doi.org/10.53403/02054671_2021_4_05
4. *Кропачев Г.Н., Кулевой Т.В., Ситников А.Л., Скачков В.С., Хабибуллина Е.Р., Сметанин М.Л., Тельнов А.В., Завьялов Н.В.* // Сибирский физический журнал (поступила в редакцию).
5. *Alexeev N.N., Alekseev P.N., Andreev V.A., Balabaev A.N., Nikolaev V.I. et al.* // Proceedings of IPAC2011. San Sebastián. Spain. WEP075. P. 2193. <https://jacow.org/IPAC2011/papers/WEP075.pdf>
6. *Kulevoy T.V., Balabaev A.N., Khrisanov I.A., Losev A.A., Roerich V.K., Satov Yu.A., Shumshurov A.V., Vasilyev A.A.* // Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC'21. Alushta. Russia. 2021. P. 327. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB48>
7. *Andreev V.A., Parisi G.* // Proceedings of EPAC'94. London. 1994. P. 1300.

8. Балабаев А.Н., Хрисанов И.А., Кулевой Т.В., Лосев А.А., Сатов Ю.А., Шумшуров А.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2024. (поступила в редакцию).
9. Ситников А.Л., Селезнев Д.Н. Крощачев Г.Н. и др. // ПТЭ. 2025. № 8 (S). С. 45.
10. Ситников А.Л., Селезнев Д.Н. Крощачев Г.Н. и др. // ПТЭ. 2025. № 8 (S). С. 50.
11. Ситников А.Л., Селезнев Д.Н. Крощачев Г.Н. и др. // ПТЭ. 2025. № 8 (S). С. 54.
12. Хабибуллина Е.Р., Крощачев Г.Н., Кулевой Т.В., Скачков В.С., Сергеева О.С. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14. № 5. С. 504. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050219>
13. Хабибуллина Е.Р., Николаев В.И., Большаков А.Е., Крощачев Г.Н., Кулевой Т.В., Скачков В.С. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13. № 4. С. 367. <https://doi.org/10.56304/S2079562922030204>
14. Kuzmichev V.G., Kulevoy T.V., Seleznev D.N., Liakin D.A., Sitnikov A.L. // 12th Int. Particle Acc. Conf. 2021. P. 4417. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB319>
15. Кильметова И. В., Крощачев Г. Н., Кулевой Т. В. и др. // ПТЭ. 2025. № 7 (S). С. 121.
16. Skachkov V.S., Kozlov A.V., Kropachev G.N. Kulevoy T.V., Liakin D.A., Sergeeva O.S., Stasevich Yu.B. // 12th Int. Particle Acc. Conf. 2021. P. 4359. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB286>
17. Barabin S., Kozlov A., Kulevoy T., Liakin D., Lukashin A., Selesnev D. // Proceedings of 26th Russian Particle Accelerator Conference RUPAC'18 2018. Protvino. P. 443. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-THPSC18>
18. Марченко А.И., Кулевой Т.В., Машин И. // Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23". 2023. Новосибирск. С. 50.
19. Лякин Д.А. // Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23". 2023. Новосибирск. С. 167.

КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ЦИКЛОТРОНА У400Р ДЛЯ НОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗАЛА¹

© 2025 г. В. И. Лисов^а, *, В. И. Басс^а, И. А. Иваненко^а, И. В. Калагин^а,
Н. Ю. Казаринов^а, А. С. Забанов^а

^а Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри. 6

* e-mail: lisov@jinr.ru

Поступила в редакцию 26.12.2023 г.

После доработки 01.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Представлена новая схема линий транспортировки ионов от циклотрона У400Р в новый экспериментальный зал. В состав каналов входит коммутирующий магнит с индукцией переменного магнитного поля до 1.3 Тл, который позволяет работать в трех направлениях, обеспечивая транспортировку ионов по каналам к трем экспериментальным установкам. Фокусировка пучка в каналах обеспечивается набором квадрупольных линз, имеющих градиенты до 7.7 Тл/м.

DOI: 10.7868/S3034564225080055

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная деятельность лаборатории ядерных реакций им. Флерова Объединенного института ядерных исследований связана с фундаментальной наукой. В настоящее время в лаборатории продолжают работы по реконструкции циклотрона У400, обеспечивающего исследования по трем основным направлениям физики тяжелых ионов: синтез тяжелых и экзотических ядер, исследования ядерных реакций и исследования взаимодействия вещества с тяжелыми ионами. У400Р станет результатом реконструкции циклотрона У400 [1]. Изохронный циклотрон предназначен для получения ускоренных пучков ионов от углерода до урана с энергиями от 0.8 МэВ/нуклон до 27 МэВ/нуклон (рис. 1) [2].

Эффективность использования данного ускорителя во многом будет определяться качеством системы транспортировки выведенных пучков. Достаточно разветвленная система каналов позволяет проводить многоплановые физические и прикладные исследования. В рам-

ках работ по реконструкции ускорительного комплекса предусмотрено здание нового экспериментального зала (НЭЗ), связанного со зданием ускорителя (зд. 131) через новый участок проводки ионпровода (УПИ). Для данного ускорительного комплекса создается система транспортировки из трех каналов разводки пучков (рис. 2).

В данной работе представлены результаты компоновки каналов и расчеты транспортировки пучка $^{49}\text{Ca}^{7+}$ с энергией $W = 11.085$ МэВ/нукл из циклотрона У400Р в каналах нового экспериментального зала. Расчеты трассировки выведенного ионного пучка проводились с помощью программы TRANSPORT [3] для параметров ионного пучка, приведенных в табл. 1.

2. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В НЭЗ В КАНАЛЕ № 1

Общая длина канала равно 65.787 м. Оптические элементы канала имеют следующие параметры.

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск.

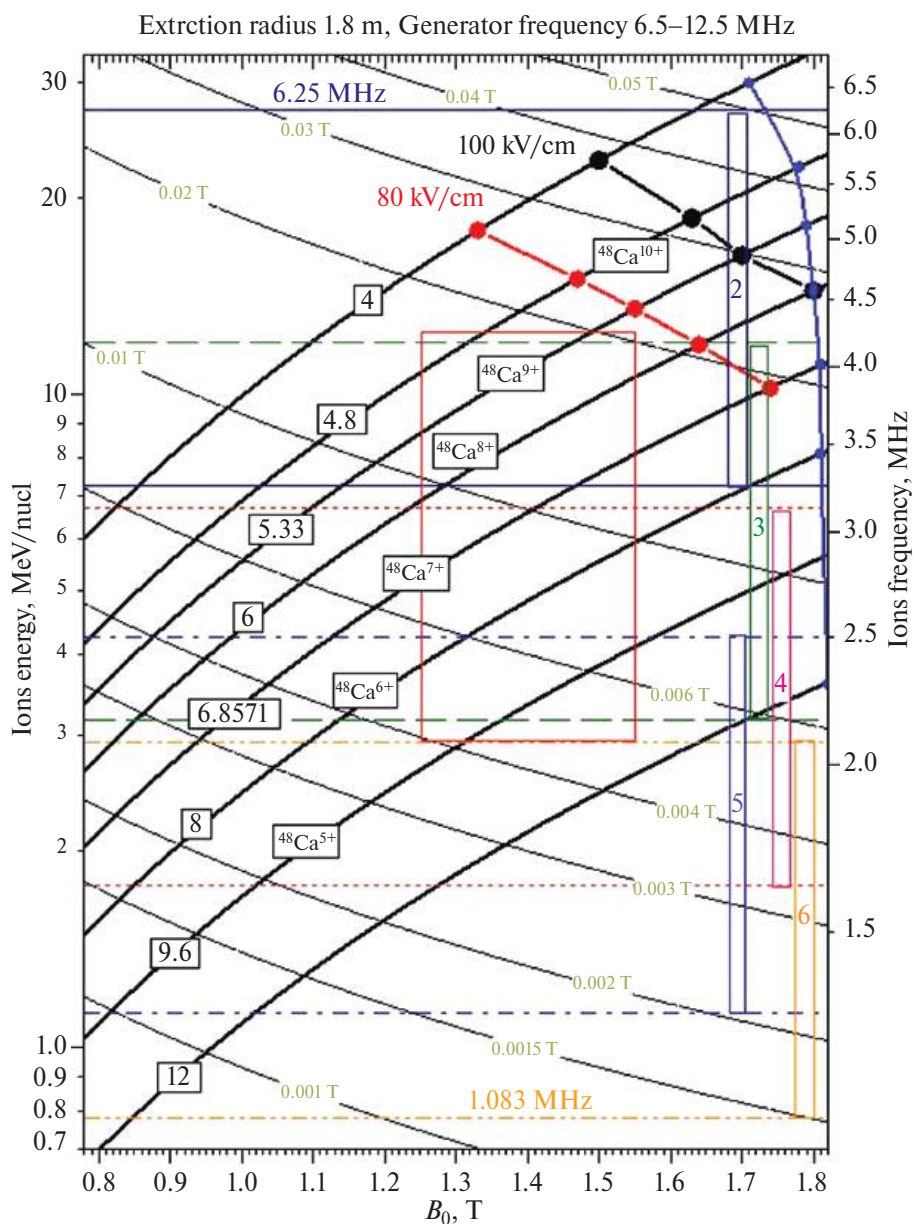


Рис. 1. Рабочая диаграмма У400Р.

Таблица 1. Начальные параметры пучка

Ион	W , МэВ/нукл	α_x	β_x , см/мрад	α_y	β_y , см/мрад	$\epsilon_{\text{rms } x}$ π , см мрад	$\epsilon_{\text{rms } y}$ π , см мрад	D_x см	D'_x	$\Delta p/p$ 2σ , %	$\Delta E/E$ 2σ , %
$^{48}\text{Ca}^{7+}$	11.0853	0.599	1.589	3.058	0.363	0.064	0.114	428.52	0.695	0.155	0.31

Примечание. В табл. 1 использованы следующие обозначения: α_x , β_x , α_y , β_y – параметры Твисса, $\epsilon_{\text{rms } x}$, $\epsilon_{\text{rms } y}$ – значения горизонтального и вертикального среднеквадратичных эмиттансов, D_x и D'_x – начальные значения горизонтальной дисперсионной функции и ее производной. Значения вертикальной дисперсионной функции D_y и ее производной D'_y близки к нулю. Максимальная жесткость B_p выведенного пучка $^{48}\text{Ca}^{7+}$ составляет 3.31 Т·м.

1. Дуплеты квадрупольных линз Q_1-Q_{25} и квадрупольная линза Q_{d1} : эффективная длина $l_{eff} = 35$ см, апертура 110 мм, максимальный градиент $G_{max} = 600$ Гс/см, расстояние между центрами квадрупольных линз в дуплете 58 см.

2. Поворотный магнит TM_2 : угол поворота 19.35° (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота $\rho_0 = 2.16$ м, углы скоса $\epsilon_{in} = 0$, $\epsilon_{out} = 0$.

3. Поворотные магниты TM_3 и TM_4 : угол поворота 7.5° (поворот в вертикальной плоскости, магнит TM_3 поворачивает вверх, магнит TM_4 поворачивает вниз), радиус поворота $\rho_0 = 3.1$ м, углы скоса $\epsilon_{in} = 0$, $\epsilon_{out} = 0$.

4. Поворотный магнит TM_5 : угол поворота 40° (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота $\rho_0 = 2.558$ м, углы скоса $\epsilon_{in} = 0$, $\epsilon_{out} = 20^\circ$.

Схема компоновки канала № 1 в НЭЗ представлена на рис. 3.

На рис. 4, 5 представлены графики огибающих и дисперсионных функций при транспортировке пучка $^{48}\text{Ca}^{7+}$ в НЭЗ в канале № 1.

3. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В НЭЗ В КАНАЛЕ № 2

Общая длина канала равна 53.316 м. Оптические элементы канала имеют следующие параметры.

1. Дуплеты квадрупольных линз Q_1-Q_{18} , $Q_{d2}-Q_{d3}$ и квадрупольная линза Q_{d1} : эффективная длина $l_{eff} = 35$ см, апертура 110 мм, максимальный градиент $G_{max} = 600$ Гс/см, расстояние между центрами квадрупольных линз в дуплете 58 см.

2. Поворотный магнит TM_2 : угол поворота 19.35° (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота $\rho_0 = 2.16$ м, углы скоса $\epsilon_{in} = 0$, $\epsilon_{out} = 0$.

3. Поворотные магниты TM_3 и TM_4 : угол поворота 7.5° (поворот в вертикальной плоскости, магнит TM_3 поворачивает вверх, магнит

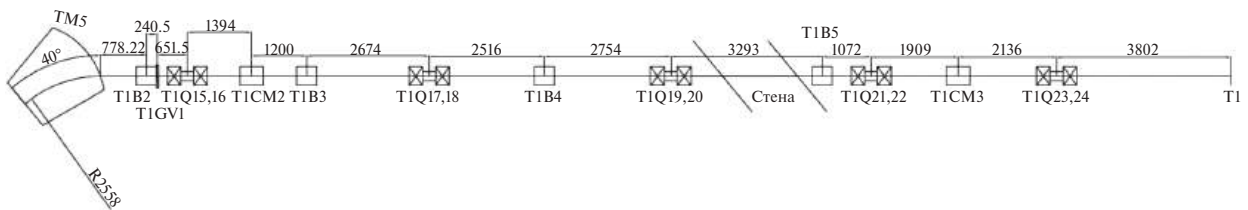


Рис. 3. Схема компоновки канала № 1 НЭЗ.

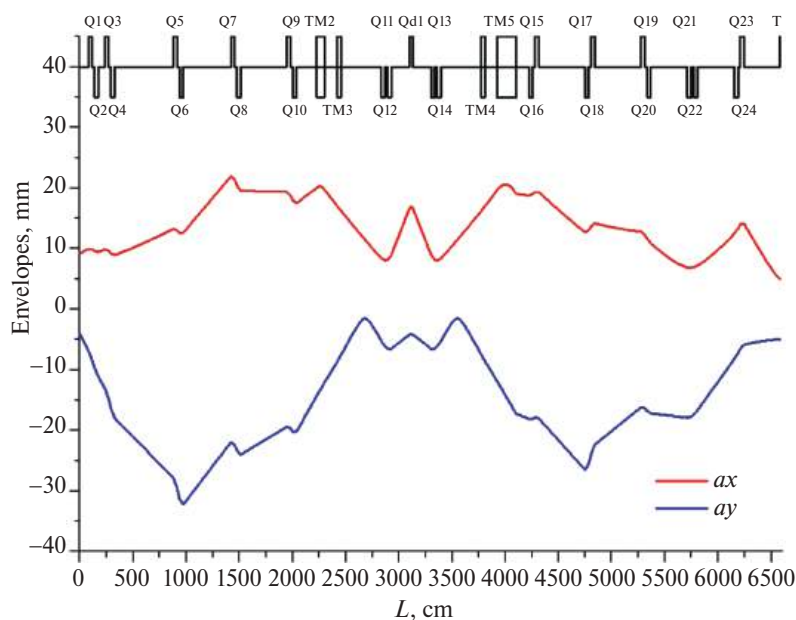


Рис. 4. График огибающих пучка $^{48}\text{Ca}^{7+}$ в НЭЗ в канале № 1.

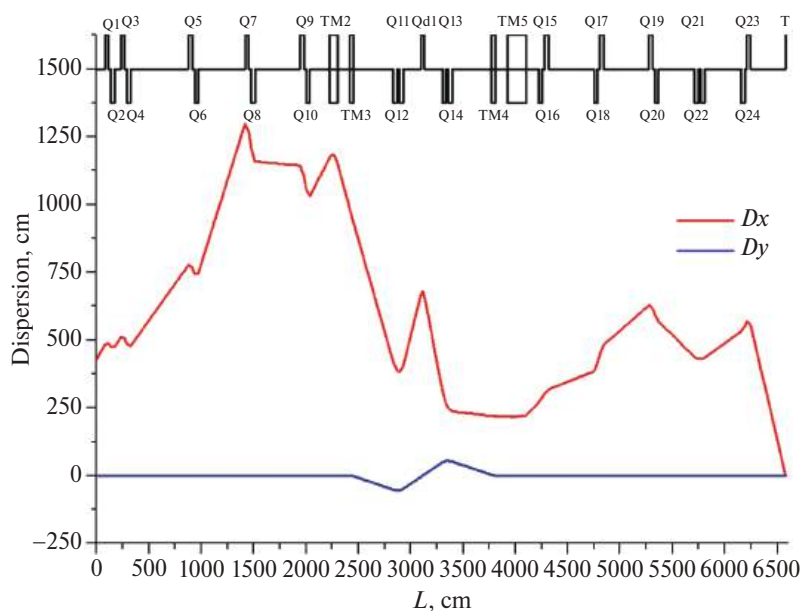


Рис. 5. График дисперсионных функций пучка 48Ca^{7+} в НЭЗ в канале № 1.

TM_4 поворачивает вниз), радиус поворота $\rho_0 = 3.1$ м, углы склоа $\epsilon_{in} = 0$, $\epsilon_{out} = 0$.

Схема компоновки канала № 2 в НЭЗ приведена на рис. 6.

На рис. 7, 8 представлены графики огибающих и дисперсионных функций при транспортировке пучков в канале № 2 в НЭЗ.

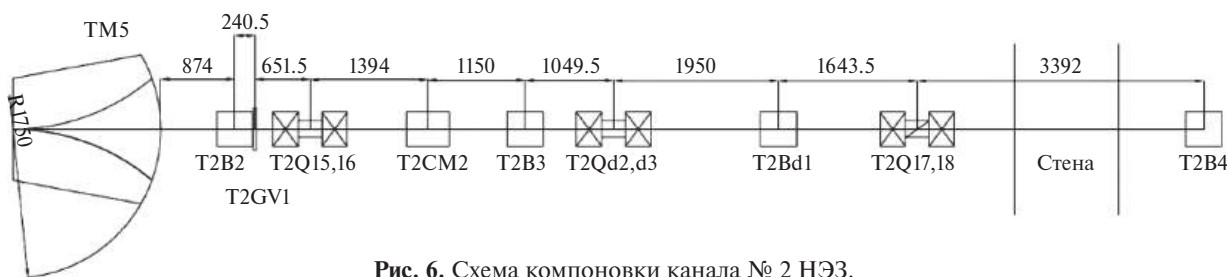


Рис. 6. Схема компоновки канала № 2 НЭЗ.

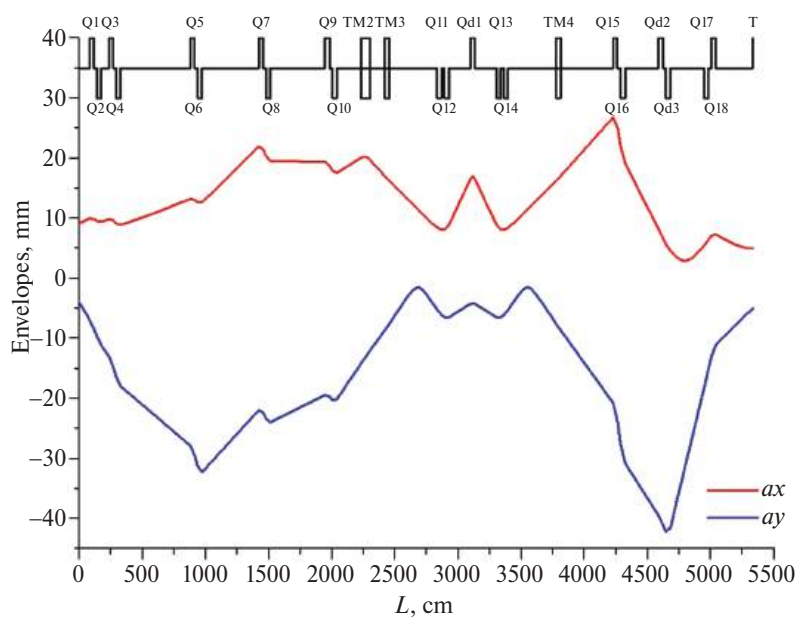


Рис. 7. График огибающих пучка 48Ca^{7+} в НЭЗ в канале № 2.

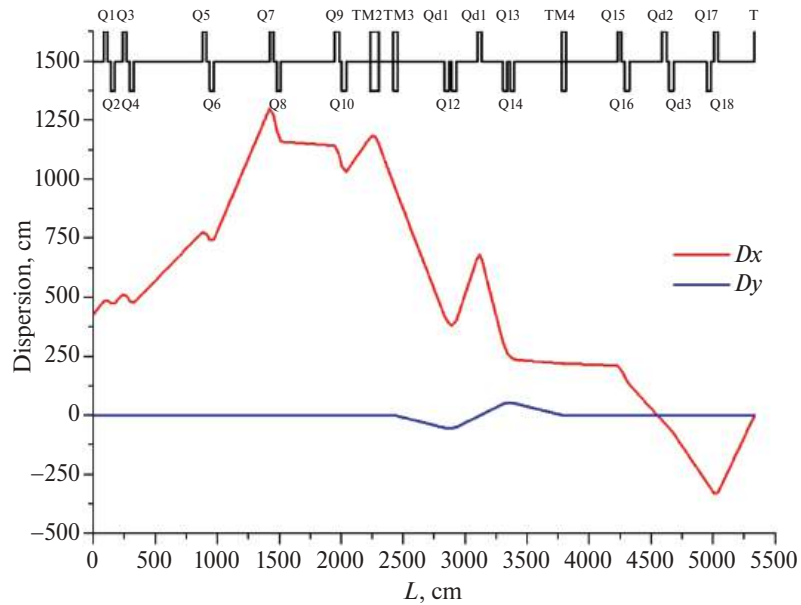


Рис. 8. График дисперсионных функций пучка 48Ca^{7+} в НЭЗ в канале № 2.

4. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В НЭЗ В КАНАЛЕ № 3

Общая длина канала равна 56.946 м. Оптические элементы канала имеют следующие параметры.

1. Дуплеты квадрупольных линз Q_1-Q_{20} и квадрупольная линза Q_{a1} : эффективная длина $l_{eff} =$

$= 35$ см, апертура 110 мм, максимальный градиент $G_{max} = 600$ Гс/см, расстояние между центрами квадрупольных линз в дуплете 58 см.

2. Поворотный магнит TM_2 : угол поворота 19.35° (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направ-

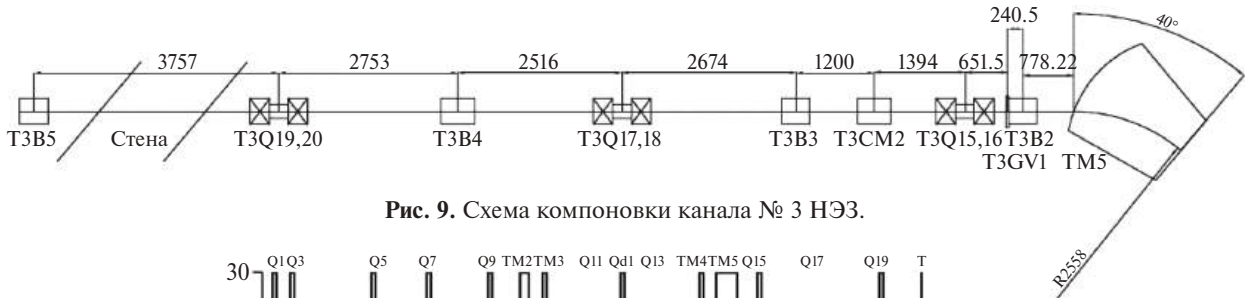


Рис. 9. Схема компоновки канала № 3 НЭЗ.

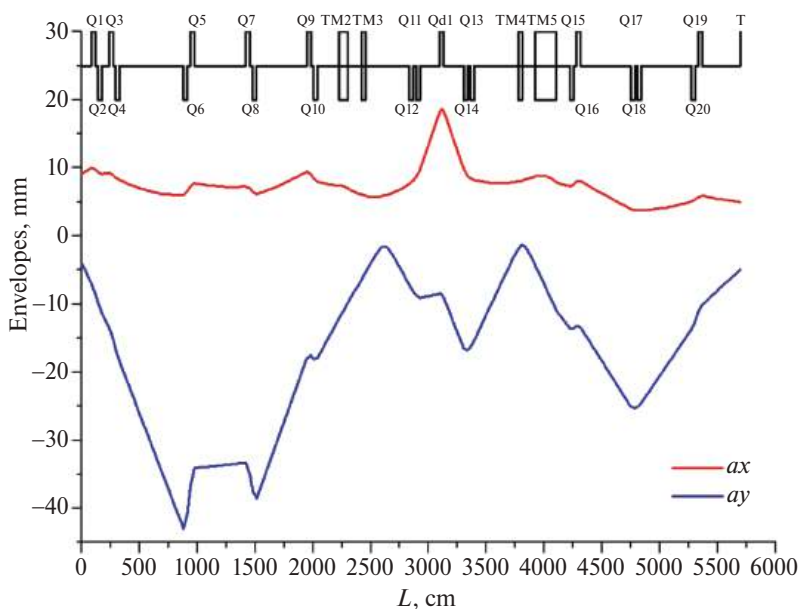


Рис. 10. График огибающих пучка 48Ca^{7+} в НЭЗ в канале № 3.

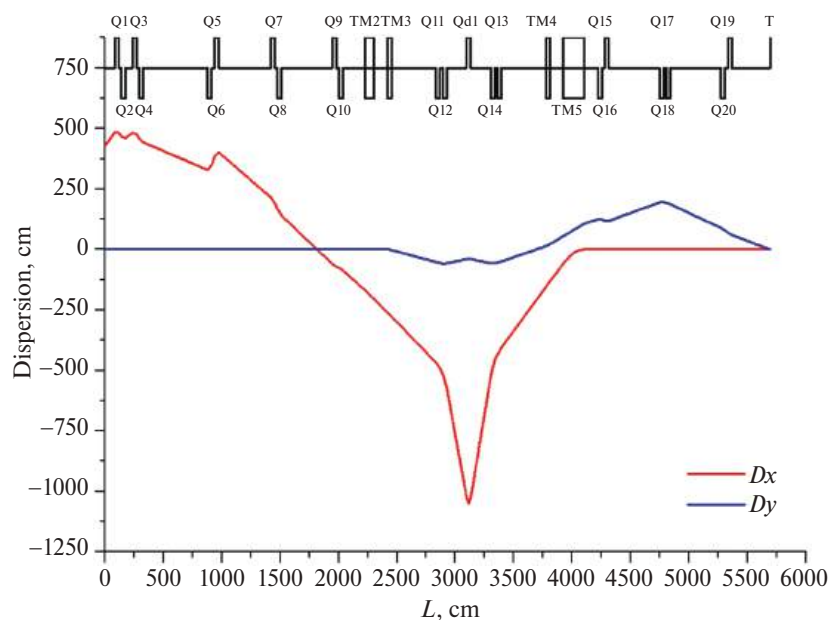


Рис. 11. График дисперсионных функций пучка $^{48}\text{Ca}^{7+}$ в НЭЗ в канале № 3.

лением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота $\rho_0 = 2.16$ м, углы скоса $\varepsilon_{\text{in}} = 0$, $\varepsilon_{\text{out}} = 0$.

3. Поворотные магниты TM_3 и TM_4 : угол поворота 7.5° (поворот в вертикальной плоскости, магнит TM_3 поворачивает вверх, магнит TM_4 поворачивает вниз), радиус поворота $\rho_0 = 3.1$ м, углы скоса $\varepsilon_{\text{in}} = 0$, $\varepsilon_{\text{out}} = 0$.

4. Поворотный магнит TM_5 : угол поворота 40° (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота $\rho_0 = 2.558$ м, углы скоса $\varepsilon_{\text{in}} = 0$, $\varepsilon_{\text{out}} = 20$.

Схема компоновки канала № 3 в НЭЗ показана на рис. 9.

На рис. 10, 11 представлены графики огибающих и дисперсионных функций при транспортировке пучка в НЭЗ в канале № 3.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам расчета транспортировка ионов $^{48}\text{Ca}^{7+}$ во всех каналах происходит без потерь.

Огибающие по всей длине канала не превышают 80 % апертуры ионопровода. На мишени получены требуемые размеры пучка диаметром равным 1 см (4σ) и нулевые значения дисперсионных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalagin I.V., Gulbekian G.G., Dmitriev S.N. et al. // Proc. of 26th Russian Particle Accelerator Conference, Protvino, Russia. 2018. P. 60. JACoW-CYCLOTRONS2019-FRB02.
2. Kalagin I.V., Gulbekian G.G., Dmitriev S.N. et al. // Proc. of 14th Conf. on Heavy Ion Accelerator Technology. China: Lanzhou. 2018. P. 23. doi: 10.18429/JACoW-HIAT2018-MOOXA01
3. PSI Graphic Transport Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version by Brown K.L., Carey D.C., Iselin Ch. et al. 2007. http://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/trans.htm

УДК 537.874

НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО ДЛЯ КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА ГАММА-КВАНТОВ В ДИАПАЗОНЕ ОТ ОДНОГО ДО 200 МЭВ¹

© 2025 г. Д. А. Никифоров^{a, b, *}, Н. А. Винокуров^{a, c}

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630559, Новосибирская область, р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

^c Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

* e-mail: D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.01.2024 г.

После доработки 09.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Метод обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов является эффективным методом для получения перестраиваемых по энергии и квазимонохроматических гамма-квантов. Для получения таких фотонных пучков используются комптоновские источники на основе электронных накопительных колец. В данной работе описан проект накопителя для максимальной энергии электронов 2 ГэВ для получения комптоновских гамма-квантов в широком диапазоне энергий.

DOI: 10.7868/S3034564225080063

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов является эффективным методом для получения перестраиваемых по энергии и квазимонохроматических гамма-квантов. Комптоновские гамма-кванты могут применяться для изучения фотоядерных реакций, таких как комптоновское рассеяние на ядрах, фотовозбуждение ядер, фоторазвал ядер и многих других. Для получения таких фотонных пучков используются комптоновские источники на основе электронных накопительных колец. В мире функционируют несколько таких источников, среди которых можно выделить источник $\text{HI}\gamma\text{S}$, находящийся в университете Дюка [1] и источник NewSUBARU, находящийся в университете Хуого [2]. Комптоновские источники характеризуются величиной перестройки по энергии гамма-квантов, потоком, энергетиче-

ским разбросом пучка гамма-квантов, поляризацией. Так, установка для производства комптоновских гамма-квантов на NewSUBARU может генерировать гамма-излучение с потоком $3 \cdot 10^7$ фотонов в секунду в диапазоне энергий 5–40 МэВ.

Самой производительной установкой с рекордными параметрами на данный момент является источник $\text{HI}\gamma\text{S}$, который может генерировать поток комптоновских гамма-квантов с максимальным числом $3 \cdot 10^{10}$ (для энергии около 10 МэВ) фотонов в секунду в диапазоне энергий от нуля до 120 МэВ [3], при этом энергетический разброс пучка гамма-квантов варьируется в пределах от 0.8 до 10% в смысле ширины на полувысоте [4]. В накопителе $\text{HI}\gamma\text{S}$ в качестве источника фотонов, с которым взаимодействует электронный сгусток в накопителе, используется лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Из-за падения мощности ЛСЭ для режима

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

с энергией гамма-квантов меньше 10 МэВ (масштабирование мощности ЛСЭ с энергией электронного пучка), их поток существенно падает. Для увеличения потока гамма-квантов в области низких энергий предлагается улучшение источника $\text{Ni}\gamma\text{S}$ до $\text{Ni}\gamma\text{S}_2$ [5].

В новом источнике планируется использовать резонатор Фабри–Перо с питанием от внешнего лазера, при этом предполагается достичь минимального среднеквадратичного энергетического разброса пучка гамма-квантов на уровне $2 \cdot 10^{-3}$. Еще одним фактором, ограничивающим поток фотонов, является максимальный ток пучка в накопителе. Ток пучка ограничивается неустойчивостью продольных и поперечных связанных мод (продольная микроволновая неустойчивость, ТМСИ-неустойчивость) [6]. Для их подавления используется сложная система обратной связи. Другим подходом для контроля над нежелательными коллективными эффектами может стать использование накопителя с отрицательным коэффициентом расширения орбиты α .

Впервые такие магнитные структуры были предложены в 1955 году Владимирским и Тарасовым [7] для решения проблемы критической энергии, при которой производная периода обращения частицы на орбите по импульсу становится равной нулю. При переходе через критическую энергию возможно возникновение продольных неустойчивостей, которые могут привести к потере пучка. В случае отрицательного α период всегда уменьшается с ростом энергии. Такая магнитная структура была реализована на протонном ускорителе J-PARC в Японии [8].

В наше время к магнитным структурам с отрицательным α проявляется большой интерес для их использования в электронных накопителях источников синхротронного излучения (СИ). С одной стороны, для достижения малого эмиттанса в источниках СИ требуется уменьшать бета-функцию внутри поворотных магнитов, используя сильные квадрупольные линзы. Это приводит к росту натурального хроматизма, который необходимо компенсировать сильными секступольными линзами, что приводит к уменьшению динамической апертуры. С другой стороны, при работе в режиме с умеренным отрицательным натуральным хроматизмом в сочетании с положительным α развивается сильная неустойчивость “голова-хвост” (head-tail). Поэтому одним из решений может

быть использование оптики с отрицательным α , которая теоретически позволит получить отрицательные значения хроматизма без упомянутой выше неустойчивости.

В недавней работе [9] было экспериментально продемонстрировано наличие неустойчивости “голова-хвост” в режиме с положительным α и отрицательным хроматизмом и ее отсутствие при отрицательном α и отрицательном хроматизме. В данной работе рассмотрена возможность применения оптической структуры накопителя с отрицательным α для генерации потока комптоновских гамма-квантов с большой интенсивностью.

2. НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

При рассеянии электромагнитной волны на электроне происходит излучение волн этим электроном при его движении, вызванном полем рассеиваемой волны. При длинах волн (в системе отсчета, движущейся со средней скоростью электрона), существенно превышающих комптоновскую длину волны $h/mc = 2.4$ пм (h – постоянная Планка, m – масса электрона, c – скорость света) можно пренебречь изменением частоты рассеянного излучения из-за отдачи (эффектом Комптона). Именно этот случай, называемый томсоновским рассеянием, будет обсуждаться далее.

Пусть имеются непрерывный гауссов пучок лазера с мощностью P и гауссов электронный пучок с поперечными среднеквадратичными размерами σ_x и σ_y , на котором происходит рассеяние. При достаточно больших размерах светового пучка, $\sqrt{\lambda z_0/(4\pi)} \gg \sigma_x, \sigma_y$, где λ – длина волны излучения, $z_0 = 4\pi\sigma^2/\lambda$ – длина Рэлея, σ – среднеквадратичный поперечный размер, а полный поток рассеянных гамма-квантов можно записать в виде [10]

$$\frac{dN}{dt} [\text{Гц}] = 4\pi \frac{I}{e} \frac{P\sigma_T}{hc^2} \approx 0.88 \cdot 10^{11} I [\text{А}] P [\text{кВт}],$$

где I – средний ток пучка в накопителе, e – заряд электрона, $\sigma_T = \frac{8\pi e^4}{3m^3 c^4} = 6.7 \cdot 10^{-25}$ см – сечение Томсона. Очень часто для экспериментов требуется достаточно узкий энергетический спектр гамма-квантов. Сужение энергетического спектра до полной относительной ширины

$$\delta = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}}, \text{ где } \varepsilon_{\max} = \frac{4\gamma^2}{\lambda} hc, \text{ достигается углом}$$

вой коллимацией с углом $\theta_{\max} = \sqrt{\delta/(1-\delta)}/\gamma$. При этом остается доля полного числа фотонов, равная $1.5\delta - 1.5\delta^2 + \delta^3$ [11]. Например, подставляя $\delta = 0.01$, получим угловую расходимость излучения $0.1/\gamma$. В конусе с таким углом содержится доля полного числа фотонов, равная 0.015. Поэтому для генерации гамма-квантов на накопителе поток фотонов с разбросом 1% равен

$$\frac{dN}{dt} [\text{Гц}] \approx 0.015 \cdot 0.88 \cdot 10^{11} I [\text{А}] P [\text{кВт}] \approx 1.3 \cdot 10^9 I [\text{А}] P [\text{кВт}].$$

3. ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАКОПИТЕЛЯ С ЭНЕРГИЕЙ 2 ГЭВ

Для получения гамма-квантов с энергией в диапазоне 1–200 МэВ из фотона лазерного излучения с энергией 1 эВ требуется энергия электрона не менее 1.4 ГэВ. Большой (до 1 А) средний ток электронного пучка при такой энергии электронов достигается только в электронных накопителях. Поэтому для получения большого потока квазимонохроматических гамма-квантов предлагается использовать электронный накопитель с максимальной энергией 2 ГэВ. Для одновременной работы нескольких пользователей на орбите накопителя должно быть несколько прямолинейных промежутков, где генерируются гамма-кванты.

После рассеяния фотона электрон теряет энергию. При достаточно большом изменении энергии электрона его траектория значительно отклоняется от равновесной орбиты накопителя и электрон теряется. Наибольшее изменение энергии, при котором электрон не теряется, а его энергия возвращается к равновесной, зависит от конструкции накопителя и его высокочастотной системы. На основе данных о работающих электронных накопителях примем для

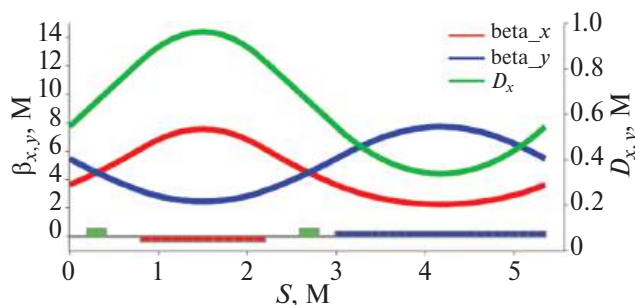


Рис. 1. Оптические функции одной периодической ячейки накопителя.

оценок максимальное допустимое отклонение энергии равным 2%. В качестве ячейки периодичности магнитной структуры была выбрана ячейка из двух поворотных магнитов с градиентом. Оптические функции периодической ячейки, рассчитанной в программе Elegant [12] показаны на рис. 1.

Фокусирующий магнит B_1 с ведущем полем 8 кГс и градиентом $G_{B1} = 0.293$ кГс/см имеет длину 1.4 м и поворачивает пучок на 10° , второй дефокусирующий магнит B_2 с полем 14.8 кГс и градиентом $G_{B1} = -0.165$ кГс/см имеет длину 2.36 м и поворачивает пучок на угол 30° в другую сторону. Таким образом, суммарный угол поворота составляет 20° . Именно такую магнитную структуру на основе реверсивных магнитов с отрицательной кривизной $\rho(s) < 0$ предложили Владимирский и Тарасов. Из определения \pm следует необходимое условие:

$$\alpha = \frac{1}{C} \int \frac{D(s)}{\rho(s)} ds < 0.$$

Здесь C — длина орбиты, s — продольная координата вдоль орбиты, $D(s)$ — горизонтальная дисперсионная функция, $\rho(s)$ — радиус кривизны орбиты пучка. Две секступольные линзы S_y , размещенные по краям магнита B_2 , и одна линза S_x , расположенная внутри магнита B_1 , корректируют линейный хроматизм бетатронных частот.

На рис. 2 показана геометрическая модель накопителя с магнитными элементами. Накопитель состоит из двух полуколец, составленных из восьми периодических ячеек каждое, и двух прямолинейных промежутков. Верхний прямолинейный промежуток содержит три свободных

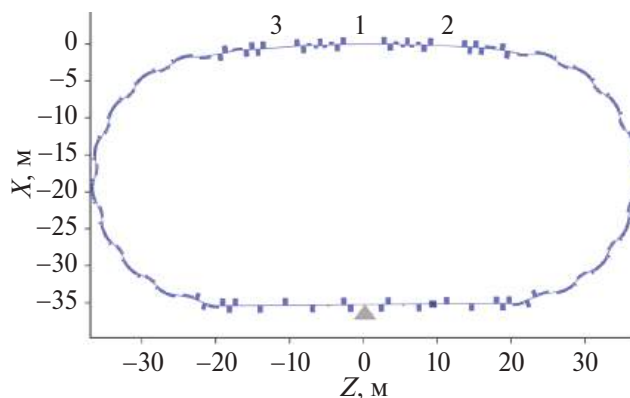


Рис. 2. Модель накопителя с магнитными элементами. Числами показаны места взаимодействия лазера и пучка электронов, серым треугольником показано место инжекции пучка в накопитель.

участка длиной около 5 м с углами отклонения равновесной орбиты 0 и $\pm 3^\circ$. В них расположены три места встречи электронного и лазерных пучков. Рассеянные гамма-кванты выходят вдоль орбиты под углами 0 и $\pm 3^\circ$ в помещение для экспериментов с мишенями и детекторами. Во всех трех промежутках с местами встречи дисперсионная функция обращена в нуль. В нижнем прямолинейном промежутке располагается ВЧ-система и место инжекции пучка в накопитель, обозначенное на рис. 2 серым треугольником.

Основные параметры накопителя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры накопителя

Параметр	Значение
Максимальная энергия электронов, ГэВ	2
Средний ток, А	0.1
Периметр электронного накопителя, м	186
Частота ускоряющего напряжения, МГц	90
Ускоряющее напряжение, МВ	1.5
Кратность ВЧ	56
Горизонтальная бетатронная частота ν_x	8.172
Вертикальная бетатронная частота ν_y	6.134
Горизонтальный натуральный хроматизм ξ_{x0}	-13.7
Вертикальный натуральный хроматизм ξ_{y0}	-10.9
Энергетический акцептанс, %	2
Коэффициент расширения орбит	$-3 \cdot 10^{-3}$
Длина сгустка σ_s , мм	40
Эмиттанс пучка для 2 ГэВ, нм	30

Для оптимизации энергетического акцептанса значения горизонтального и вертикального хроматизма были скорректированы $\xi_{x0} = -13.7 \rightarrow \xi_x = -3.39$, $\xi_{y0} = -10.9 \rightarrow \xi_y = -3.68$. При этом интегральная сила $K_2 I$ секступольных линз S_x составила 6 м^{-2} , а для семейства S_y — 3 м^{-2} . Для указанных значений хроматизма и для бетатронных частот, указанных в таблице, с помощью программы *Elegant* был рассчитан локальный энергетический акцептанс $\delta(s)$. Параметр $\delta(s)$ указывает на то, какое максимальное значение отклонения по энергии частица может приобретать в каждой точке вдоль ускорителя, совершая при этом устойчивое движение. Методика расчета подробно описана в работе [13].

Результат расчета локального энергетического акцептанса показывает, что для всех трех точек взаимодействия электронного пучка

с лазером локальный энергетический акцептанс $\delta(s_i) = \pm 2.5\%$. Стоит отметить, что данный акцептанс обеспечивает режим без потерь для достаточно широкого диапазона энергий гамма-квантов, однако при генерации гамма-квантов с энергиями 100–200 МэВ потери энергии электронами могут достигать 5–10%, в этом случае для компенсации потерь необходимо обеспечить инжекцию электронов со средним током

$$I_{inj} = e \frac{dN}{dt} \approx 1.4 \cdot 10^{-8} P [\text{кВт}] I.$$

Поскольку при инжекции может возрасти фоновое тормозное излучение, то на время инжекции детекторы гамма-квантов на пользовательской станции желательно отключать. Поэтому следует минимизировать частоту инжекции за счет увеличения заряда инжектированного сгустка. Кроме того, возможна инжекция цуга из нескольких сгустков, следующих с частотой ВЧ-накопителя. Например, возможность генерации и инжекции цуга из 55 сгустков с интервалом 5 нс между сгустками была реализована в линейном ускорителе источника СИ СКИФ [14].

Для экономии вертикальной апертуры вакуумной камеры для инжекции пучка в накопитель планируется использовать вертикальный септум-магнит с постоянным магнитным полем и горизонтальный удар инфлектора. Кроме того, приравнивание нулю горизонтальной дисперсионной функции в инжекционном промежутке исключает увеличение размеров пучка и, соответственно, необходимого зазора между пластинами инфлекторов из-за энергетического разброса в сгустке.

Схема инжекции показана на рис. 3а. Инжектируемый пучок приводится септум-магнитом в медианную плоскость накопителя. Накопленный пучок из положения 1 на рис. 3а сдвигается на край апертуры ударом инфлектора (предударом) в положение 2 и подводится к ножу септум-магнита. После удара инфлектора оба пучка смещаются к центру вакуумной камеры накопителя, при этом инжектируемый пучок должен находиться на расстоянии X от подведенного к ножу септума накопленного пучка (см. рис. 3а).

При нулевой дисперсионной функции минимальную величину параметра X можно определить следующим образом:

$$X = 8\sqrt{\beta_x} (\sqrt{\varepsilon_x} + \sqrt{\varepsilon_i}) + x_s,$$

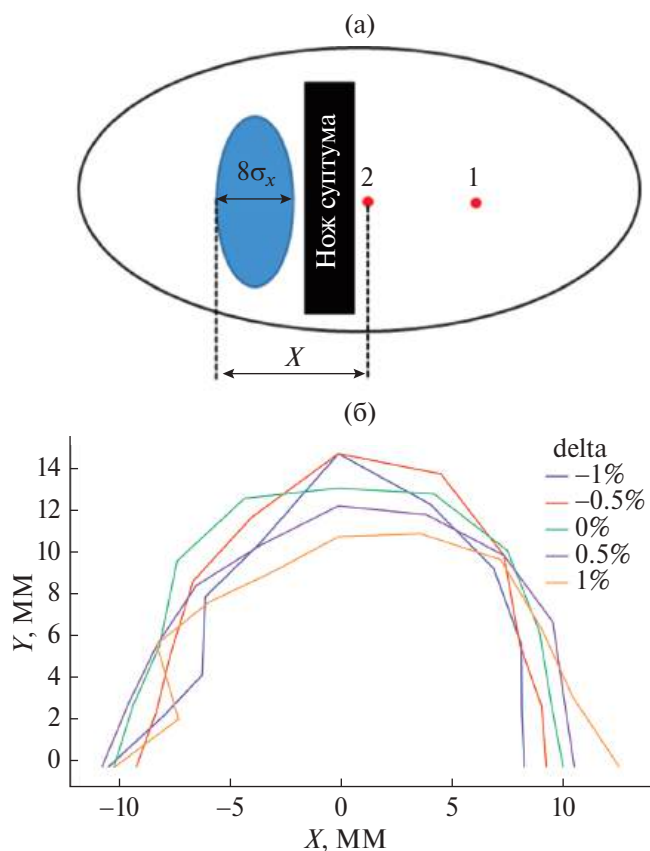


Рис. 3. а – Схема инъекции пучка с предупредом накопленного пучка по горизонтали; б – поперечная динамическая апертура при указанных в табл. 1 бета-тронных частотах и скорректированном хроматизме.

где ϵ_x, ϵ_i – горизонтальные геометрические эмиттансы накопленного и инжектируемого пучка соответственно, x_s – эффективная толщина перегородки септума.

Рассмотрим случай инъекции пучка с энергией 400 МэВ из линейного ускорителя с нормализованным эмиттансом $\epsilon_n = 20$ мкм. Тогда $\epsilon_i = \epsilon_n / \beta\gamma = 25$ нм, следовательно, для горизонтальной бета-функции $\beta_x = 10$ м в точке инъекции имеем $\sigma_i = 0.4$ мм. Далее, принимая $x_s = 4$ мм (такая толщина ножа септума используется на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5), получим величину $X \approx 8$ мм. После переноса обоих пучков к центру вакуумной камеры ударом инфлектора, величина X должна находиться внутри поперечной динамической апертуры для устойчивого движения инжектируемого пучка в накопителе. На рис. 3б показана поперечная динамическая апертура, рассчитанная для всего кольца в программе Elegant. Область внутри кривых показывает, что все частицы пучка с начальными условиями $x_0, x'_0, y_0, y'_0 = 0$ устойчивы в течение 4096 оборотов,

выполненных в моделировании. Очевидно, что поперечная динамическая апертура достаточна для стандартной схемы инъекции с ударом в горизонтальной плоскости.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель электронного накопителя электронов с отрицательным коэффициентом уплотнения орбиты для генерации комптоновских гамма-квантов в широком диапазоне энергий с узким энергетическим спектром. Рассмотрены возможные параметры источника излучения на основе предложенной модели накопителя, сделаны оценки возможного потока гамма-квантов с учетом коллимации, а также эмиттанса и энергетического разброса пучка электронов. Был проведен расчет динамики пучка в накопителе. Умеренная коррекция линейного хроматизма позволила достичь приемлемого энергетического акцептанса, при этом не сильно ограничивая поперечную динамическую апертуру. Помимо использования подобного накопителя для генерации фотонов, создание кольца с отрицательным коэффициентом расширения орбит весьма интересно с точки зрения исследования коллективных эффектов интенсивных пучков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Weller H.R., Ahmed M.W., Gao H., Tornow W., Wu Y.K., Gai M., Miskimen R.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2009. V. 62. P. 257. <https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2008.07.001>
2. *Amano S., Horikawa K., Ishihara K., Miyamoto S., Hayakawa T., Shizuma T., Mochizuki T.* // Nucl. Instr. Meth. 2009. V. 602. P. 337. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.010>
3. *Mikhailov S.F., Popov V., Swift G., Wallace P.W., Wu Y.K., Yan J., Ahmed M.W., Sikora M., Ehlers H., Jensen L.O., Kochannek L.* // Proceedings of IPAC'21, Campinas, SP, Brazil. 2021. V. TUPAB067. P. 1522. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB067>
4. *Howell C.R., Ahmed M.W., Afanasev A. et al.* International Workshop on Next Generation Gamma-Ray Source. 2020. 10.48550/arXiv.2012.10843

5. *Wu Y.K.* // Proceedings of IPAC2021. Campinas, SP, Brazil. 2021. V. TUPAB107. P. 1636.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB107>
6. *Wu Y.K.* // Proceedings of IPAC2013. Shanghai, China. 2013. V. MOPEA077. P. 264.
<https://scholars.duke.edu/publication/1003336>
7. *Владимирский В.В., Тарасов Е.К.* Некоторые вопросы теории циклических ускорителей. Москва: Изд. АН СССР, 1955.
8. *Senichev Y.V., Chechenin A.N.* // ЖЭТФ. 2007. V. 105. P. 988.
<http://doi.org/10.1134/S1063776107110118>
9. *Schreiber P., Brosi M., Härer B., Mochihashi A., Müller A.-S., Papash A.I., Ruprecht R., Schuh M.* // Proceedings of IPAC'22, Bangkok, Thailand. 2022. P. 2570.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2022-THROPT006>
10. *Villa F., Luccio A., Zolotorev M.* // *Microsyst. Technol.* 1996. V. 2. P. 79.
<https://doi.org/10.1007/BF02739535>
11. *Telnov V.* // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 2000. V. 455. № 1. P. 80.
<https://doi.org/10.1016/S0168-9002%2800%2900696-3>
12. *Borland M.* // Argonne National Lab. IL (US). 2000. № LS-287.
<http://doi.org/10.2172/761286>
13. *Belgroune M., Brunelle P., Nadjji A., Nadolski L.* // Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. Portland, OR, USA. 2003. V. 2. P. 896.
<https://doi.org/10.1109/PAC.2003.1289525>
14. *Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenov D., Levichev A., Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I., Samoylov S., Volkov V.* // *JNST.* 2022. V. 17. №. 2. P. T02009.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/T02009>

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕГО RFQ-РЕЗОНАТОРА¹

© 2025 г. А. Л. Ситников^{а,*}, Д. Н. Селезнев^а, Г. Н. Кропачев^а, А. И. Семенников^а,
Т. В. Кулевой^а, Л. Е. Поляков^б, А. В. Тельнов^б

^а *Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25*

^б *Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607188, Нижегородская обл., Саров, пр. Мира, 37*

* e-mail: aleksey.sitnikov@itep.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

В ККТЭФ НИЦ “Курчатовский институт” ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 8$, энергией 4 МэВ/н и током 10 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, работающего на частоте 40 МГц, и двух ускоряющих структур с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂, работающих соответственно на частотах 80 и 160 МГц. Предполагается, что электроды ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой будут со смещенными окнами магнитной связи. Общая длина ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой будет составлять около 11 м.

DOI: 10.7868/S3034564225080073

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ – radio frequency quadrupole) широко используется в качестве начальной части ионного линейного ускорителя [1, 2]. В данной работе представлен выбор ускорителя-резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и его электродинамические характеристики (ЭДХ).

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ RFQ-РЕЗОНАТОРА

В качестве начальной части линейного ускорителя для проекта САРОВ предлагается использовать ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой со смещенными окнами связи. Окна связи, с одной стороны, необходимы для разделения рабочей (квадрупольной) моды электромагнитных (ЭМ)

колебаний, а с другой – они позволяют уменьшить поперечные габариты резонатора. Окна связи должны быть смещены между горизонтальной и вертикальной линией электродов, что позволяет уменьшить неравномерность ЭМ-поля вдоль электродов [3].

При выборе основных геометрических размеров RFQ-резонатора учитывались следующие условия:

1. Согласно расчету динамики пучка [4], RFQ-резонатор должен работать на резонансной частоте $f_0 = 40.625$ МГц.

2. RFQ-резонатор должен состоять из нечетного числа секций.

3. Длина каждой секции RFQ-резонатора не должна превышать примерно 1300 мм.

4. Диаметр RFQ-резонатора должен быть не больше примерно 1200 мм.

Если первый пункт обусловлен только требованиями к динамике пучка в ускорителе, то

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

пункты 2–4 нуждаются в пояснении. Разделение всего RFQ-резонатора на нечетное количество идентичных секций (при учете смещенных окон связи) упрощает процесс изготовления резонатора. Для удобства монтажа и юстировки электродов длина каждой секции RFQ-резонатора должна позволять достать от торца секции до центра рукой. Поперечные габариты RFQ-резонатора должны быть минимальны без потери конструкционной прочности резонатора. На основании представленных рассуждений были промоделированы две конструкции RFQ-резонатора (рис. 1).

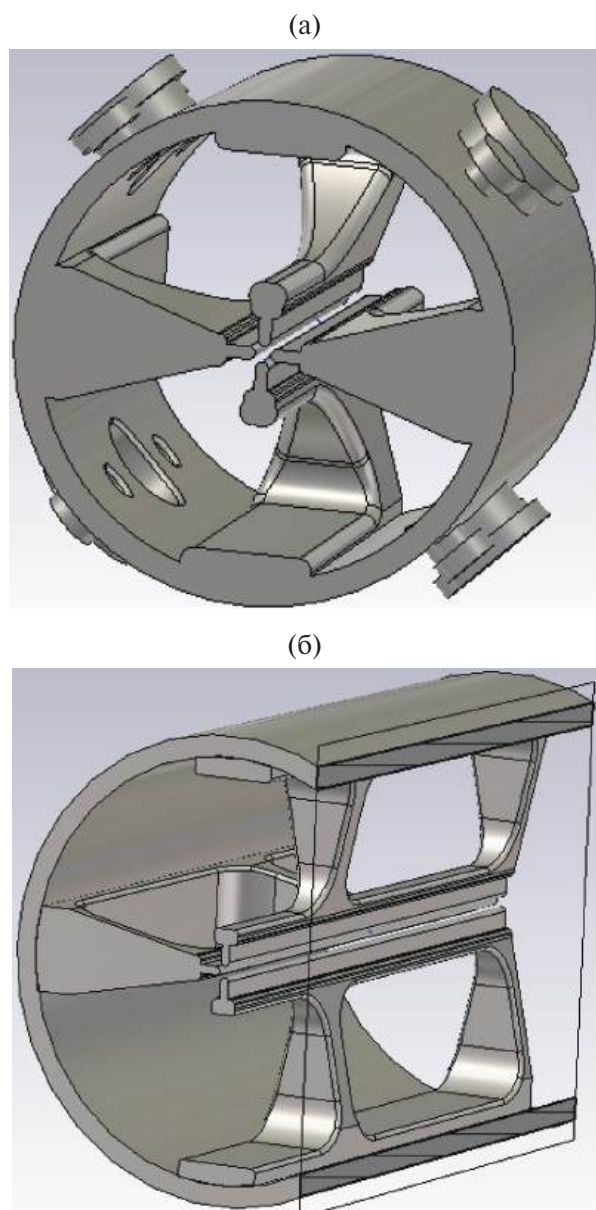


Рис. 1. Конструкции RFQ резонатора: а – короткая секция, б – длинная секция.

При моделировании ЭДХ каждой конструкции RFQ-резонатора использовались данные, заданные расчетом динамики пучка (табл. 1). Моделирование ЭДХ проводилось для немодулированных электродов, поскольку электрическая емкость между ними соответствует средней емкости канала с электродами с нанесенной модуляцией. Размеры окон связи для каждой конструкции оптимизировались так, чтобы с одной стороны максимально сократить диаметр резонатора, а с другой, чтобы электрод обладал достаточной жесткостью. ЭДХ характеристики RFQ-резонаторов разной конструкции представлены в табл. 2.

Таблица 1. Начальные данные для моделирования ЭДХ RFQ-резонатора

Параметр	Величина
Резонансная частота, МГц	40.625
Напряжение между электродами, кВ	170
Средний радиус апертуры, мм	12.5
Радиус вершины электродов, мм	10
Длина RFQ резонатора, мм	10998

Таблица 2. ЭДХ RFQ-резонатора различной конструкции

Параметр	Величина	
	Короткая секция	Длинная секция
Собственная добротность	14 000	13 000
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт/м	44	46
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	484	506

Как следует из табл. 2, ЭДХ RFQ-резонаторов существенно не отличаются друг от друга, в то время как размеры секций имеют явные различия (табл. 3). Важно отметить, что в RFQ-резонаторе с длинной секцией на одном электроде можно разместить одно целое окно и одно полу-окно связи, тем самым уменьшив консольность электрода. Как следует из данных, представленных в табл. 3, RFQ-резонатор может состоять либо из 9 длинных секций, либо из 11 коротких. В случае использования коротких секций длина RFQ-резонатора увеличится на 2 мм, что не повлияет на динамику пучка.

Таблица 3. Основные геометрические размеры секций RFQ-резонатора различной конструкции

Параметр, мм	Величина	
	Короткая секция	Длинная секция
Длина секции	1000	1222
Внутренний диаметр секции	850	1025
Длина окон связи	770	760
Высота окон связи	290	350
Ширина основных элементов	250	200

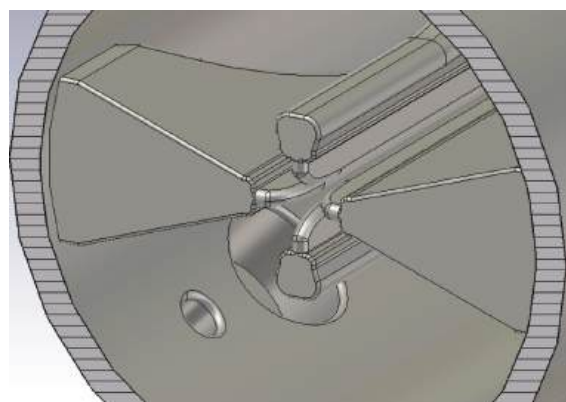


Рис. 2. Раструб на электродах RFQ-резонатора первой секции.

3. ВЛИЯНИЕ ТОРЦЕВЫХ ЗАЗОРОВ НА ЭДХ RFQ-РЕЗОНАТОРА

Одной из главных причин неравномерности ЭМ-поля вдоль резонатора является расстояние между электродами и торцевыми фланцами первой и последней секций. Поле в данных зазорах имеет продольную составляющую. Для того чтобы убрать ускоряющее воздействие ЭМ-поля в данном зазоре, его длину выбирают равной или близкой к целому числу периодов ускорения $\beta\lambda$. Вторым фактором, влияющим на неравномерность поля, является раструб на электродах в первой секции резонатора (рис. 2). Раструб необходим для начального формирования сгустков пучка. Его форма задается из динамики пучка. Моделирование неравномерности

распределения электрического поля проводилось на полной модели резонатора с короткими секциями.

Пример распределения электрического поля вдоль продольной оси резонатора при одинаковых размерах окон связи представлен на рис. 3.

Неравномерность поля составляет $\delta E = 5\%$. Чтобы уменьшить данную неравномерность поля, размеры окон связи в первой и/или последней секциях необходимо изменить. В частности, при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм, неравномерность распределения электрического поля вдоль продольной оси составляет $\delta E = 1\%$ и не превышает вари-

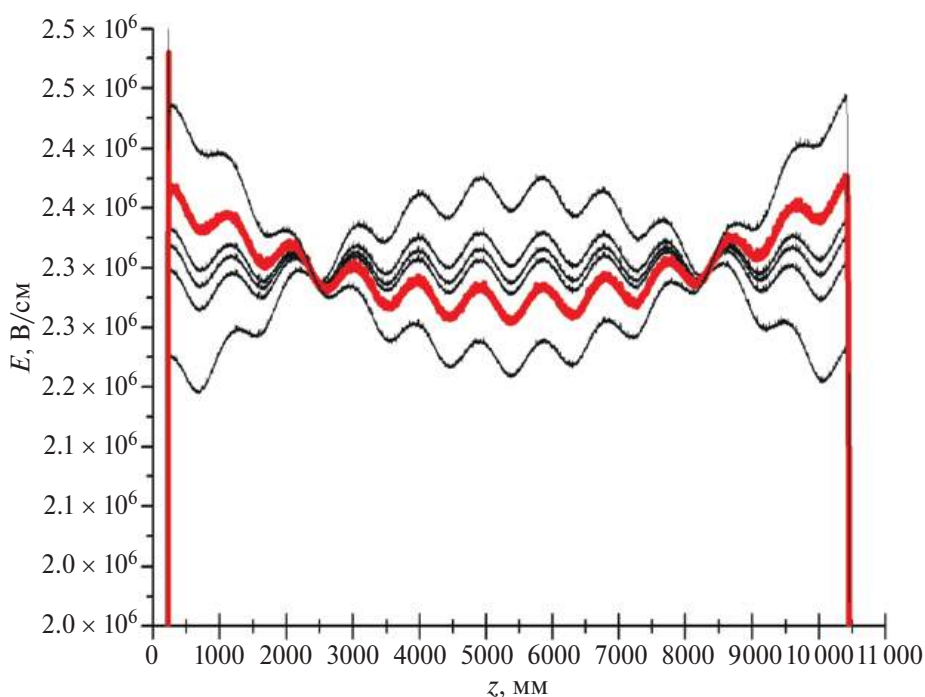


Рис. 3. Неравномерность электрического поля вдоль продольной оси RFQ-резонатора.

цию амплитуды поля вдоль структуры, вызванную окнами связи.

Распределение электрического поля вдоль продольной оси резонатора при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм представлено на рис. 4.

4. ТЕПЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ RFQ-РЕЗОНАТОРА

Было проведено моделирования нагрева и его влияния на геометрические размеры RFQ-резонатора с короткими секциями с учетом силы тяжести. Моделирование проводилось при начальных условиях, представленных в табл. 4. Моделирование тепловых деформаций RFQ-резонатора проводилось для резонатора, выполненного из нержавеющей стали. Внутренняя часть резонатора покрыта слоем меди толщиной 40 мкм. Коэффициенты излучения различных элементов RFQ-резонатора представлены в табл. 5. При импульсной ВЧ-мощности $P_0 = 450$ кВт средняя ВЧ-мощность составляет $P_{cp} = 135$ Вт. Следовательно, средняя ВЧ-мощность, выделяемая в одной секции RFQ-резонатора, составляет $P_{cp1} = 12$ Вт.

В результате моделирования нагрева резонатора от средней ВЧ-мощности определено место

Таблица 4. Начальные данные для моделирования тепломеханических деформаций

Параметр	Значение
Длительность ВЧ-импульса, мкс	300
Частота повторения ВЧ-импульсов, Гц	1
Скважность	3333
Температура окружающей среды, °С	20
Конвективный теплообмен с внешней средой, Вт/(м·К)	10

Таблица 5. Коэффициенты излучения различных элементов резонатора

Параметр	Материал	Значение
Внешняя поверхность резонатора	Полированная нержавеющая сталь	0.3
Внутренняя поверхность резонатора	Матовая медь	0.22

в резонаторе с наибольшей температурой. Это вершина электродов в середине окна связи. Температура в данной области составляет 21 °С.

Результаты расчета механических деформаций RFQ-резонатора с нагревом и без нагрева представлены в табл. 6.

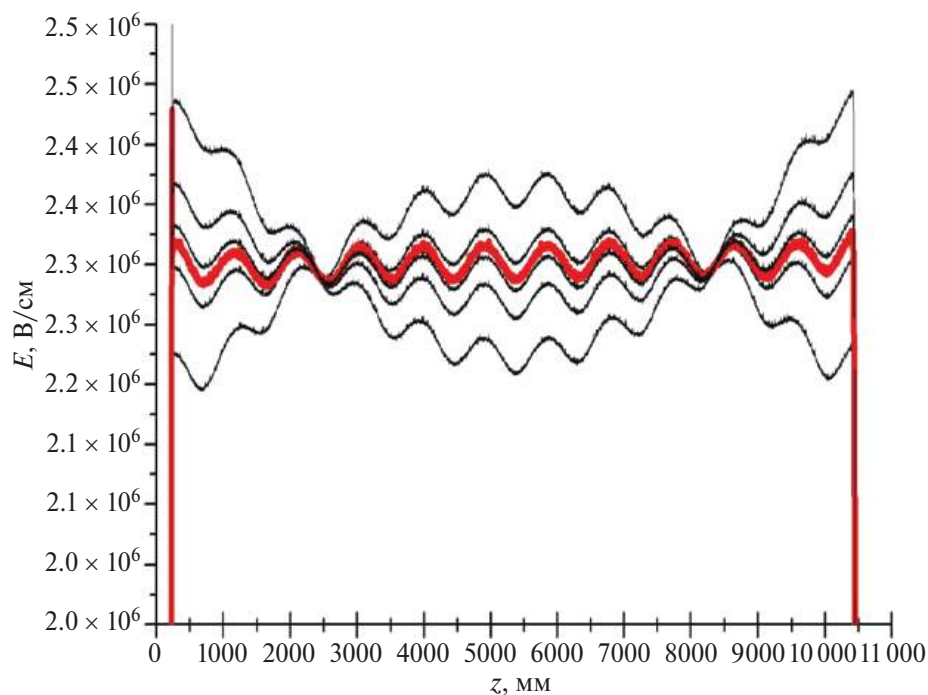


Рис. 4. Неравномерность электрического поля вдоль продольной оси RFQ-резонатора при длине окон связи в первой и последней секциях равной 763 мм.

Таблица 6. Механические деформации RFQ-резонатора

Ось, мкм	Без нагрева	С нагревом
$ \Delta x $	3	5.5
$ \Delta y $	20	25
$ \Delta z $	2	10

Из данных, представленных в табл. 5, можно сделать вывод, что основной вклад в деформацию резонатора вносит не нагрев, а его собственный вес. Этот факт необходимо учитывать при разработке как конструкции резонатора, так и системы юстировки электродов.

Механические деформации изменяют геометрические размеры/расположение частей резонатора, что в свою очередь приведет к изменению его ЭДХ. Моделирование ЭДХ резонатора с учетом тепловых деформаций показало, что резонансная частота меняется на $|\Delta f| = 0.6$ кГц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен выбор и оптимизация параметров секций RFQ-резонатора. Проведено моделирование ЭДХ секций RFQ-резонатора двух различных конструкций. Исследовано влияние торцевых зазоров в первой и послед-

ней секциях RFQ-резонатора на распределение ЭМ-поля. Определены параметры окон связи, при которых неравномерность ЭМ-поля вдоль всей структуры RFQ-резонатора составляет не более $\delta E = 1\%$. Проведено моделирование тепловых деформаций структуры. Основной вклад в деформацию структуры вносит собственный вес электродов. Изменение резонансной частоты структуры в результате деформации составляет не более $|\Delta f| = 0.6$ кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тепляков В.А., Мальцев А.П., Степанов В.Б.* Высоочастотная квадрупольная фокусировка (К истории ее возникновения и развития). Препринт ГНЦ РФ. Протвино: Институт физики высоких энергий, 2006.
2. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. V. 13. № 6. P. 1126. <http://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
3. *Andreev V.A., Parisi G.* // Proceedings of EPAC'94. London. 1994. P. 1300.
4. *Кропачев Г.Н., Кулевой Т.В., Ситников А.Л., Скачков В.С., Хабибуллина Е.Р., Сметанин М.Л., Тельнов А.В., Завьялов Н.В.* // Сибирский физический журнал. 2024. (принята к печати).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕГО ДВУХЗАБОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА¹

© 2025 г. А. Л. Ситников^{а,*}, Д. Н. Селезнев^а, Г. Н. Кропачев^а, А. И. Семенников^а,
Т. В. Кулевой^а, А. М. Опекунов^б, М. Л. Сметанин^б

^а Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

^б Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607188, Нижегородская обл., Саров, пр. Мира, 37

* e-mail: aleksey.sitnikov@itep.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

В ККТЭФ НИЦ “Курчатовский институт” ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 8$, энергией 4 МэВ/н и током 10 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ), работающего на частоте 40 МГц, и двух ускоряющих структур с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂, работающих соответственно на частотах 80 и 160 МГц. Предполагается, что ускоряющая структура DTL₁ будет состоять из 12 двухзаборных четвертьволновых резонаторов.

DOI: 10.7868/S3034564225080088

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективной является схема, когда ускоритель состоит из двух секций: RFQ и DTL, между которыми осуществляется шестимерное согласование пучка [1]. Секция DTL построена по модульному принципу и состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных Н-резонаторов, с фокусировкой магнитными квадрупольными, размещаемыми между ними. Такое построение DTL обеспечивает компактность ускорителя, допускает посекционную настройку и последовательный ввод в действие.

В данной работе представлен выбор ускоряющего двухзаборного резонатора с трубками дрейфа и представлены его электродинамические характеристики (ЭДХ).

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА DTL₁

Типичный вид четвертьволнового резонатора представлен на рис. 1. Форма корпуса резонатора DTL₁ была оптимизирована с точки зрения наи-

большей собственной добротности, ВЧ-мощности собственных потерь и напряженности электрического поля на поверхности трубок дрейфа (табл. 1). Однако такая форма не позволяет разместить два резонатора ближе друг к другу, чем $|\Delta z| = 278$ мм. С учетом динамики пучка в ускорительном канале [2] расстояние между четвертьволновыми резонаторами должно быть не больше чем 200 мм.

Таблица 1. ЭДХ четвертьволнового резонатора

Параметр	Значение
Длина зазора, мм	31
Напряженность электрического поля на оси резонатора в центре зазора, кВ/см	80
Собственная добротность	12 000
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	54

В связи с этим было принято решение уменьшить диаметр основания корпуса резонатора (рис. 2). Это позволит разместить резонаторы максимально близко друг другу в положении,

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

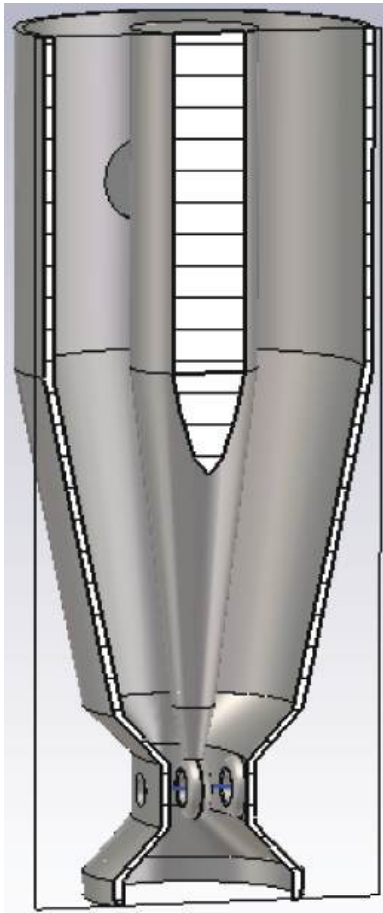


Рис. 1. Типичный вид двухзазорного четвертьволнового резонатора.

когда трубки дрейфа во всех резонаторах будут “висеть”. ЭДХ четвертьволнового резонатора представлены в табл. 2. Как следует из приведенных данных, собственная добротность и ВЧ-мощность собственных потерь резонатора, представленного на рис. 2, несколько хуже аналогичных параметров резонатора, представленного на рис. 1 (см. табл. 1). Это объясняется меньшим диаметром основания корпуса резонатора, а следовательно, и большей плотностью поверхностных токов.

Таблица 2. ЭДХ четвертьволнового резонатора конструкции

Параметр	Значение
Длина зазора, мм	34
Напряженность электрического поля на оси резонатора в центре зазора, кВ/см	80
Собственная добротность	9600
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	60

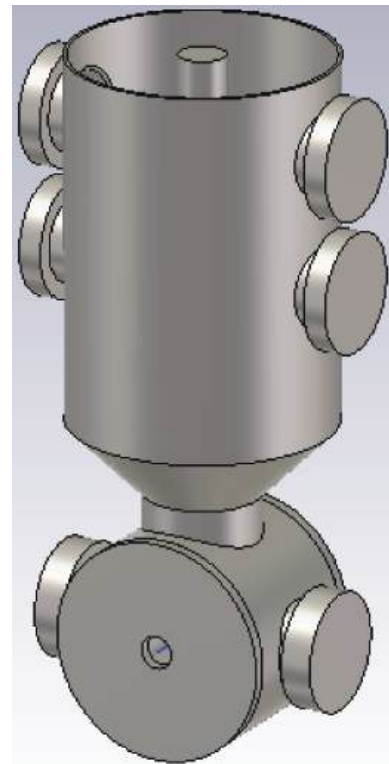


Рис. 2. Конструкция четвертьволнового резонатора с уменьшенным диаметром основания корпуса.

3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ РЕЗОНАТОРОВ DTL₁

Было проведено моделирование нагрева и его влияния на геометрические размеры резонаторов DTL₁. Моделирование проводилось при начальных условиях, представленных в табл. 3. Моделирование термомеханических деформаций резонаторов DTL₁ проводилось для резонаторов, выполненных из нержавеющей стали. Внутренняя часть резонатора покрыта слоем меди толщиной 40 мкм, шток и трубка дрейфа из

Таблица 3. Начальные данные для моделирования термомеханических деформаций

Параметр	Значение
Длительность ВЧ-импульса, мкс	300
Частота повторения ВЧ-импульсов, Гц	1
Скважность	3333
Температура окружающей среды, °С	20
Конвективный теплообмен с внешней средой, Вт/(м·К)	10

полированной меди марки М06. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL_1 представлены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL_1

Параметр	Материал	Значение
Внешняя поверхность резонатора	Полированная нержавеющая сталь	0.3
Внутренняя поверхность резонатора	Матовая медь	0.22
Шток и трубка дрейфа	Полированная медь	0.07

Был промоделирован первый и последний резонатор группы DTL_1 . Значения импульсной и средней ВЧ-мощности резонаторов DTL_1 при разной длине ускоряющих зазоров g представлены в табл. 5.

Таблица 5. Импульсная и средняя ВЧ-мощность резонаторов DTL_1

Параметр	$g = 34$ мм	$g = 48$ мм
Напряженность на оси в центре ускоряющего зазора E_0 , кВ/см	80	80
Импульсная ВЧ-мощность P_0 , кВт	60	90
Средняя ВЧ-мощность P_{cp} , Вт	18	27

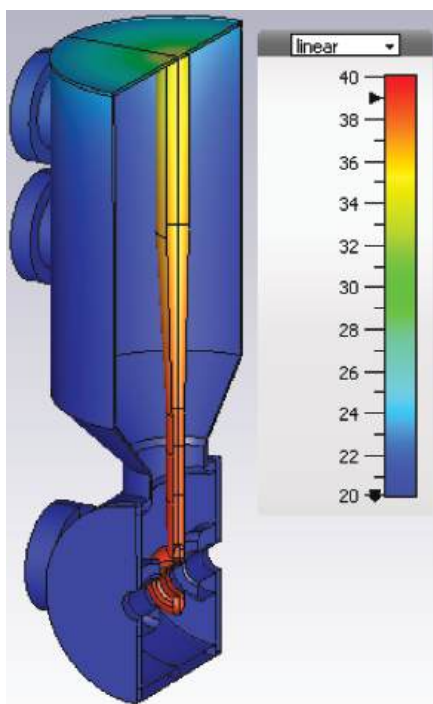


Рис. 3. Нагрев резонаторов DTL_1 с $g = 34$ мм.

Результаты расчета нагрева резонатора DTL_1 с $g = 34$ мм представлены на рис. 3. Как видно на рис. 3, самое горячее место в резонаторе – это трубка дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 39°C и 47°C для первого и последнего резонаторов соответственно.

Термомеханические деформации резонатора DTL_1 с длиной ускоряющего зазора $g = 34$ мм показаны на рис. 4. Деформации резонатора с $g = 48$ мм имеют аналогичный вид. Данные по деформации резонаторов DTL_1 сведены в табл. 6, также там представлены данные по деформации резонатора DTL_1 с $g = 34$ мм без нагрева.

Таблица 6. Термомеханическая деформация резонаторов DTL_1

Ось, мм	$g = 34$ мм (без нагрева)	$g = 34$ мм	$g = 48$ мм
Δx	0.001	0.016	0.023
Δy	0.027	0.241	0.342
Δz	0.001	0.014	0.021

Как следует из табл. 6 деформация по оси y составляет 0.241 мм. Такое смещение трубки дрейфа неприемлемо, потому что оно больше требуемого допуска на юстировку резонатора и его нельзя компенсировать во время работы резонатора.

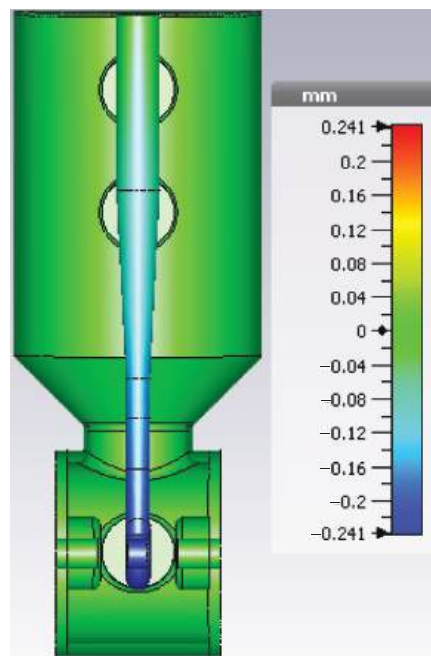


Рис. 4. Термомеханические деформации резонатора DTL_1 по оси y с $g = 34$ мм.

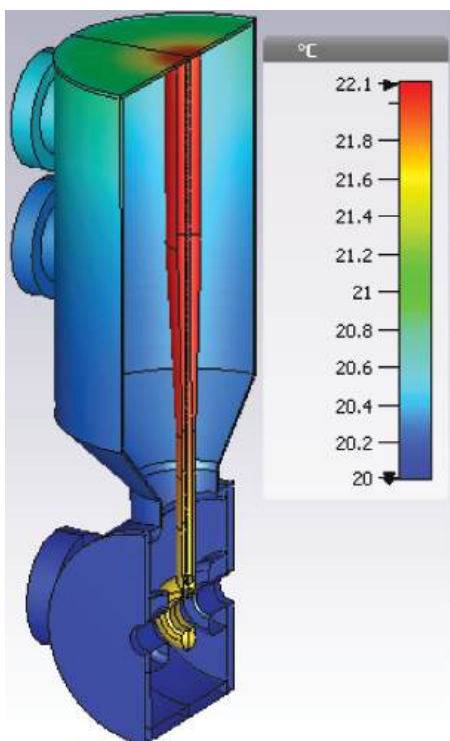


Рис. 5. Нагрев резонатора DTL₁ с $g = 34$ мм с каналом охлаждения штока трубки дрейфа.

Для того чтобы охладить резонатор DTL₁, в частности шток и трубку дрейфа, необходимо предусмотреть канал охлаждения в штоке резонатора. В штоках трубки дрейфа резонаторов DTL₁ с $g = 34$ мм и $g = 48$ мм был сделан канал охлаждения с $\varnothing 10$ мм и длиной 700 мм. Коэффициент принудительной водяной конвекции был взят минимальный и равный $\alpha = 300$ Вт/(м \cdot К). Результаты расчета нагрева резонатора DTL₁ с $g = 34$ мм с каналом водяного охлаждения штока трубки дрейфа представлены на рис. 5. Как видно, самое горячее место в резонаторе сместилось с трубки дрейфа на основание штока трубки дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 21.6°C и 22.4°C для первого и последнего резонаторов соответственно. А температура основания штока трубки дрейфа – 22.1°C и 23.1°C соответственно.

Термомеханические деформации резонаторов DTL₁ с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа представлены в табл. 7.

Таблица 7. Термомеханическая деформация резонаторов DTL₁ с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа

Ось, мм	$g = 34$ мм	$g = 48$ мм
Δx	0.0025	0.0036
Δy	0.0481	0.0600
Δz	0.0025	0.0037

Из табл. 7 следует, что термомеханические деформации укладываются в допуск на юстировку резонатора. Однако данные деформации, возникающие в процессе работы, будут изменять ЭДХ резонаторов, в частности их резонансные частоты. Было проведено моделирование с целью оценки влияния термомеханических деформаций на изменение резонансной частоты резонаторов DTL₁. Так, резонансная частота изменяется на $\Delta f = 4$ кГц и на $\Delta f = 5$ кГц для резонаторов DTL₁ с $g = 34$ мм и $g = 48$ мм соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен выбор формы резонаторов DTL₁, которая, с одной стороны, обеспечивает необходимые ЭДХ резонаторов, а с другой – позволяет разместить между резонаторами квадрупольные магнитные линзы. В работе также обоснована необходимость обеспечить охлаждение штоков трубок дрейфа резонаторов группы DTL₁. Охлаждение необходимо, чтобы минимизировать термомеханические деформации. Изменение резонансной частоты резонаторов группы DTL₁, вызванное термомеханическими деформациями, может быть компенсировано подстроечными плунжерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. V. 13. № 6. P. 1126. <http://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
2. Крочачев Г.Н., Кулевой Т.В., Ситников А.Л., Скачков В.С., Хабибуллина Е.Р., Сметанин М.Л., Тельнов А.В., Завьялов Н.В. // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19(3). С. 5. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16>

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕГО ПЯТИАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА¹

© 2025 г. А. Л. Ситников^{а,*}, Д. Н. Селезнев^а, Г. Н. Кропачев^а, А. И. Семенников^а,
Т. В. Кулевой^а, А. М. Опекунов^б, М. Л. Сметанин^б

^а Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

^б Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607188, Нижегородская обл., Саров, пр. Мира, 37

* e-mail: aleksey.sitnikov@itep.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

В ККТЭФ НИЦ “Курчатовский институт” ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 8$, энергией 4 МэВ/н и током 10 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ), работающего на частоте 40 МГц, и двух ускоряющих структур с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂, работающих соответственно на частотах 80 и 160 МГц. Предполагается, что ускоряющая структура DTL₂ будет состоять из 28 пятиазорных ИН-резонаторов.

DOI: 10.7868/S3034564225080099

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективной является схема, когда ускоритель состоит из двух секций: RFQ и DTL, между которыми осуществляется шестимерное согласование пучка [1]. Секция DTL построена по модульному принципу и состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных Н-резонаторов, с фокусировкой магнитными квадрупольными, размещаемыми между ними. Такое построение DTL обеспечивает компактность ускорителя, допускает посекционную настройку и последовательный ввод в действие.

В данной работе представлен выбор ускоряющего пятиазорного резонатора с трубками дрейфа и представлены его электродинамические характеристики (ЭДХ).

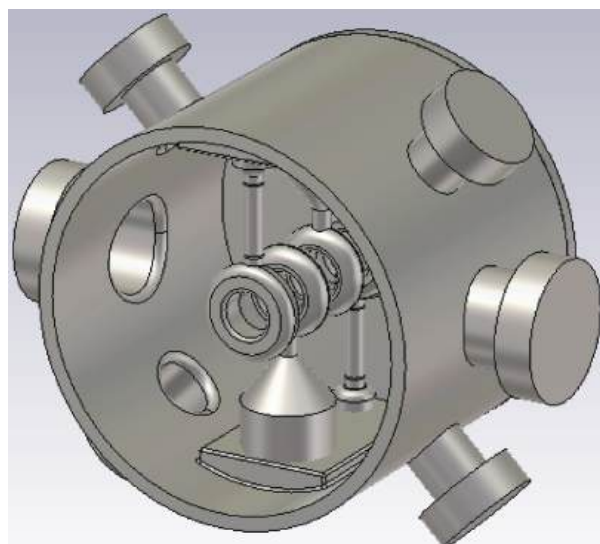


Рис. 1. Общий вид ИН резонатора DTL₂.

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

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА DTL₂

В качестве третьей ускоряющей структуры было предложено использовать пятиззорный ИН-резонатор. Типичный вид ИН-резонатора представлен на рис. 1. Согласно расчету динамики пучка [2], амплитуда ускоряющего поля в центральных зазорах должна быть равна между собой, амплитуда поля в крайних зазорах должна составлять половину от амплитуды центральных

(рис. 2). Чтобы обеспечить подобное распределение поля, диаметры опор трубок дрейфа были выбраны разными (рис. 1).

Важно отметить, что длина ускоряющих зазоров и амплитуда ускоряющего электрического поля увеличивается от резонатора к резонатору. Зависимость ВЧ-мощности от длины ускоряющего зазора представлена на рис. 3. Как видно, рост требуемой ВЧ-мощности пропорционален темпу ускорения.

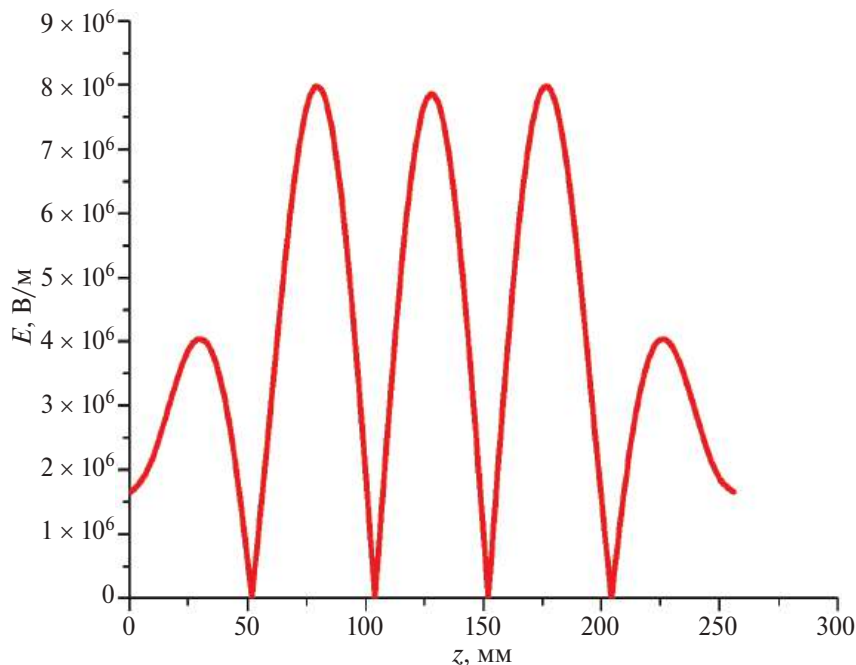


Рис. 2. Требуемое распределение электрического поля на оси ИН-резонатора.

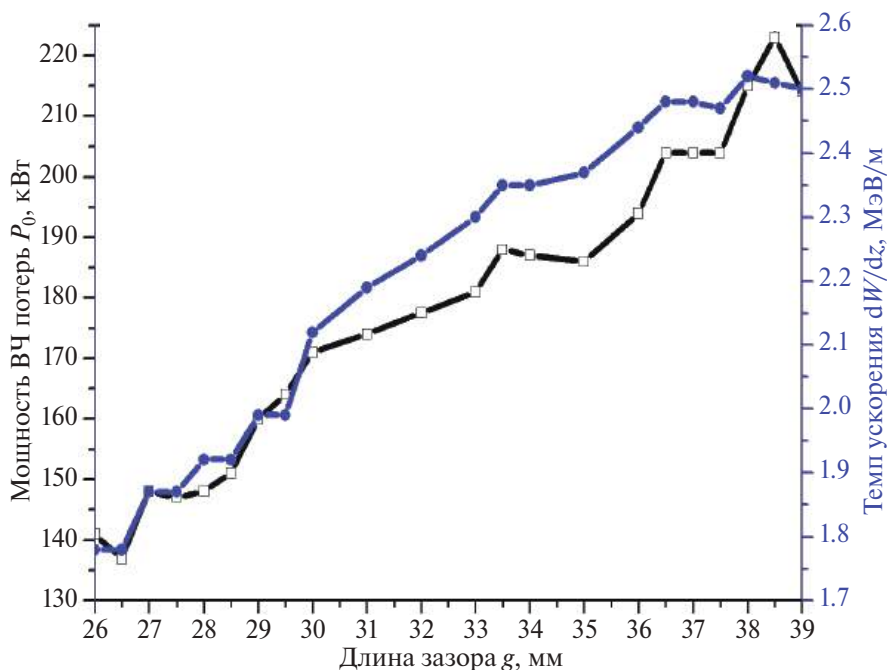


Рис. 3. График зависимости мощности ВЧ-потерь и темпа ускорения от длины ускоряющих зазоров.

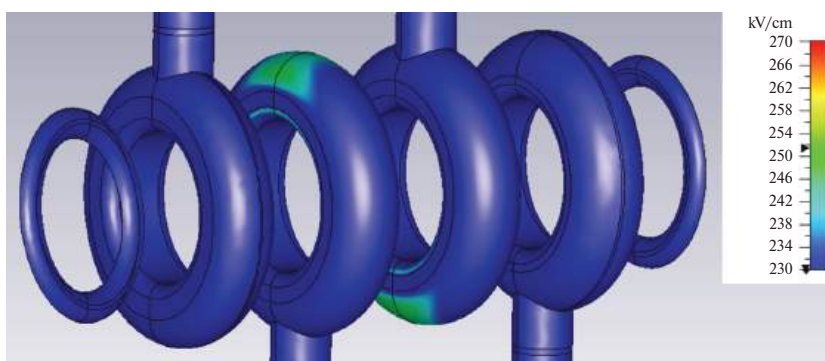


Рис. 4. Напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа при запасенной энергии 1 Дж.

Максимальная напряженность электрического поля наблюдается на поверхности трубок дрейфа (рис. 4), пропорциональна амплитуде поля в центре зазора и обратно пропорциональна площади поверхности трубок дрейфа. Чтобы напряженность поля на поверхности не превышала $1.8 Kp$ (в единицах Килпатрика), необходимо либо снижать амплитуду поля, либо увеличивать поверхность трубок дрейфа. Закон изменения амплитуды поля задается динамикой пучка и, как было сказано выше, растет от резонатора к резонатору. Таким образом, чтобы напряженность поля не превышала предельного значения, поверхность трубок дрейфа должна постоянно увеличиваться.

Наиболее очевидным способом увеличения поверхности трубок дрейфа является увеличение их диаметров. Это, в свою очередь, приводит к изменению резонансной частоты резонаторов DTL_2 . Для компенсации изменения резонансной частоты можно, например, изменять диаметр резонатора. Такой подход не оптимален с точки зрения изготовления резонаторов, поскольку каждый резонатор DTL_2 будет иметь свой уникальный диаметр. Второй подход заключается в варьировании других геометрических размеров с целью подстройки частоты. Например, это может быть варьирование диаметров опор трубок дрейфа (рис. 5).

Недостатком подхода по компенсации изменения резонансной частоты за счет изменения диаметров опор трубок дрейфа при одинаковом диаметре резонатора является то, что ЭДХ резонаторов DTL_2 получаются не оптимальными. В частности, требуемая ВЧ-мощность при вариации диаметра резонаторов для запитки всех резонаторов составляет $P_0 = 3.9$ МВт, а при постоянном диаметре и вариации диаметров опор трубок дрейфа $P_0 = 4.1$ МВт.

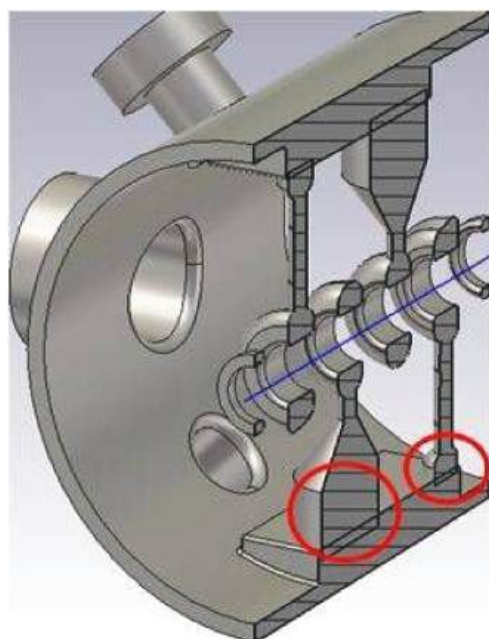


Рис. 5. Резонатор DTL_2 (указаны места варьирования диаметров опор трубок дрейфа).

3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕЗОНАТОРА DTL_2

Было проведено моделирование нагрева и его влияния на геометрические размеры резонаторов DTL_2 . Моделирование проводилось при начальных условиях, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Начальные данные для моделирования термомеханических деформаций

Параметр	Значение
Длительность ВЧ-импульса, мкс	300
Частота повторения ВЧ-импульсов, Гц	1
Скважность	3333
Температура окружающей среды, °С	20
Конвективный теплообмен с внешней средой, Вт/(м·К)	10

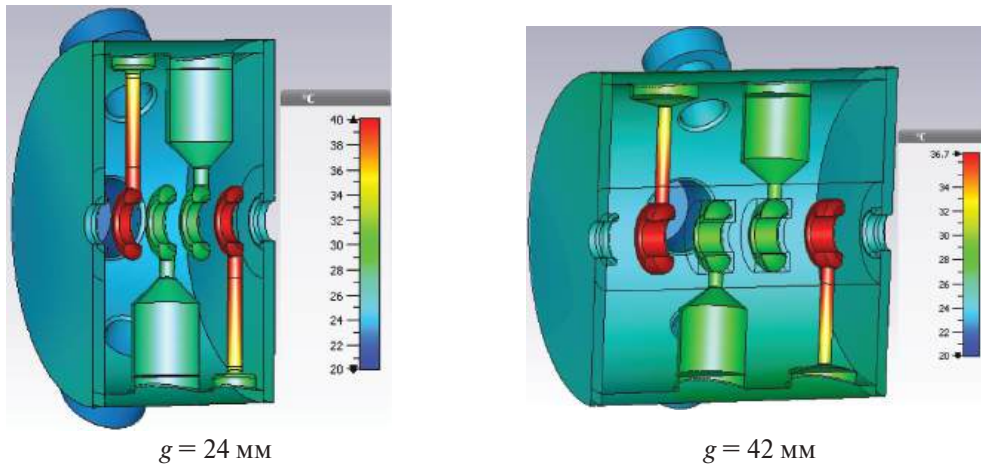


Рис. 6. Нагрева резонаторов DTL₂.

Моделирование термомеханических деформаций резонаторов DTL₂ проводилось для резонаторов, выполненных из нержавеющей стали. Внутренняя часть резонатора покрыта слоем меди толщиной 40 мкм, штоки трубок дрейфа и трубки дрейфа выполнены из полированной меди марки М06. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL₂ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL₂

Параметр	Материал	Значение
Внешняя поверхность резонатора	Полированная нержавеющая сталь	0.3
Внутренняя поверхность резонатора	Матовая медь	0.22
Штоки трубок дрейфа и трубки дрейфа	Полированная медь	0.07

Поскольку импульсная ВЧ-мощность резонаторов DTL₂ растет с ростом энергии пучка, было промоделировано два резонатора DTL₂ – первый и последний по пучку. Значения импульсной и средней ВЧ-мощности резонаторов DTL₂ при разной длине ускоряющих зазоров g представлены в табл. 3.

Результаты расчета нагрева резонаторов DTL₂ представлены на рис. 6. Как видно, самое горячее место в резонаторах – это трубка дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 40 °С и 37 °С для первого и последнего резонаторов соответственно.

Термомеханические деформации резонатора DTL₂ с длиной ускоряющего зазора $g = 24$ мм показаны на рис. 7. Деформации резонатора

Таблица 3. Импульсная и средняя ВЧ-мощность резонаторов DTL₂

Параметры	$g = 24$ мм	$g = 42$ мм
Напряженность на оси в центре ускоряющего зазора E_0 , кВ/см	77	107
Импульсная ВЧ-мощность P_0 , кВт	150	200
Средняя ВЧ-мощность P_{cp} , Вт	45	60

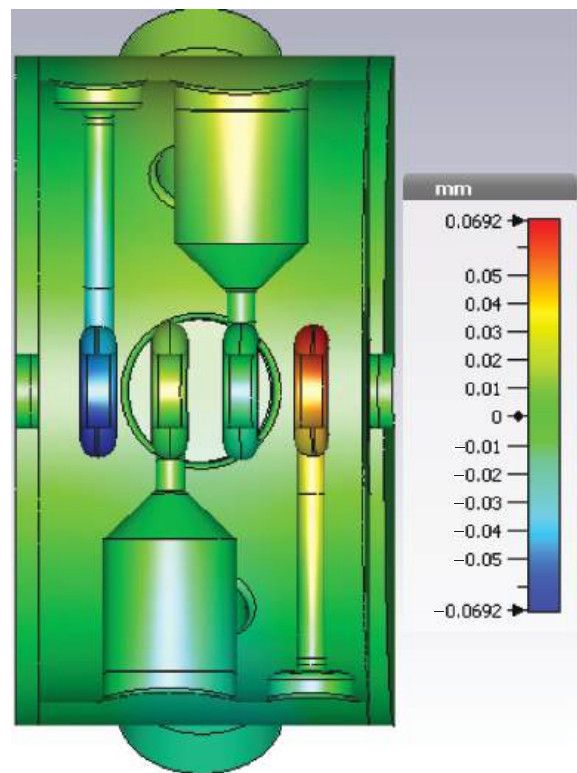


Рис. 7. Термомеханические деформации резонатора DTL₂ по оси y с $g = 24$ мм.

с $g = 42$ мм имеют аналогичный вид. Данные по деформации резонаторов DTL₂ сведены в табл. 4, также там представлены данные по деформации резонатора DTL₂ с $g = 24$ мм без нагрева.

Таблица 4. Термомеханическая деформация резонаторов DTL₂

Оси, мм	$g = 24$ мм (без нагрева)	$g = 24$ мм	$g = 42$ мм
Δx	0.0004	0.0243	0.0225
Δy	0.0005	0.0692	0.0520
Δz	0.0004	0.0984	0.0662

Как следует из табл. 4, деформация по оси y составляет 0.07 мм. Такое смещение трубки дрейфа неприемлемо, потому что:

- оно больше требуемого допуска на юстировку резонатора;
- его нельзя компенсировать во время работы резонатора.

Чтобы охладить резонатор DTL₂, в частности шток и трубку дрейфа, необходимо предусмотреть канал охлаждения в штоке резонатора. В штоках трубки дрейфа резонаторов DTL₂ с $g = 24$ мм и $g = 42$ мм был сделан канал охлаждения с $\varnothing 10$ мм и длиной 150 мм. Коэффициент принудительной водяной конвекции α был взят минимальный и равный 300 Вт/(м·К). В результате расчета было получено, что самое горячее место в резонаторах сместилось с трубки дрейфа на основании штока трубки дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 26 °С и 28 °С для первого и последнего резонаторов соответственно.

Термомеханические деформации резонаторов DTL₂ с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа представлены в табл. 5.

Из табл. 5 следует, что термомеханические деформации укладываются в допуск на юстировку резонатора. Однако данные деформации, возникающие в процессе работы, будут изме-

Таблица 5. Термомеханическая деформация резонаторов DTL₂ с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа

Ось, мм	$g = 24$ мм	$g = 42$ мм
Δx	0.016	0.016
Δy	0.019	0.023
Δz	0.063	0.044

нять ЭДХ резонаторов, в частности их резонансные частоты. Было проведено моделирование с целью оценки влияния термомеханических деформаций на изменение резонансной частоты резонаторов DTL₂. Так, резонансная частота изменяется на $\Delta f = 86$ кГц и 45 кГц для резонаторов DTL₂ с $g = 24$ мм и $g = 42$ мм соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определены параметры резонаторов DTL₂, при которых достигается заданное динамикой распределение поля. Оптимизированы диаметры трубок дрейфа, при которых напряженность на поверхности трубок не превышает 1.8 Кр. Также обоснована необходимость обеспечить охлаждение штоков трубок дрейфа резонаторов группы DTL₂. Охлаждение необходимо, чтобы минимизировать термомеханические деформации. Изменение резонансной частоты резонаторов группы DTL₂, вызванное термомеханическими деформациями, может быть компенсировано подстроечными плунжерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. V. 13. № 6. P. 1126. <http://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
2. Кропачев Г.Н., Кулевой Т.В., Ситников А.Л., Скачков В.С., Хабибуллина Е.Р. Сметанин М.Л., Тельнов А.В., Завьялов Н.В. // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19(3). С. 5. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16>

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.384.6, 681.518

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НОВОСИБИРСКИМ КОМПЛЕКСОМ ЛСЭ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СТАНЦИЯМИ¹

© 2025 г. Н. А. Винокуров^{a, b}, В. Р. Козак^a, Е. Н. Дементьев^a,
С. С. Середняков^{a, b, *}, С. В. Тарарышкин^a

^a *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

^b *Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

* e-mail: sseredn@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.12.2023 г.

После доработки 12.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны и работает на базе четырехоборотного ускорителя-рекуператора. Данный ускоритель является крупной электрофизической установкой, содержащей большое количество электротехнического оборудования. Для эффективного управления данным комплексом была разработана специализированная система управления. Рассматриваются структура, аппаратные и программные средства данной системы управления. Также рассмотрены способы управления пользовательскими станциями ЛСЭ и их связь с основной системой управления ЛСЭ.

DOI: 10.7868/S3034564225080103

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Институте ядерной физики собран и на протяжении ряда лет работает лазер на свободных электронах (ЛСЭ) [1]. ЛСЭ функционирует на основе многооборотного ускорителя-рекуператора и включает в себя три различные конфигурации (режима работы), которые различаются по энергии электронного

пучка, используемого для генерации излучения, и диапазону его длин волн. Каждому режиму работы соответствует определенное количество дорожек ускорителя и отдельный лазер на свободных электронах. Структура всего комплекса такова, что отдельные его компоненты используются для всех трех режимов работы, в то время как другие используются при работе только одного режима (рис. 1).

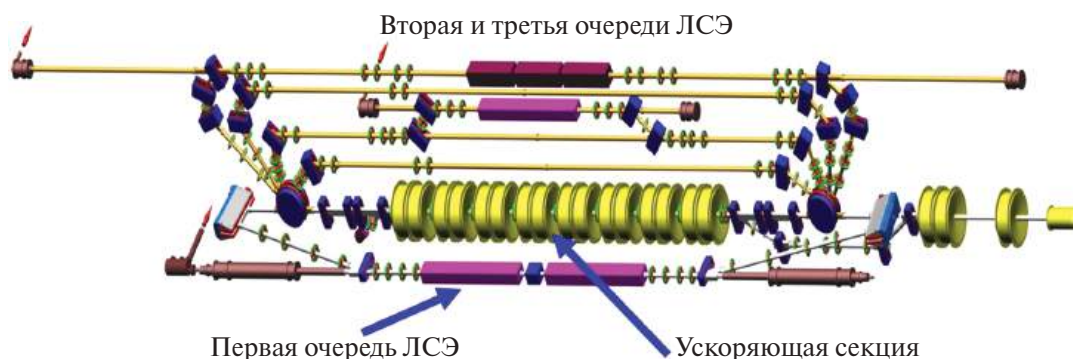


Рис. 1. Схема Новосибирского ЛСЭ.

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

Все три конфигурации работы ЛСЭ, как по отдельности, так и вместе, представляют собой сложную электрофизическую установку с большим количеством управляемых параметров. Для полноценной эксплуатации ЛСЭ была создана специализированная распределенная система управления, включающая в себя различное управляющее оборудование, а также соответствующее программное обеспечение.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСОБЕННОСТИ НОВОСИБИРСКОГО ЛСЭ

Лазер на свободных электронах представляет собой источник когерентного излучения, в котором в качестве рабочей среды используется ускоренный электронный пучок. Релятивистский пучок пролетает через специальную магнитную структуру – ондулятор, который создает магнитное поле, поперечное движению пучка, постоянное по времени и меняющееся по ходу движения пучка по гармоническому закону. Электроны двигаются в таком поле по змеевидной траектории и испускают электромагнитное излучение (рис. 2).

На оси движения пучка устанавливаются зеркала оптического резонатора, в котором происходит накопление и усиление излучения. Для вывода излучения служит отверстие в одном из зеркал.

Длина волны излучения зависит от энергии электронного пучка и параметров ондулятора – периода и амплитуды магнитного поля. Соответственно, длину волны можно перестраивать в довольно больших пределах, меняя либо амплитуду поля в ондуляторе, либо энергию электронного пучка.

Как было сказано, новосибирский ЛСЭ может работать в трех различных режимах, и использует многооборотный ускоритель-рекуператор. Принцип работы ускорителя-рекуператора

состоит в том, что электронный пучок, многократно пролетая ускоряющую ВЧ-секцию и набирая энергию, каждый раз попадает на следующую дорожку. После пролета последней дорожки и передачи части своей энергии в излучение электронный пучок начинает пролетать все дорожки в обратном порядке, отдавая каждый раз часть своей энергии обратно в ВЧ-систему. Данный способ передачи энергии и называется рекуперацией и имеет следующие преимущества:

- отработанный пучок отдает почти всю энергию обратно в ВЧ-резонаторы ускоряющей структуры;
- замедленный пучок гораздо проще утилизировать, так как он становится радиационно гораздо менее опасным.

Все три режима работы ЛСЭ различаются по количеству оборотов в ускорителе-рекуператоре, следовательно, имеют разную энергию электронного пучка. Кроме того, для каждого режима работы ЛСЭ установлен ондулятор (см. рис. 1), отличающийся от других по своим параметрам (период и амплитуда магнитного поля, полная длина).

Таким образом, каждый режим работы ЛСЭ имеет свой диапазон длин волн и среднюю мощность излучения. Основные параметры различных режимов работы ЛСЭ приведены в сводной табл. 1.

Таблица 1. Параметры режимов работы ЛСЭ

Параметр	Режим работы ЛСЭ		
	1	2	3
Количество оборотов	1	2	4
Энергия электронного пучка, МэВ	12	20	40
Диапазон длин волн излучения, мкм	110–240	40–80	5–30

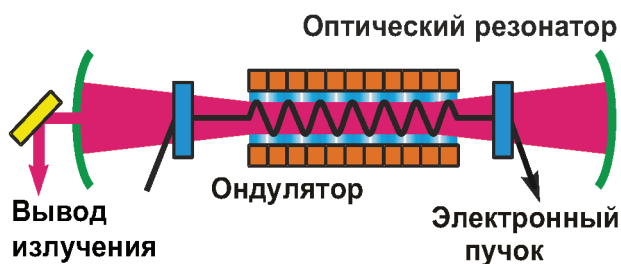


Рис. 2. Принцип работы лазера на свободных электронах.

3. НОВОСИБИРСКИЙ ЛСЭ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Как электрофизическая установка ЛСЭ включает в себя следующие основные подсистемы.

1. Электронная пушка, выдающая сгустки электронов с частотой до 22.5 МГц с зарядом в сгустке до 1.4 нКл. Средний ток пучка может достигать 30 мА.

2. ВЧ-система, содержащая 16 ускоряющих резонаторов и 3 резонатора в инжекционном канале (см. рис. 1).

3. Магнитная система. Включает в себя сотни магнитных элементов разных типов – солениды, квадрупольные линзы, поворотные магниты, корректоры, ондуляторы – с рабочими токами от сотен миллиампер до двух килоампер.

4. Система диагностики пучка. Включает в себя датчики положения и тока пучка, установленные на всех дорожках микротрона рекуператора.

5. Системы контроля технологических параметров ЛСЭ. Сюда входят контроль температуры вакуумной камеры ускорителя и других, критичных к нагреву элементов комплекса: вакуума, состояния охлаждающего дистиллята, состояния внешней питающей сети и т. д.

6. Оптическая система ЛСЭ. Включает в себя узлы, необходимые для накопления и транспортировки когерентного излучения – оптические резонаторы, канал вывода излучения, систему разводки излучения по пользовательским станциям.

В таблице 2 приведен состав всех систем ЛСЭ и управляющего им радиотехнического оборудования.

Весь комплекс Новосибирского ЛСЭ имеет ряд особенностей, отличающих его от других похожих установок.

1. Большая потребляемая мощность (около 3 МВт).

2. Высокий максимальный средний ток электронного пучка (до 30 мА).

3. Необходимость работать попеременно в трех разных режимах.

4. Комбинированная архитектура всего ЛСЭ – некоторые части используются при работе во всех трех режимах, в то время как другие используются для работы одного из режимов.

Эти и ряд других факторов повлияли на выбор управляющего оборудования, программного обеспечения и конечную архитектуру всей системы управления.

4. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛСЭ

Поэтапное сооружение установки сильно повлияло на выбор аппаратуры, используемой в системе управления. Так, например, система управления ускоряющей ВЧ-секцией базируется на аппаратуре в стандарте КАМАК. На выбор данного стандарта повлияло наличие большого количества разработанных ранее модулей.

При этом значительный технологический прогресс электроники инициировал поиск других подходов при проектировании систем управления. Так, для нужд управления несколькими подсистемами ЛСЭ был разработан набор унифицированных контроллеров с интерфейсом CANbus [2], которые были интегрированы в различные подсистемы (источники питания, измерители температуры и т. п.). В табл. 3 приводится список контроллеров, разработанных специально для нужд системы управления ЛСЭ.

Помимо указанных интерфейсов, в системе управления ЛСЭ используются шины RS-485, Ethernet, но в гораздо меньшем объеме.

Таблица 2. Подсистемы ЛСЭ

Система ЛСЭ	Состав системы	Управляющее оборудование
Электронная пушка	Катодно-сеточный узел и высоковольтный выпрямитель	Блоки управления катодно-сеточным узлом и выпрямителем
ВЧ-система	19 ВЧ-резонаторов	1–2- и 4-каскадные ВЧ-генераторы
Магнитная система	390 магнитных элементов	Источники питания постоянного тока
Система диагностики пучка	70 пикап-станций	Преобразователи сигналов
Системы технологического контроля ЛСЭ	290 датчиков температуры, воды, 20 вакуумных насосов	Преобразователи сигналов с датчиков, источники питания вакуумных насосов
Оптическая система ЛСЭ	3 оптических резонатора, каналы вывода и транспортировки излучения	Блоки управления шаговыми двигателями и измерения параметров излучения, монохроматор

Таблица 3. Контроллеры с интерфейсом CANbus

Контроллер	Входов АЦП	Выходов ЦАП	Цифровых входов и выходов
CANADC40	40	—	8+8
CANDAC16	—	16	8+8
CANDAC20	5	1	8+8
CEDAC20	6	1	8+8
CAC208	20	8	8+8
CEAC124	12	4	4+4
CIR8	—	—	16+8
SLIO24	—	—	24+24

В таблице 4 приведена сводка используемых интерфейсов и количество каналов управления и контроля по различным системам ЛСЭ.

Все устройства управления и контроля через указанные шины передачи данных подключены к персональным компьютерам (типа IBM PC) с помощью интерфейсных устройств, которые либо являются внутренними платами расширения (PCI-board), либо являются внешними устройствами, подключаемыми к компьютеру с помощью стандартных шин (USB, Ethernet). Схема основных подключений системы управления ЛСЭ изображена на рис. 3. Все управляющие компьютеры подключены к общей локаль-

Таблица 4. Управляющее оборудование для подсистем ЛСЭ

Система	Интерфейс	Количество управляющих устройств	Количество каналов управления	Количество каналов контроля
Электронная пушка	CAMAC, CANbus	7	20	20
ВЧ-система	CAMAC	28	100	200
Магнитная система	CANbus	61	400	800
Система диагностики пучка	CAMAC	75	0	280
Системы технологического контроля	CANbus	16	20	330
Оптическая система	CANbus, RS-485	10	10	30
Всего...	—	164	500	1670

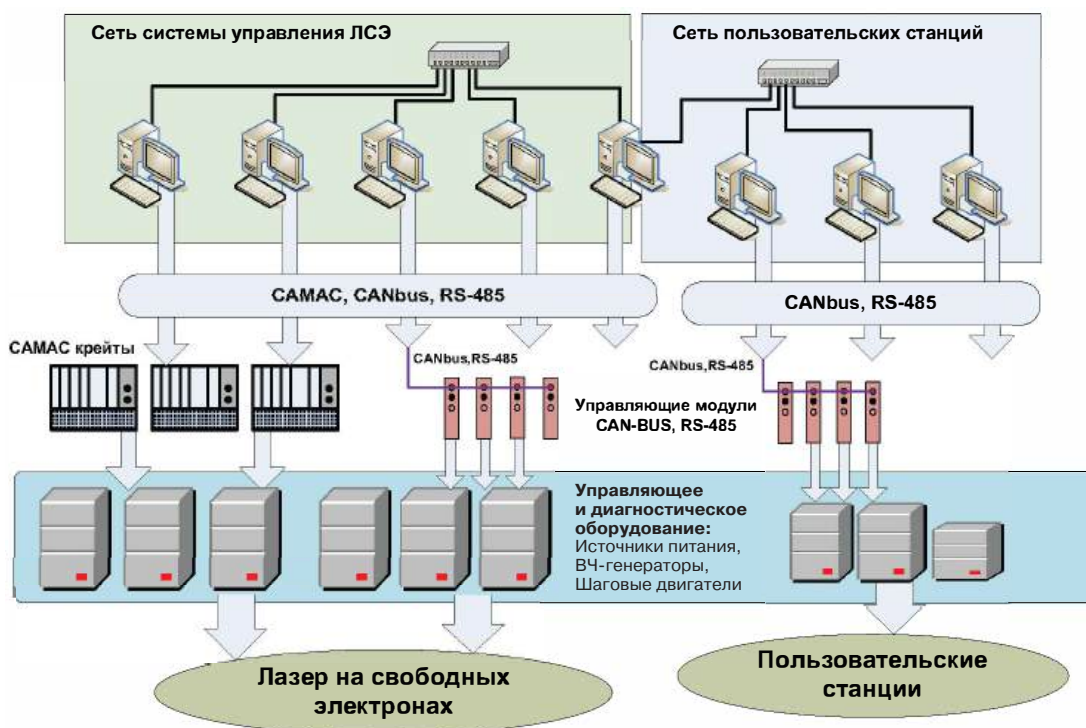


Рис. 3. Архитектура системы управления ЛСЭ.

ной сети Ethernet, которая физически отключена от внешней сети. Также отдельная локальная сеть предусмотрена для пользовательских компьютеров. Эти две сети соединены между собой через один из управляющих компьютеров, через который происходит передача основных параметров работы ускорителя и генерируемого излучения из системы управления ЛСЭ на экспериментальные станции.

5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛСЭ

Управляющее программное обеспечение реализовано в виде отдельных модулей-программ, работающих на компьютерах IBM-PC. Каждая программа управляет одной из систем ЛСЭ. Доступ к управляющему оборудованию осуществляется с помощью интерфейсных устройств, с которыми программа взаимодействует с помощью драйверов этих устройств и высокоуровневых библиотек. Структурная схема управляющего программного обеспечения приведена на рис. 4.

С одной стороны, каждая управляющая программа содержит встроенный сервер удаленного управления Channel Access из состава системы EPICS [3]. Сервер предоставляет набор PV-переменных (Process Variables), которые представляют собой переменные, доступные для чтения, либо записи в локальной сети. В управляющей программе каждая PV-переменная связана с соответствующей управляющей либо

измеряемой величиной данной подсистемы, которая в свою очередь отражает параметр какого-либо устройства. С помощью данного сервера можно управлять параметрами подсистемы из любой другой программы на любом компьютере, находящемся в локальной сети системы управления.

С другой стороны, каждая управляющая программа содержит развитый пользовательский интерфейс (GUI), позволяющий управлять каждой подсистемой с консоли оператора.

Перечислим основные системы ЛСЭ и основные функции управляющих ими программных модулей.

1. Магнитная система ЛСЭ: управление источниками питания магнитных элементов, а также их диагностика.

2. Система измерения положения пучка: измерение и вывод на экран координат положения электронного пучка в местах пролета им пикап-станций. Изучение временной стабильности положения и тока пучка.

3. Система контроля вакуума и температуры: считывание и вывод на экран показаний с датчиков температуры и блоков управления вакуумных насосов. В случае перегрева какого-либо участка вакуумной камеры программа посылает запрет на включение электронного пучка.

4. ВЧ-система: управление ВЧ-генераторами, питающими ВЧ-систему ЛСЭ, включающую в себя 19 ВЧ-резонаторов. Диагностика состояния ВЧ-резонаторов.

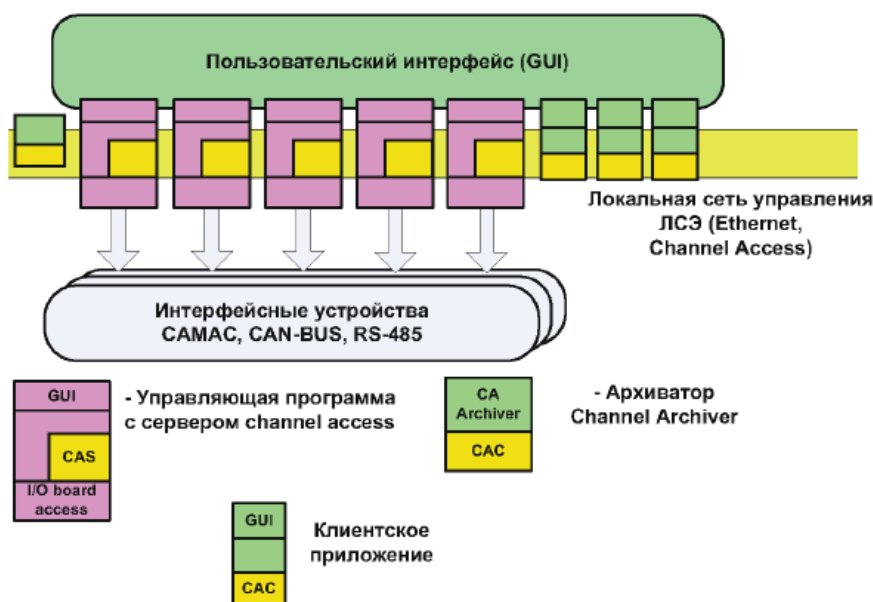


Рис. 4. Структура программного обеспечения системы управления ЛСЭ.

5. Электронная пушка: управление катодно-сеточным узлом — напряжением накала, катода, ускорительной трубки. Задание частоты следования электронных сгустков. Непрерывная диагностика потерь электронного пучка в канале ускорителя. Контроль состояния блокировок.

6. Оптическая система: настройка положения зеркал оптического резонатора, снятие показаний с датчиков мощности излучения и передача их значений на пользовательские станции и на пульт оператора, измерение спектра излучения, контроль состояния канала транспортировки излучения.

На рисунке 5 приведены скриншоты некоторых управляющих программ.

Кроме этих модулей, взаимодействующих с управляющей аппаратурой “напрямую”, был разработан ряд клиентских приложений (рис. 4), которые управляют нужными параметрам ЛСЭ с помощью протокола Channel Access, обращаясь к соответствующим PV-переменным, находящимся в серверах основных программ. Таким образом, одно клиентское приложение может работать с параметрами из разных подсистем.

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМИ СТАНЦИЯМИ

Помимо управления оборудованием микротрона-рекуператора и через него электронным

пучком, в рамках системы управления ЛСЭ был реализован общий функционал для управления аппаратурой на пользовательских станциях и передачи на них основных параметров электронного пучка и излучения. В силу некоторой схожести управляющего оборудования и задач управления данный функционал был реализован в программном модуле управления оптической системой. Данный модуль может работать в двух конфигурациях:

- серверной — собирает основные параметры электронного пучка и излучения и выдает их в обе локальные сети как PV сервера EPICS;
- клиентской — получает основные параметры через протокол EPICS Channel Access и отображает их на экране компьютера.

В результате существует возможность запускать программный модуль управления оптической системой на компьютерах пользовательских станций в клиентском режиме и управлять локальным оборудованием, а также видеть на экране основные параметры работы комплекса. В сводной табл. 5 приведен функционал данного модуля и то, как он используется на пользовательских станциях и в системе управления ЛСЭ.

На рисунке 6 приведена схема системы управления оптической системой ЛСЭ и интеграции ее с пользовательскими станциями.

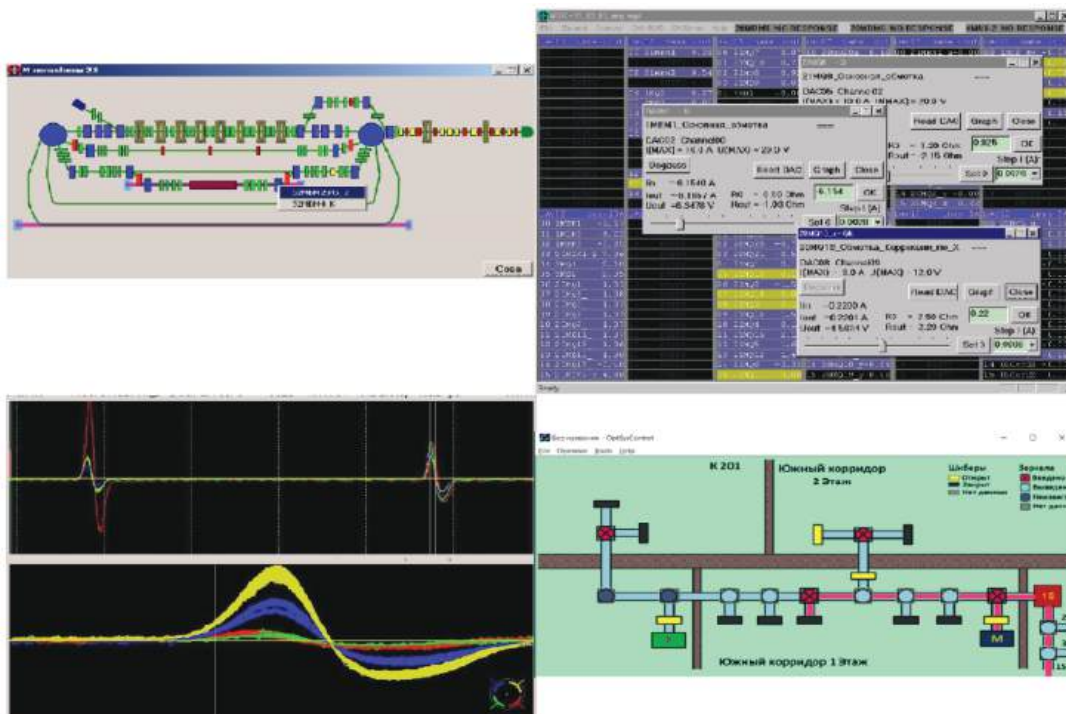


Рис. 5. Скриншоты управляющих программ.

Таблица 5. Функционал системы управления излучением ЛСЭ

Функционал управления	Система управления ЛСЭ	Пользовательские станции
Управление шаговыми двигателями	Юстировка зеркал оптических резонаторов ЛСЭ	Управление различными подвижками при проведении экспериментов
Снятие показаний датчиков излучения ЛСЭ	Отображение на экране на пульте ЛСЭ. Передача этих значений как PV сервера Epics CAS	Получение показаний датчиков как PV через клиентский протокол Epics CA и отображение на экране
Получение спектра излучения	Управление монохроматором. Получение из него спектра, передача его как PV сервера EPICS	Получение спектра излучения через клиентский протокол Epics CA и отображение на экране
Контроль состояния канала передачи излучения ЛСЭ	Опрос состояний зеркал и шиберов оптического канала. Передача их как PV через сервер EPICS. Построение на экране картинки – состояния канала (рис. 7)	Получение состояний зеркал и шиберов как PV через клиентский протокол Epics CA и отображение на экране состояния канала в виде схемы (рис. 7)

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время Новосибирский ЛСЭ работает попеременно во всех трех режимах. Разработанная система управления позволяет осуществлять полный контроль и диагностику работы всего комплекса. Для всех трех режимов работы ЛСЭ система имеет единый интерфейс и подход к управлению, что позволяет легко переключаться между очередями и значительно упрощает работу оператора. Данная система также интегрирована с компьютерами на пользовательских станциях и содержит единообразный функционал для управления экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vinokurov N.A., Dementyev E.N., Dovzhenko B.A. et al.* Novosibirsk free electron laser facility: Two-orbit ERL with two FELs // Proceedings of FEL. Novosibirsk. 2009. TUOD01.
2. *Kozak V.R.* Embedded device set for control systems. Implementation and application // Proceedings of RuPAC. Novosibirsk. 2006. THDO05.
3. *Hill J.O.* EPICS R3.14. Channel Access Reference Manual. <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>

КОНЦЕПЦИЯ ОБЪЕДИНИТЕЛЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА¹

© 2025 г. Ю. Ю. Лозеев^{a, **}, Т. А. Лозеева^{a, *}, Г. Б. Шарков^a, А. А. Морозов^a

^a Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

* e-mail: talozeeva@mephi.ru

** e-mail: yulozeev@mephi.ru

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 06.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Обсуждается концепция объединителя 16:1 непрерывной высокочастотной мощности 500 кВт на частоте 500 МГц на основе прямоугольного волновода WR1800 и его прототип 4:1. Объединитель работает при 32 кВт непрерывной мощности, поданной на каждый из входов и оснащен водяной системой охлаждения антенн. Охлаждение реализовано через закороченный сегмент коаксиальной линии, ВЧ мощность подводится через боковую линию. Представлены результаты исследований характеристик и особенностей объединителя мощности 16:1 и его прототипа 4:1.

DOI: 10.7868/S3034564225080119

1. ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные усилители в последнее время претендуют на статус достойной и современной замены электровакуумных приборов субмегаваттной мощности. Обычно твердотельные усилители проектируются модульными и масштабируемыми – состоят из отдельных блоков – усилительных модулей на основе одного или нескольких ВЧ-транзисторов. Транзисторы способны генерировать мощность в диапазоне частот от единиц МГц до единиц ГГц, а их коэффициент усиления зависит от выбранной частоты, однако выходная мощность обычно не превышает 4 кВт в импульсном режиме. Для получения более высоких порядков мощности обычно используются разнообразные объединители мощности. К примеру, планарные объединители Уилкинсона или Гизеля могут использоваться в качестве первой ступени объединения для суммирования мощности с нескольких транзисторов внутри модуля. Для получения десятков и сотен киловатт мощности используются объединители пространственного типа – волноводные или резонаторные.

Основным потребителем субмегаваттных мощностей в мегагерцевом диапазоне являются ускорители заряженных частиц. Разработчики ускоряющих структур зачастую вынуждены подстраиваться под характеристики существующих усилителей при разработке концепции ускорителей. Один из таких случаев – новая “Супер Чарм-Тау фабрика” на базе НЦФМ (“Сатис”, Россия), где разработчики планировали перейти от проектной частоты 500 МГц на доступную 350 МГц [2, 3]. И хотя возможно произвести усилитель на 500 МГц, работа на больших мощностях существенно усложняет задачу. В данной статье рассмотрена концепция твердотельного усилителя, способного производить 500 кВт непрерывной ВЧ-мощности на частоте 500 МГц и объединителя высокой мощности для такого усилителя.

2. СУБМЕГАВАТТНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ УСИЛИТЕЛЬ

ВЧ-транзисторы, работающие на частоте 500 МГц, способны производить около 1 кВт непрерывной мощности [4, 5], так что для полу-

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

чения 500 кВт выходной мощности потребуется свыше 500 транзисторов. Такие транзисторы обычно собираются в усилительные модули, которые являются самостоятельной независимой ячейкой с элементами контроля и управления. Для получения более высокой мощности усиленные сигналы с транзисторов необходимо суммировать. Проще всего было бы осуществить суммирование в одну ступень при помощи использования объединителя резонаторного типа или объединителей на основе коаксиальных или радиальных линий. В радиальных и коаксиальных объединителях вводы мощности расположены на периферии устройства, так что объединитель с количеством входов свыше 500 будет довольно громоздким. В качестве резонаторных объединителей чаще всего используются резона-

торы на виде колебаний H010 — такой вид колебаний не обладает вариацией поля по высоте или азимуту и позволяет равномерно разместить петли связи на обечайке резонатора. Чтобы возбудить в резонаторе моду H010 на частоте 500 МГц резонатор должен обладать радиусом 229 мм и высотой около 400 мм (рис. 1). В предположении, что мощность вводится в резонатор по волноводам номинала DIN 7/16", поверхность резонатора позволяет разместить около 100 входов и получить выходную мощность около 100–200 кВт. Чтобы получить большую мощность необходимо увеличивать размер резонатора и работать на другом виде колебаний что влечет за собой другое, если вообще возможно, распределение вводов мощности.

Другой способ объединения — использование каскада из объединителей 2 : 1 на основе кольцевых и волноводных мостов. Такой способ влечет за собой увеличение размеров и потери порядка нескольких процентов мощности на объединительном “дереве”. Кроме того, если один из усилительных модулей, подключенных к плечам объединителя 2 : 1, по какой-то причине выходит из строя, мощность оставшегося модуля распределяется между плечами объединителя и практически целиком уходит в рассогласованный неработающий модуль.

Оставшийся способ — использование объединителей на основе волноводов с расстоянием между входами, кратным длине волны или половине длины волны, что для свыше 500 входов также не представляется целесообразным. Поэтому потребуется как минимум две ступени объединения (рис. 2). В качестве первой ступени

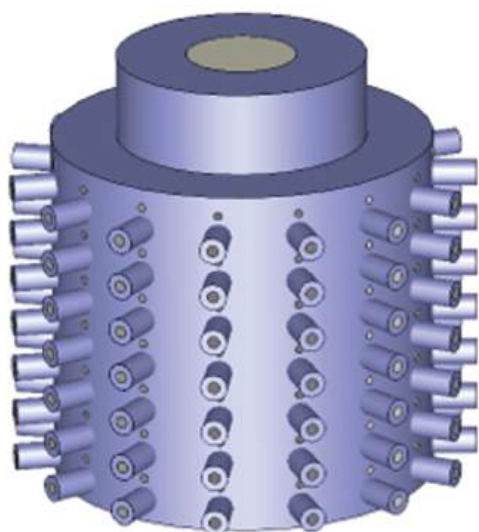


Рис. 1. Резонаторный объединитель мощности 105 : 1.

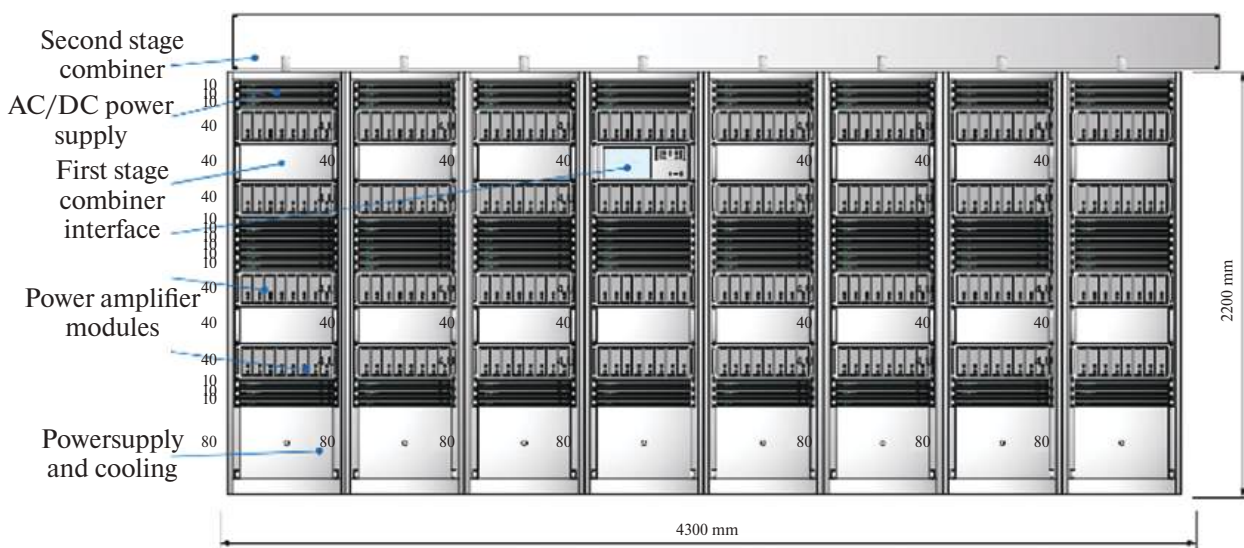


Рис. 2. Концепция субгигаваттного усилителя мощности.

объединения предлагается использовать коаксиальный объединитель прямоугольного сечения типа представленного в работе [6]. В качестве второй ступени предлагается использовать объединитель на основе прямоугольного волновода WR1800.

3. КОНЦЕПЦИЯ ОБЪЕДИНИТЕЛЯ 16:1

Концепции объединителя на основе прямоугольного волновода WR1800, способного работать с входной мощностью 32 кВт и выходной 500 кВт, представлены на рис. 3.

Поскольку объединитель должен работать в непрерывном режиме, даже десятые доли процента потерь мощности приведут к значительному нагреву элементов объединителя. Поэтому, какими бы ни были элементы связи с волноводом, необходимо их активное водяное охлаждение. Во время разработки рассматривались два варианта элементов связи — петли связи и антенны связи. Обе версии предполагали размещение элементов связи на расстоянии длины волны друг от друга на широкой или узкой

стенке волновода WR1800 с одним закороченным концом и другим концом, подключенным к устройству ввода мощности в резонатор.

Версия с петлями связи была предпочтительнее в начале разработки благодаря огромному опыту, накопленному при разработке охлаждения петель ввода мощности в резонаторы и отсутствию необходимости работать в области высокого электрического поля. Настройка коэффициентов передачи по петле осуществлялась вращением петли, а согласование петель проводилось с помощью согласующих линий, установленных на каждом входе. Такая система, однако, оказалась экстремально чувствительной к допускам на изготовление петли и сложной в настройке. Достаточно большие петли и вносимая ими внушительная индуктивная нагрузка изменяли длину волны в прямоугольном волноводе и еще сильнее усложняли настройку. Кроме того, для настройки объединителя необходимо вращать петлю с точностью в один градус, что существенно усложняет ручную настройку. Поэтому выбор был сделан в пользу антенной связи, которая лишена этого недостатка. Подобный

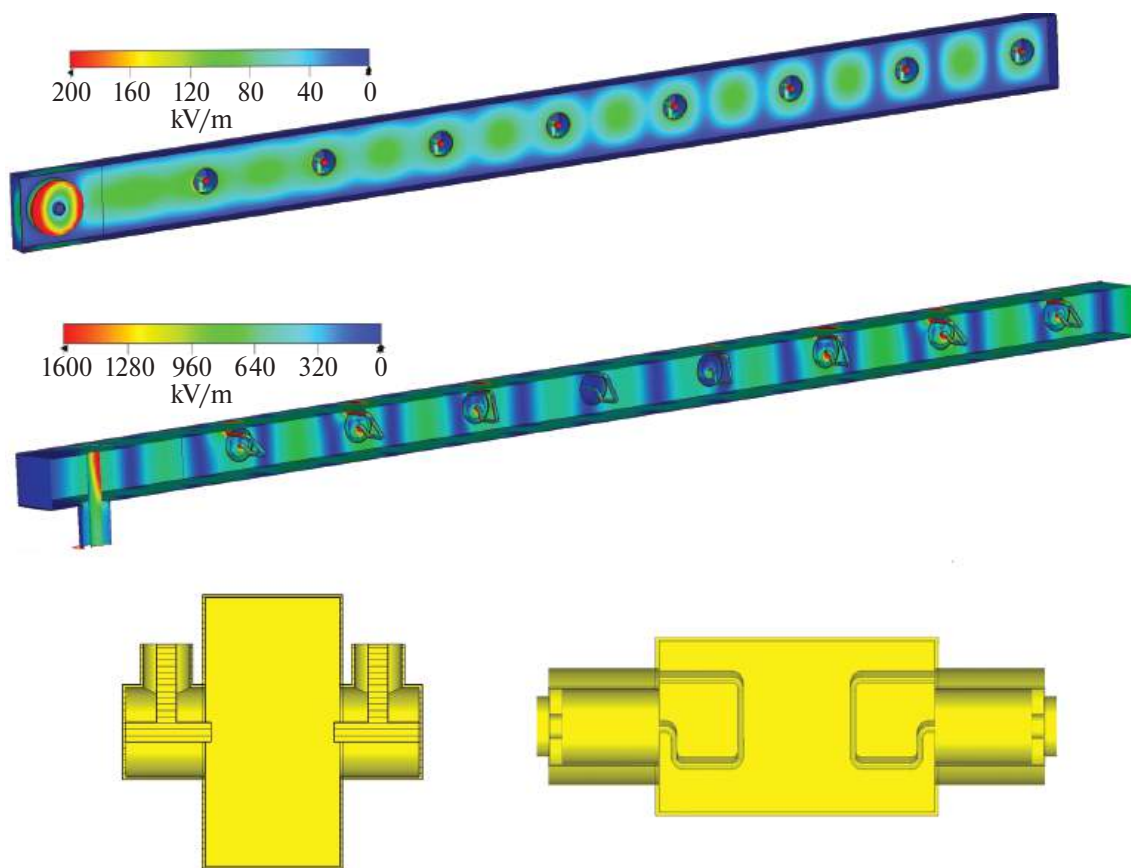


Рис. 3. Концепции волноводного объединителя ВЧ-мощности.

объединитель с емкостной связью был спроектирован командой из Университета Уппсалы для ESS [7], однако вопрос об охлаждении антенн поднимался лишь теоретически. Концепция узла ввода мощности с системой охлаждения, сходной с представленной в работе [1], представлена на рис. 4.

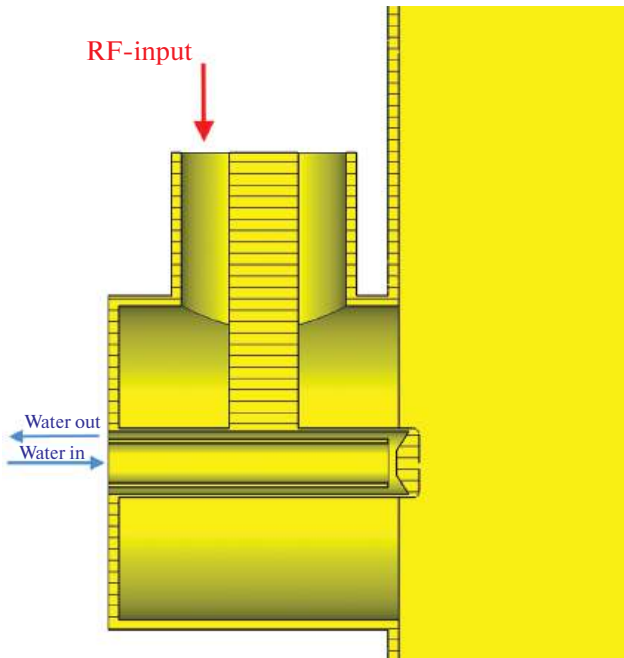


Рис. 4. Антенный узел с водяным охлаждением.

ВЧ-мощность подается в волновод WR1800 через боковую линию импеданса 50 Ом и номинала EIA 4 1/2", поток воды подается в полость антенны через дополнительный закороченный отрезок линии передачи с импедансом, отличным от 50 Ом для согласования входа с волноводом. Основными местами нагрева будут наконечники антенн, имеющие наибольшую плотность тока на поверхности. Объединитель планируется изготовить полностью медным, кроме частей, имеющих контакт с водой. Расчетные потери мощности в объединителе составляют 625 Вт, что, с учетом предыдущего опыта работы с медными объединителями обещает реальные потери около 3 кВт из-за окисления меди и потерь на соединениях. К примеру, более дешевый и доступный алюминиевый объединитель рассеивает около 13 кВт ВЧ-мощности, что ведет к большей температуре антенн и большей нагрузке на транзисторы для компенсации рассеянной мощности.

Объединитель, который так же можно рассматривать как делитель мощности с точки зрения S-параметров, настроен на малое значение возвратных потерь (рис. 5) и имеет хорошие фазовый и амплитудный балансы – модули коэффициентов передачи колеблются около значения 0.05 дБ, а разность фаз коэффициента передачи по плечам не превышает одного градуса.

Сигнал подается на каждую пару входов в противофазе. Это означает, что один из объе-

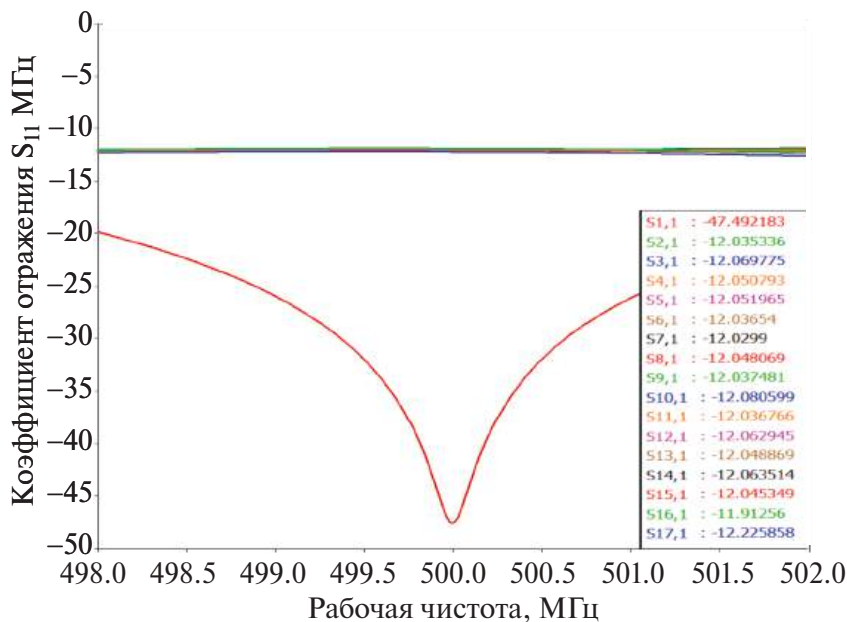


Рис. 5. S-параметры объединителя 16:1 в диапазоне частот 498–502 МГц.

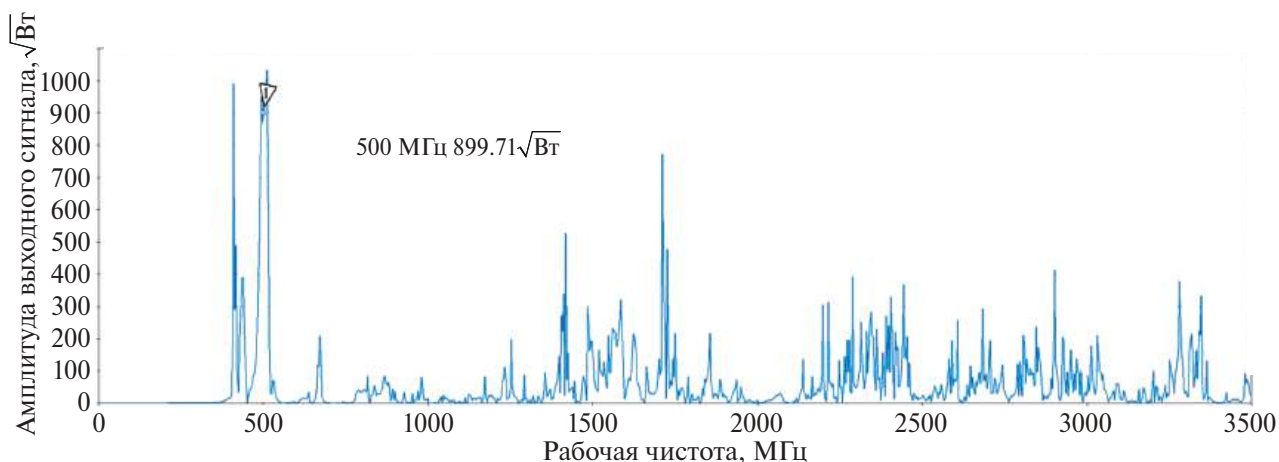


Рис. 6. Уровень выходной мощности в диапазоне частот 0–3.5 ГГц.

динителей промежуточного звена внутри стойки будет генерировать сигнал, сдвинутый на 180 градусов относительно второго объединителя в стойке. Полоса объединителя — около 50 МГц по уровню -3 дБ от рабочего уровня S_{nl} . Также стоит отметить, что система из двух объединителей — промежуточного и финального — обладает свойством фильтровать высшие гармоники несущей частоты (рис. 6) в диапазоне от 0 до 3.5 ГГц, возникающие при работе усилительного модуля. Такая особенность дает дополнительное преимущество по сравнению с электровакуумными приборами и другими типами объединителей мощности.

Поскольку антенны находятся в области максимумов электрического поля, необходимо контролировать пиковые поля в объединителе. Пиковые поля на уровне мощности 500 кВт не превышают 0.56 МВ/м и традиционного предела напряженности пробоя для сухого воздуха 3 МВ/м.

4. ПРОТОТИП ОБЪЕДИНИТЕЛЯ МОЩНОСТИ 4:1

Для проверки характеристик основных узлов объединителя был разработан прототип объединителя 4:1. Небольшая модификация штыря ввода и добавление дополнительной линии согласования являются единственными изменениями конструкции антенны объединителя (рис. 7, 8).

Для прототипа 4:1 был разработан выход на коаксиальную линию $4 + 1/2''$ типа “дверная ручка”. Переход с типа $4 + 1/2''$ на N-тип будет использоваться для измерения S-параметров, а для измерений на мощности выход будет подключаться через направленный ответвитель на

эквивалентную нагрузку со входом $4 + 1/2''$. Предполагается испытывать прототип объединителя в трех режимах: мощность 10 дБм подается на выход для измерения S-параметров; 2.5 кВт — на каждый вход от отдельных усилительных модулей; 10 кВт — на каждый вход от сборок из 4 модулей. Как показали тепловые расчеты, режим работы с мощностью 2.5 кВт на входах не требует активного охлаждения, так как с учетом естественной конвекции воздуха концы антенн нагреваются только лишь до температуры 67°C , что является нормальной рабочей температурой для меди (рис. 9).

Режим работы с мощностью 10 кВт на каждом входе потребует подачи воды с давлением 5 бар

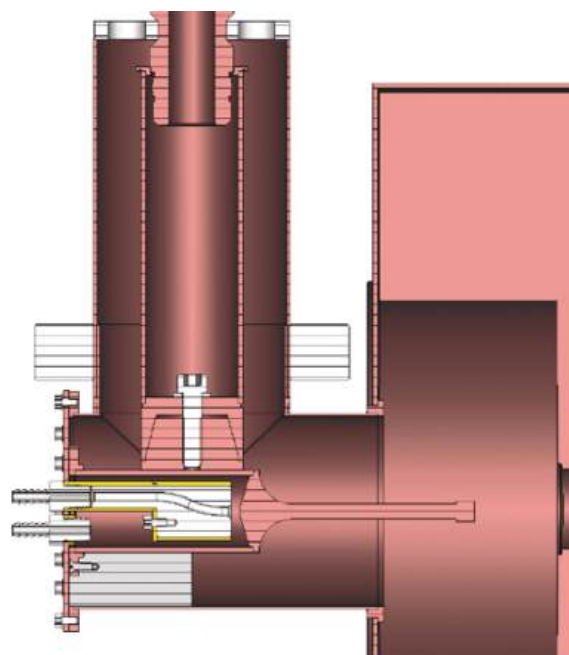


Рис. 7. Узел ввода мощности прототипа объединителя 4:1.

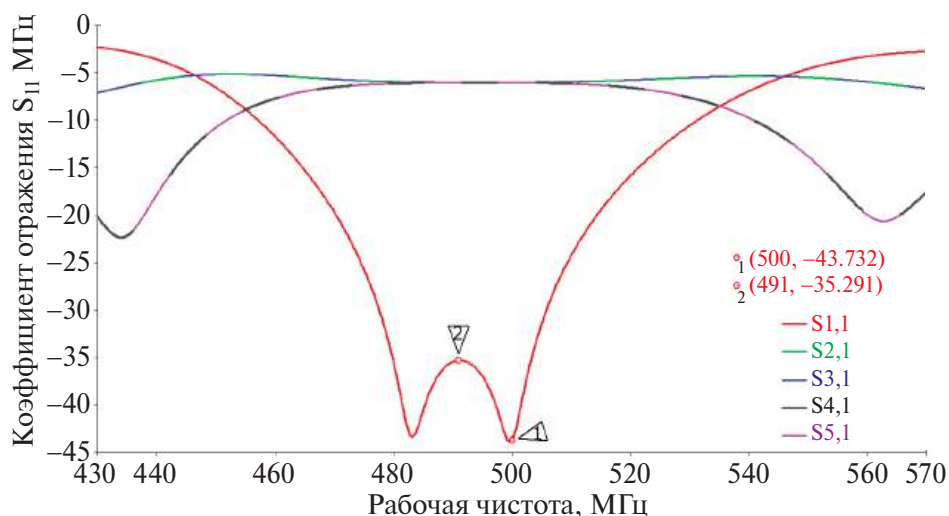


Рис. 8. S-параметры прототипа объединителя 4:1.

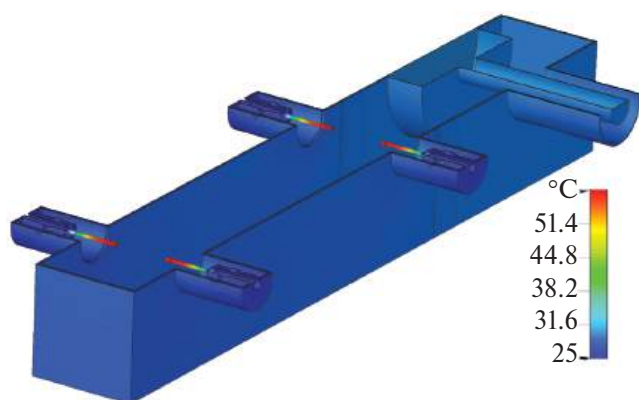


Рис. 9. Результаты численного моделирования нагрева прототипа 4:1.

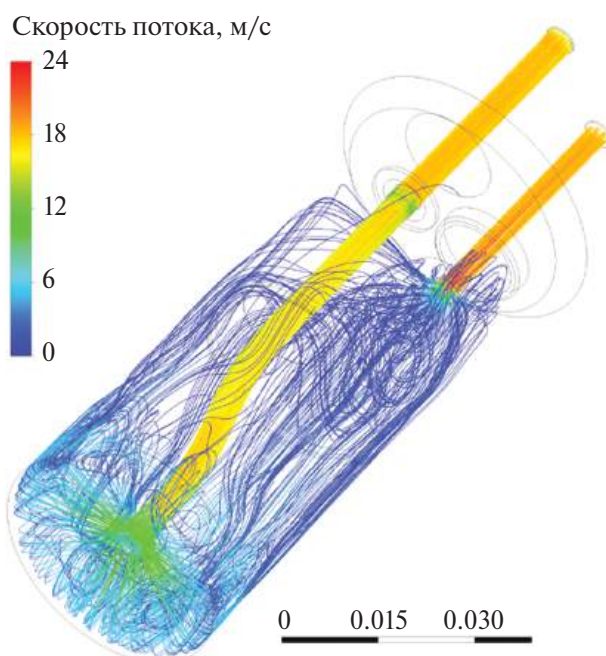


Рис. 10. Распределение скорости потока воды в узле охлаждения прототипа 4:1.

для удержания температуры в рамках 50–60 °С. Водяное охлаждение подается на внутреннюю трубку контура охлаждения, а выводится по внешней стенке этой трубки (рис. 4). Нижняя часть контура оптимизирована в виде конуса для увеличения потока воды и передачи тепла, которая ухудшается при использовании плоской формы нижней части (рис. 10).

Настройка изготовленного объединителя будет происходить дискретно с помощью полиэтиленовых или РОМ вставок в форме полуколец различных размеров (рис. 11).

Также эти вставки служат в качестве поддерживающих и центрующих элементов конструкции антенны. Меняя длину диэлектрической вставки с шагом от 5 мм, можно настраивать коэффициенты отражения (рис. 12) и модули коэффициентов прохождения мощности S_{n1} с точностью до десятых долей дБ.

Неопределенность в выборе материала вставок обусловлена, помимо их диэлектрических свойств, механическими соображениями. Фторопласт обладает значительно более низким коэффициентом диэлектрической проницаемости, поэтому вставки из него позволяют проводить более точную подстройку импеданса. При этом, однако, с точки зрения конструктивных характеристик, фторопласт является материалом, из которого затруднительно производство деталей с точно выдержанными размерами и геометрией. Кроме того, на этапе первичной

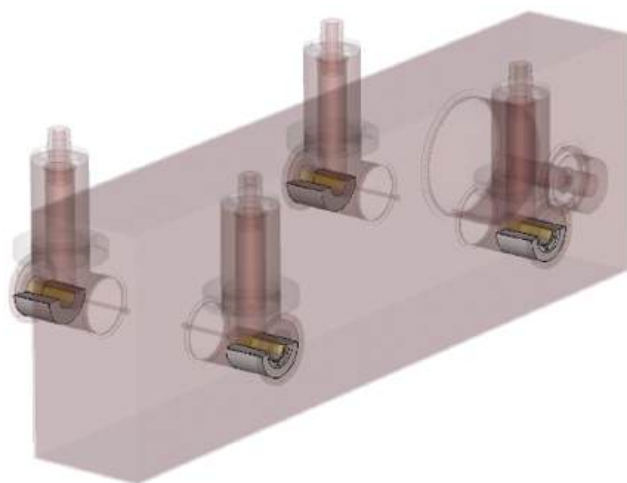


Рис. 11. Подстроечные элементы объединителя.

настройки и установки неизбежны многократные разборки антенн и замены вставок, при которых существенными факторами риска являются “срабатывание” материала по посадочному диаметру и накопление случайных дефектов поверхности из-за малой твердости материала. Такое накопление дефектов способно привести к потере точности внешней геометрии вставок, в результате чего они не смогут обеспечить необходимую соосность антенн.

5. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА 4:1

С точки зрения конструкции, прототип состоит из четырех основных подборок: основного корпуса волновода с присоединительными интерфейсами; согласующего элемента; сборок антенн; входных линий с концевыми ВЧ-вводами.

Основной корпус волновода выполнен в виде прямоугольного параллелепипеда из листовой меди М1т толщиной 3 мм, соединенных лазерной сваркой. К отверстиям в боковых пластинах корпуса привариваются специальные посадочные фланцы из меди для последующего присоединения входных и выходного волнопроводов, а также согласующего элемента. Для компенсации коробления из-за деформации, вызываемой снятием внутренних напряжений при резке холоднокатаного листа, а также собственных напряжений из-за неравномерности нагрева при сварке пластины усиливаются ребрами жесткости в местах присоединения фланцев. Окончательная сварка корпуса проводится с оснасткой, ключевым элементом которой является калибровочная труба, размещаемая во входных волноводах (со снятыми антеннами и фланцами) для сборки по ней волнопроводов на корпусе с необходимой степенью точности.

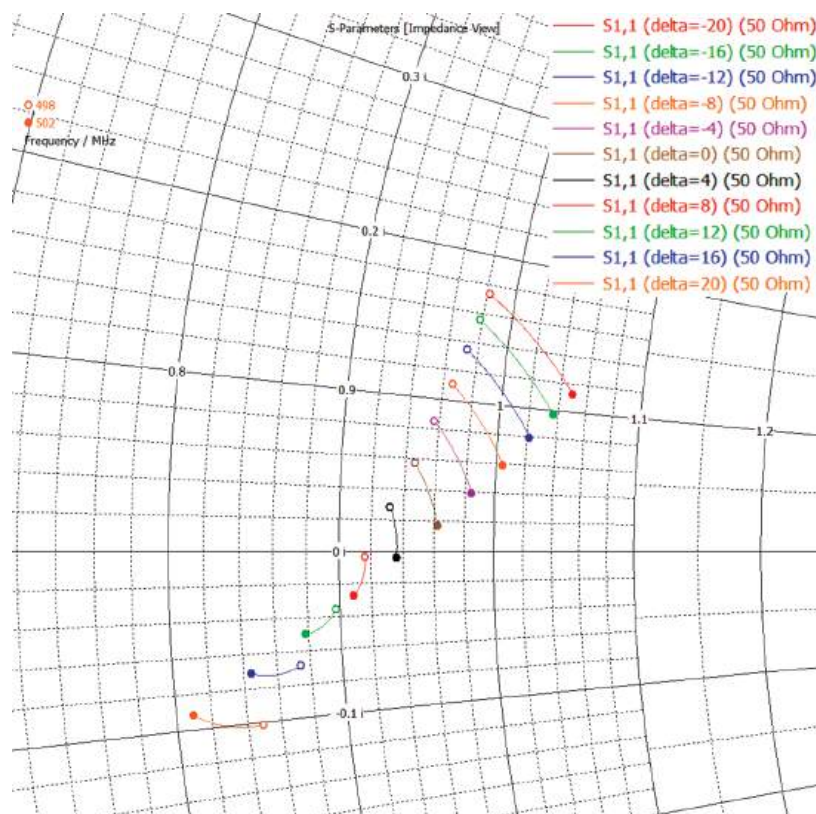


Рис. 12. Импедансная характеристика прототипа объединителя при варьировании длины диэлектрических вставок.

Согласующий элемент представляет из себя Г-образную сборку из соосных медных труб с внешними диаметрами 230 и 106, соединенных друг с другом через набор медных соединительных элементов (пластин и втулок). Труба с большим диаметром насаживается на фланец в основном корпусе с последующим припаяванием его с применением серебряного припоя. Труба меньшего диаметра заглушена крышкой с резьбовым отверстием для обеспечения электрического контакта центрального элемента ВЧ-разъема выходного волновода с корпусом.

Входные линии представляют из себя разборную конструкцию, состоящую из корпуса входной линии хомута, центрального волновода и фланца. Корпус входной линии выполнен в виде сборки Г-образной формы из труб: малый вертикальный патрубок посредством лазерной сварки присоединяется к большому; в малый патрубок вставляется посадочная втулка, на которую устанавливается отрезок трубы с встроенным входным ВЧ-разъемом после чего обжимается хомутом. Центральный волновод представляет из себя медную трубу с ответной частью для ВЧ-разъема с одной стороны и коническим элементом с другой стороны. Конический элемент вставляется в ответную часть, распаянную на антенне, и прикручивается к ней центральным винтом с контролируемым усилием затяжки. Такая конфигурация обеспечивает возможность сравнительно простого и быстрого монтажа центральной антенны при подборе и замене диэлектрических вставок. К фланцу прикрепляется винтами антенна, а также на фланце расположены фитинги системы водяного охлаждения антенны. В конце сборки фланец закрывает основной корпус волновода с внешней стороны.

Готовыми компонентами конструкции являются ВЧ-разъемы и трубы волноводов производства COM-TECH серии Rigidline: COM-TECH D-PC130P, D-IC103Q и D-RL103O соответственно. Их выбор обусловлен необходимостью использования доступных стандартных компонентов, наилучшим образом соответствующих по своим характеристикам результатам проектных электродинамических расчетов. Прочие детали прототипа, однако, спроектированы

с целью изготовления из коммерчески доступного материала и заготовок отечественного производства. На этапе производства прототипа предусматривается проведение реверс-инжиниринга готовых изделий для восстановления технологии их производства и последующей локализации с целью снижения связанных рисков.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена концепция мощного объединителя мощности постоянного действия 16:1 и его прототип 4:1. Объединитель основан на волноводе типа WR1800 и оптимизирован для выходной мощности 500 кВт. Вводами в объединитель служат штыревые антенны. Конструкция разработанного объединителя получилась широкополосной, сбалансированной, перестраиваемой и масштабируемой. Данная концепция суммирования мощности дает гибкость в выборе дизайна ускорительных комплексов вне зависимости от частот и мощностей усилителей, которые есть в наличии. Для апробации технологий изготовления и характеристик объединителя был разработан и отдан в производство прототип 4:1.

Дополнительным преимуществом использования такого объединителя вместе с радиальными промежуточными объединителями оказалась очень низкая, почти нулевая, пропускная способность на гармониках рабочей частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rampnoux E., Bousson S., Brault S., Duchesne P., Duthil P., Olry G., Reynet D.* // Proc. of SRF2013. 2013. Paris, France. P. 1069.
2. https://ctd.inp.nsk.su/wiki/images/f/f3/CDR2_ScTau_ru_vol2.pdf
3. <https://ctd.inp.nsk.su/c-tau/>
4. <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MRFE-6VP61K25H.pdf>
5. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MRF1K50N.pdf>
6. *Sharkov G.B., Smirnov A.Yu.* // Proc. Of LINAC2014. Geneva, Switzerland. TUPP137. P. 733.
7. *Goryashko V.A., Dancila D., Rydberg A., Yogi R., Ruber R.* // J. Electromagn. Waves Appl. 2014. V. 28. № 18. P. 2243. <https://doi.org/10.1080/09205071.2014.962187>

РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ БЛОКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМАХ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ¹

© 2025 г. В. В. Парамонов^а, *, А. С. Белов^а

^а *Институт ядерных исследований Российской академии наук
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а*

* *e-mail: paramono@inr.ru*

Поступила в редакцию 05.04.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята к публикации 24.05.2024 г.

Компактные СВЧ-резонаторы предназначены для генерации магнитного ВЧ-поля, индуцирующего ВЧ-переходы между спиновыми состояниями атомов водорода и дейтерия в источниках поляризованных ионов. Резонаторы работают на частоте порядка 380 МГц для поляризованных атомов дейтерия, либо на частоте порядка 1480 МГц для поляризованных атомов водорода. В обоих случаях обеспечивается единая плоскость поляризации частиц. Формируется однородное распределение магнитного ВЧ-поля с минимальной паразитной, перпендикулярной к плоскости поляризации, составляющей. Рассмотрены варианты технической реализации резонаторов.

DOI: 10.7868/S3034564225080129

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускоренные пучки поляризованных протонов и дейтронов используются в исследованиях фундаментальных свойств материи. Эффективность проводимых дорогостоящих экспериментов существенно определяется как интенсивностью, так и степенью поляризации пучков. Пучки с высокой степенью поляризации получают с использованием пространственного разделения атомов различных состояний сверхтонкой структуры (ССС) при прохождении магнитов с неоднородным полем и возбуждением переходов между ССС при прохождении блока ВЧ-переходов (БВЧП).

Частицы пропускаются через статическое магнитное поле, имеющее градиент вдоль оси пучка. В этом поле размещается резонатор, создающий совпадающее по направлению с внешним магнитное ВЧ-поле с частотой, соответствующей разности энергий между спиновыми состояниями. Эффективность адиабатических ВЧ-переходов близка к единице [1].

2. ТРЕБОВАНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Резонатор БВЧП должен обеспечивать возбуждение ВЧ-колебаний с частотой порядка 1480 МГц при работе с атомами водорода и порядка 380 МГц при работе с атомами дейтерия. Длины волн этих колебаний равны примерно 20 см и 79 см соответственно. Резонатор помещается между профилированными полюсами электромагнита, создающего стационарное магнитное поле, и должен иметь весьма малые размеры, по наибольшему измерению существенно меньше четверти длины волны. Естественным решением, позволяющим реализовать резонансную систему в ограниченном объеме и с поперечной составляющей магнитного поля H_x , является использование в резонаторе отрезков двухпроводной линии, в дальнейшем вибраторов, закрепленных одним концом на корпусе резонатора, с разомкнутыми вторыми концами. Для понижения частоты колебаний на разомкнутых концах вибраторов предусматривается сильная емкостная нагрузка. Одно из таких

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск.

устройство, используемое в источнике поляризованных дейтронов [2], схематично показано на рис. 1. Вибраторы выполнены из отрезков плоской линии и в качестве рабочего используется противофазное колебание.

В источниках поляризованных ионов с атомарным пучком могут поочередно генерироваться пучки поляризованных протонов и дейтронов. Для переключения режима работы источника с одномодовым резонатором БВЧП необходима смена этого блока. Для упрощения и сокращения длительности процедуры переключения предложен двухмодовый резонатор [3], показанный на рис. 2. В этой конструкции резонатор содержит две колебательные системы, каждая из которых образована парой цилиндрических вибраторов с укорачивающими емкостями. Для обеих пар вибраторов в качестве

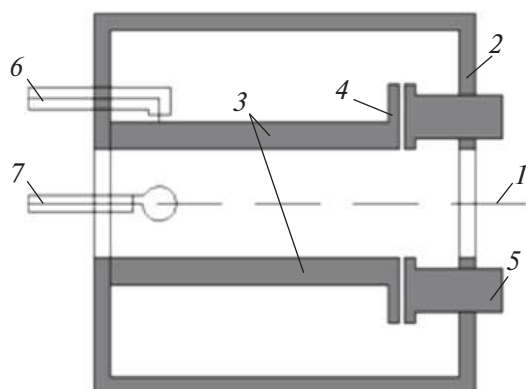


Рис. 1. Схема одномодового резонатора БВЧП [2]: 1 — ось пучка, 2 — корпус резонатора, 3 — вибраторы, 4 — часть вибратора для емкостной нагрузки, 5 — элементы подстройки частоты, 6 — ВЧ-ввод, 7 — измерительная ВЧ-петля.

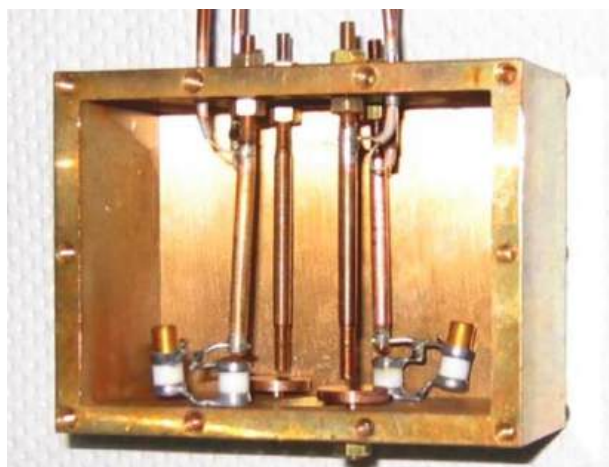


Рис. 2. Двухмодовый резонатор для БВЧП [3].

укорачивающей емкости используются сосредоточенные элементы — конденсаторы. Для обоих колебаний, как низкочастотного с частотой возбуждения около 380 МГц, так и высокочастотного с частотой порядка 1480 МГц, магнитное поле ВЧ-колебаний имеет как параллельную H_x , так и перпендикулярную H_y составляющие по отношению к внешнему магнитному полю. Для достижения максимальной степени поляризации ионов следует обеспечить параллельность магнитного ВЧ-поля стационарному внешнему магнитному полю. Цилиндрическая форма вибраторов ведет к зависимости величины составляющих магнитных полей ВЧ-колебаний от расстояния до оси пучка.

3. РАЗРАБОТАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

3.1. Варианты конструкции резонатора БВЧП

Необходимо сохранить малые размеры резонаторов, поэтому все рассмотренные ниже варианты вписаны в корпус одномодового прямоугольного резонатора, показанного на рис. 1. Длина резонаторов по оси пучка равна 40 мм. Радиус апертуры — внутренний радиус приосевых частей вибраторов — равен 13.5 мм.

Все рассмотренные конструкции симметричны относительно плоскостей $x = 0$ и $y = 0$. Симметрия относительно плоскости $x = 0$, обеспечивая параллельность составляющей H_x ВЧ-колебаний внешнему стационарному магнитному полю, определяет единую плоскость поляризации при использовании БВЧП как для протонов, так и дейтронов. Симметрия относительно плоскости $y = 0$ обеспечивает равенство частот вибраторов в колебательных системах, однородность распределения компоненты H_x и минимальную величину компоненты H_y ВЧ-полей рабочих противофазных колебаний в апертуре резонаторов.

В заданных размерах двухмодовый резонатор с двумя колебательными системами схематично показан на рис. 3. Каждая система образована из двух вибраторов, сформированных из отрезков полосковой линии. Для обеспечения частоты колебаний около 380 МГц без применения сосредоточенных элементов нужны относительно длинные вибраторы. При их размещении приходится использовать все возможное пространство и обеспечивать сильную емкостную нагрузку на разомкнутых концах. Для вибраторов более компактной высокочастотной системы вибраторы

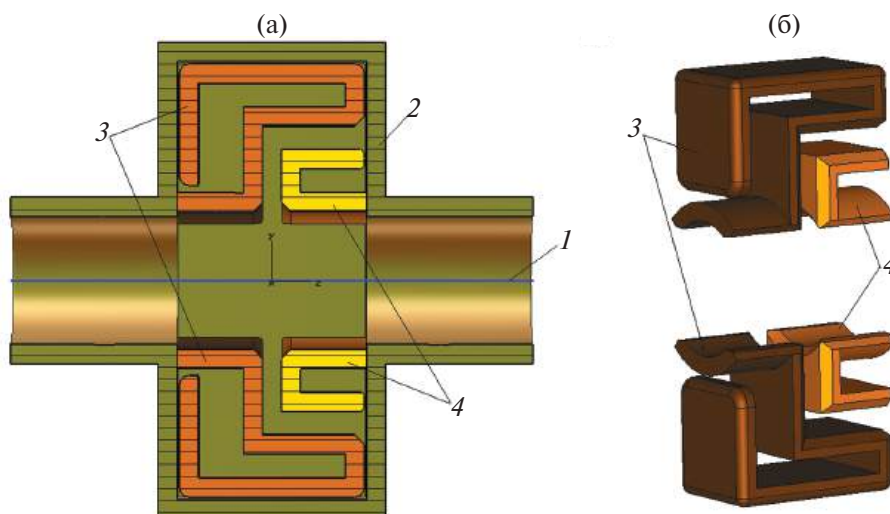


Рис. 3. Первый вариант разработанного двухмодового резонатора: а – резонатор в сборе, б – вибраторы колебательных систем: 1 – ось пучка, 2 – корпус резонатора, 3 – вибраторы низкочастотной системы, 4 – вибраторы высокочастотной системы.

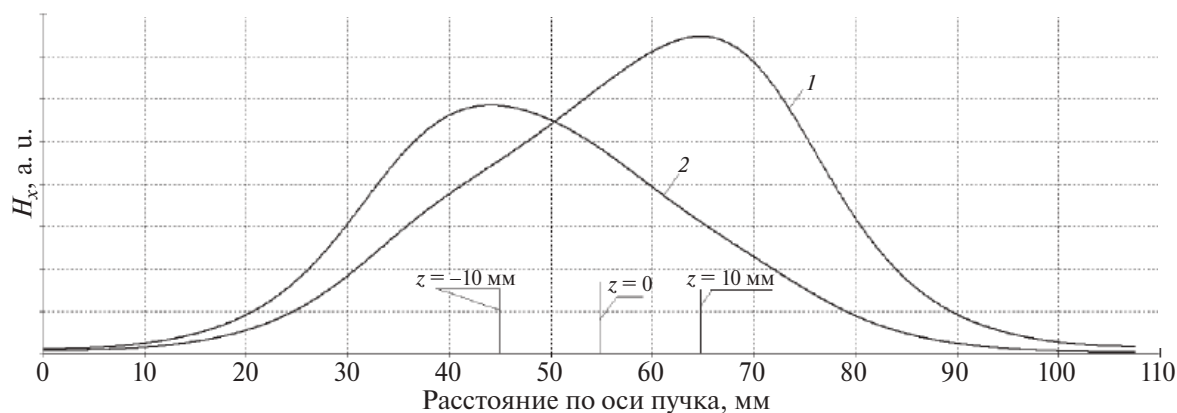


Рис. 4. Распределения компоненты H_x на оси резонатора для высокочастотного (1), и низкочастотного (2) колебаний.

низкочастотной служат как заземление. Распределения составляющих H_x колебаний на оси резонатора показаны на рис. 4.

Прилегающие к области прохождения пучка части поверхностей для обеих систем выполнены в виде вогнутых цилиндрических сегментов (рис. 5). По сравнению с плоской прилегающей поверхностью вибраторов в одномодовом резонаторе (рис. 1) [1] и, особенно, с цилиндрической поверхностью в известном двухмодовом резонаторе (рис. 2) [2] такая конфигурация позволяет получить существенно более равномерное распределение составляющей H_x в апертуре резонатора. Однородность этого распределения во всей апертуре резонатора можно оценить по приведенным на рис. 6 поверхностям уровня величины $|H_x(x, y, z) - H_x(0, 0, z)/H_x(0, 0, z)|\%$. Плоскости $z = -10$ мм и $z = 10$ мм соответствуют максимальным величинам компоненты H_x для низкоча-

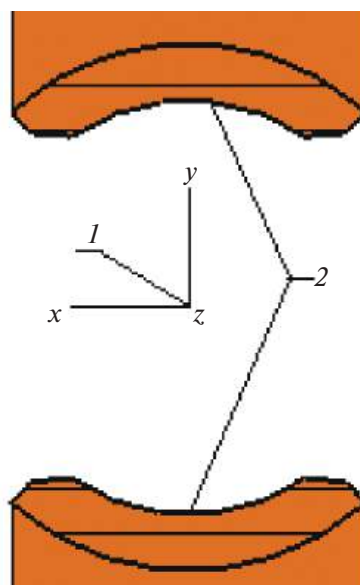


Рис. 5. Форма приосевых частей вибраторов: 1 – ось пучка, 2 – внутренняя часть поверхности вибраторов.

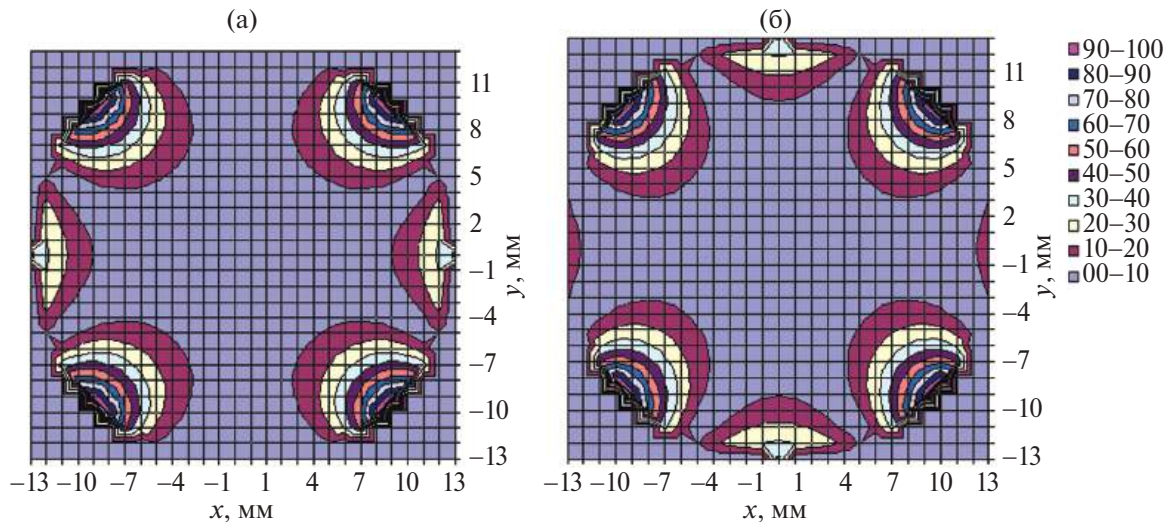


Рис. 6. Контуры линий уровня относительной неоднородности распределения составляющей H_x магнитных ВЧ-полей для низкочастотного (а, $z = -10$ мм) и высокочастотного, (б, $z = 10$ мм) колебаний в апертуре резонатора.

стотного и высокочастотного колебаний соответственно (см. рис. 4). Из приведенных на рис. 6 поверхностей уровня видно, что относительная неоднородность распределения $H_x(x, y, z)$ не более 10% для обоих колебаний обеспечивается в области не менее половины радиуса апертуры.

3.2. Диэлектрические вставки

Для обеспечения нужной емкостной нагрузки вибраторов низкочастотной системы необходимо с высокой точностью обеспечивать при изготовлении и поддерживать при эксплуатации малое расстояние между вибраторами и корпусом резонатора. Необходимость этого устраняется введением в конструкцию пластин из СВЧ-диэлектрика с малым тангенсом угла

диэлектрических потерь. Модификация изображенного на рис. 3 резонатора с двумя колебательными системами при введении пластин диэлектрика показана на рис. 7а для диэлектрика с относительной проницаемостью $\epsilon = 2.7$.

Введение пластин диэлектрика дает дополнительную степень свободы и позволяет реализовать двухмодовый режим только с одной колебательной системой из двух вибраторов (рис. 7б). Для вибратора с одним заземленным и вторым разомкнутым концами отношение частот первого обертона и основного колебания равно примерно 3/1. Это меньше отношения частот 1480 МГц/380 МГц ~ 3.89 для работы с атомами водорода и дейтерия. Но частота первого обертона существенно менее чувствительна к вели-

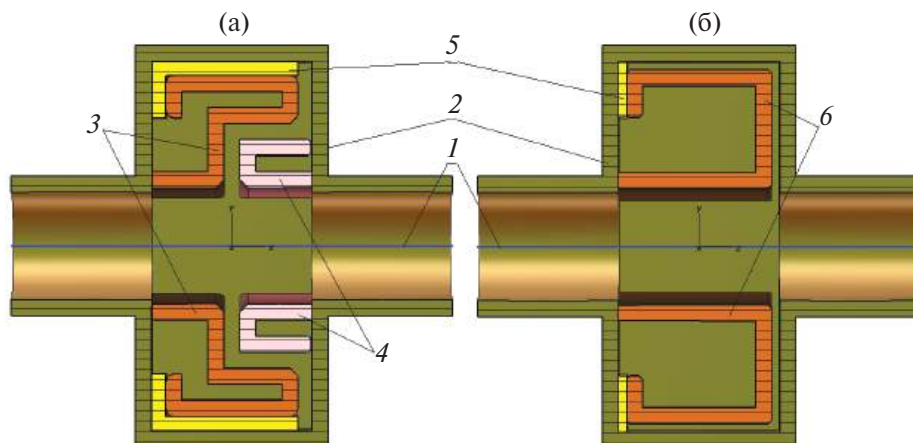


Рис. 7. Резонаторы с пластинами диэлектрика с двумя одноמודовыми колебательными системами (а) или одной двухмодовой (б): 1 – ось пучка, 2 – корпус резонатора, 3 – вибраторы низкочастотной системы, 4 – вибраторы высокочастотной системы, 5 – пластины диэлектрика, 6 – вибраторы двухмодовой системы.

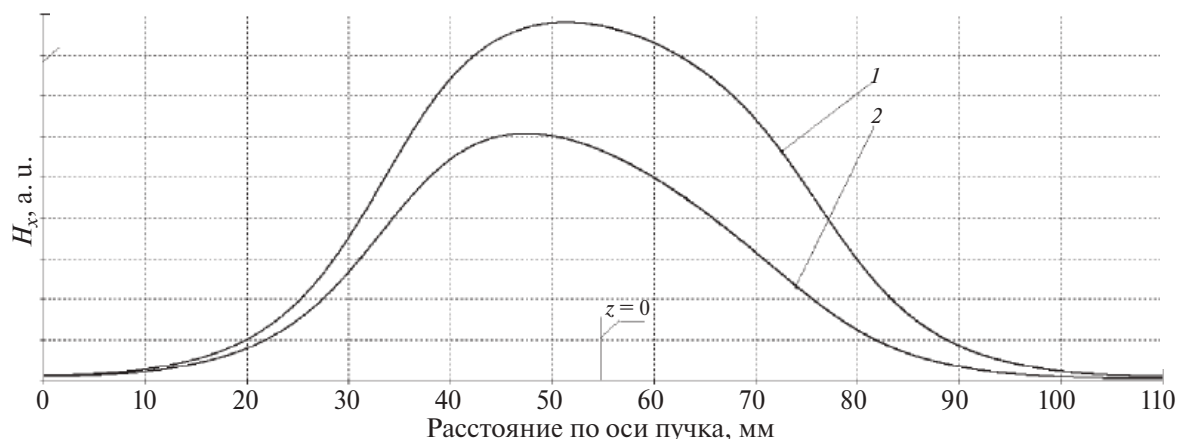


Рис. 8. Распределение компоненты H_x на оси резонатора для основного колебания 1 и первого обертона 2 в системе двухмодовых вибраторов (см. рис. 7б).

чине емкостной нагрузки на открытом конце. Введение пластин диэлектрика на разомкнутом конце увеличивает разделение частот первого обертона и основного колебания. Длина вибратора выбирается для частоты первого обертона немного выше 1480 МГц. Выбором размеров и места расположения пластин диэлектрика на разомкнутом конце достигается частота первого противофазного обертона 1480 МГц и частота основного противофазного колебания 380 МГц. Распределения составляющих H_x настроенных таким образом колебаний показаны на рис. 8.

Для системы двухмодовых вибраторов (рис. 7б) достаточно одной ВЧ-петли ввода и одной сигнальной ВЧ-петли для возбуждения и диагностики обоих ВЧ-колебаний. Введение пластин СВЧ-диэлектрика у разомкнутых концов вибраторов не влияет на равномерность распределений H_x в апертуре резонатора и практически не приводит к снижению ВЧ-эффективности. Технические конструкции рассмотренных резонаторов дополняются четырьмя элементами подстройки частот, а также петлями ВЧ-ввода и сигнальной для двух колебательных систем (см. рис. 3).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены варианты двухмодовых резонаторов для применения в блоке высокочастотных переходов источников поляризованных прото-

нов и дейтронов. Заложенные в конструкцию резонаторов условия симметрии обеспечивают единую плоскость поляризации. Оптимизированной формой вибраторов в области пучка обеспечивается равномерное распределение рабочей составляющей магнитного ВЧ-поля при одновременной минимизации паразитной перпендикулярной составляющей. Таким образом обеспечивается возможность получения максимальной эффективности блока переходов. По габаритам рассматриваемые резонаторы не превышают известные аналоги, превосходя их по эффективности использования ВЧ-мощности.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baumgarten C., Braun D., Court G. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2002. V. 482. P. 606. [http://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01738-7](http://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01738-7)
2. Belov A.S., Donets D.E., Fimushkin V.V., Kovalenko A.D., Kutuzova L.V., Prokofichev Yu.V., Shutov V.B., Turbabin A.V., Zubets V.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 938. P. 012017. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/938/1/012017>
3. Carassiti V., Ciullo G., Lenisa P., Nass A., Steffens E. // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45. P. 283. <http://doi.org/10.1134/S1063779614010171>

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКОВ В ЛЯР ОИЯИ¹

© 2025 г. А. Е. Бондарченко^а, * С. Л. Богомолов^а, А. А. Ефремов^а, В. Н. Логинов^а,
В. Е. Миронов^а, Д. К. Пугачев, А. А. Протасов^а

^а Объединенный институт ядерных исследований, лаборатория ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

* e-mail: bondarchenko@jinr.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Представлены исследования по получению пучков ионов Al и Ti различными методами. Эксперименты проводились с источниками ионов DECRIS-2M и DECRIS-PM на стенде электронно-резонансных источников ионов и на циклотроне ДЦ-280.

DOI: 10.7868/S3034564225080133

1. ВВЕДЕНИЕ

Программа исследований Лаборатории ядерных реакций им. Флерова (ОИЯИ) по синтезу сверхтяжелых элементов и прикладным исследованиям предполагает создание интенсивных ускоренных пучков твердых материалов. Постоянно ведутся разработки по расширению диапазона доступных пучков для физики.

Разработаны несколько методов получения ионов из твердых веществ. Твердые вещества можно испарять из контейнера или индукционной печи, которые вставлены в камеру источника [1, 2]. Тугоплавкие металлы можно распылять ионами плазмы [3] или вводить в плазму с последующим нагревом энергетичными электронами плазмы (метод введения) [4]. Другим способом получения ионов твердых тел является подача в плазму металлоорганического соединения методом MIVOC [5, 6].

Эксперименты по получению пучков ионов Al и Ti проводились на стенде электронно-циклотронных резонансных (ЭЦР) источников ионов и на циклотроне ДЦ-280 с ЭЦР-источниками ионов DECRIS-2M [7] и DECRIS-PM [8] соответственно.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ

Для получения пучка ионов Al из ЭЦР-источников ионов методом испарения необходимая температура находится в диапазоне 1300–1400 °С, при которой Al имеет жидкую фазу. С помощью резистивной [1] и индукционной [9] печей были получены интенсивные пучки ионов Al. Результаты получения ионов Al методом введения (в качестве рабочего вещества использовался стержень Al₂O₃) представлены в [10].

Для экспериментов по получению ионов Al методом введения мы использовали стержни Al₂O₃ и Al. Оба стержня имеют диаметр 4 мм и длину 74 мм. Образец фиксируется на держателе печи с помощью адаптера. Позицией образца относительно плазмы можно было управлять дистанционно. Фото образцов после операции представлено на рис. 1.

В эксперименте в качестве дополнительного газа для обоих образцов использовался кислород. Спектры пучка ионов Al, полученного из образцов Al₂O₃ и Al, представлен соответственно на рис. 2 и 3.

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



Рис. 1. Образцы Al_2O_3 (верхний) и Al (нижний) после эксплуатации.

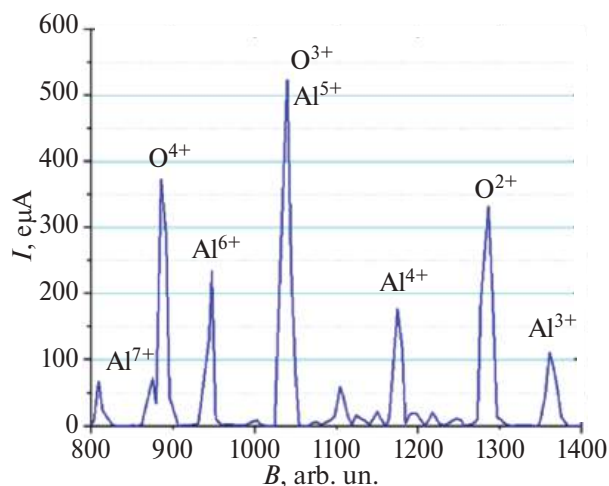


Рис. 2. Спектр ионов алюминия, полученный из образца Al_2O_3 с помощью источника DECRIС-2М на стенде ЭЦР. Настройки источника оптимизированы для получения ионов Al^{6+} при СВЧ-мощности 417 Вт.

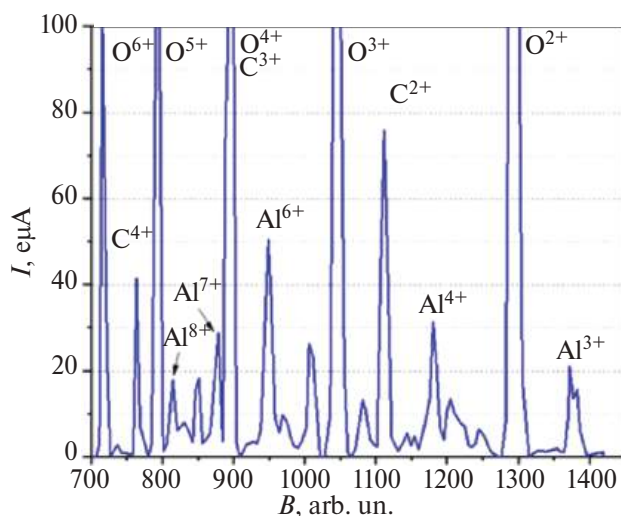


Рис. 3. Спектр ионов алюминия, полученный из образца Al с помощью источника DECRIС-2М на стенде ЭЦР. Настройки источника оптимизированы для получения ионов Al^{6+} при СВЧ-мощности 421 Вт.

На обоих образцах, использованных в эксперименте, работа источника была стабильной и воспроизводимой.

Альтернативным способом получения ионов твердых веществ является использование лету-

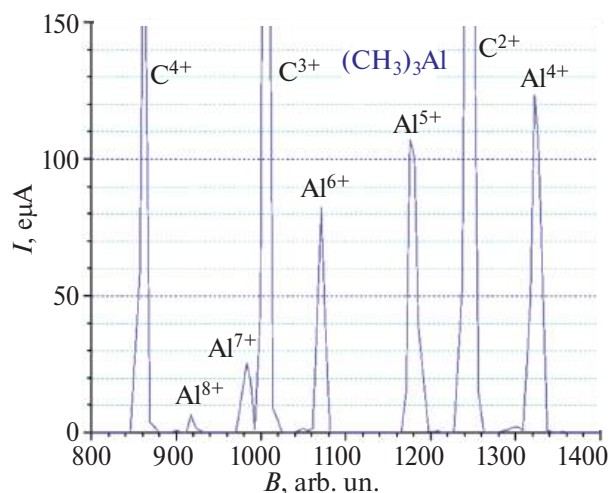


Рис. 4. Спектр ионов алюминия, полученных из соединения $(\text{CH}_3)_3\text{Al}$ с помощью источника DECRIС-2М на стенде ЭЦР. Настройки источника были оптимизированы для получения ионов Al^{6+} при СВЧ-мощности 45 Вт.

чих соединений – MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds). Этот метод успешно использовался для получения ионов B , Fe , Cr , Co , V и др. [6].

Для получения ионов Al использовались соединения триметилалюминия (CAS 75-24-1) – $(\text{CH}_3)_3\text{Al}$. Это вещество представляет собой жидкость с довольно высоким давлением паров – несколько десятков Торр при комнатной температуре и чувствительно к воздуху и влаге, что требует особой осторожности при обращении с составом. Соединение подавалось в источник через регулируемый вручную клапан. Спектр ионов Al представлен на рис. 4. Настройки источника были оптимизированы для получения ионов Al^{5+} .

3. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ ТИТАНА

Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов требуют создания интенсивных пучков ускоренных нейтронно-обогащенных изотопов, таких как ^{50}Ti , ^{58}Fe и ^{64}Ni . Использование новых изотопов для получения ускоренных пучков требует поиска путей оптимизации режима работы ЭЦР-источника и разработки технологии подачи материала.

С использованием метода MIVOC проведено несколько серий длительных экспериментов по спектроскопии сверхтяжелых элементов на циклотроне У-400 с пучком ускоренных ионов $^{50}\text{Ti}^{5+}$. Интенсивность пучка 0.5 пмкА поддержи-

васась на мишени в течение нескольких недель без каких-либо помех [6].

Для экспериментов на циклотроне ДЦ-280 необходимая интенсивность ионов $^{50}\text{Ti}^{10+}$ составляет 5–10 пкА. В ходе экспериментов мы не достигли проектных значений интенсивности пучка ионов титана. В стабильном режиме работы интенсивность пучка ионов $^{50}\text{Ti}^{10+}$ находилась в диапазоне 3–5 пкА [11, 12].

В качестве альтернативного пути мы провели эксперименты по созданию пучка ионов Ti с использованием плазмы SF_6 . Этот метод был успешно использован для получения ионов Ta и Ge [13, 14].

Первый эксперимент был выполнен на стенде с источником DECRIS-2M. В камере источника был установлен тонкий цилиндрический лист из Ti. Сначала источник был запущен в работу на газе Ar, пиков ионов Ti не наблюдалось. Потом

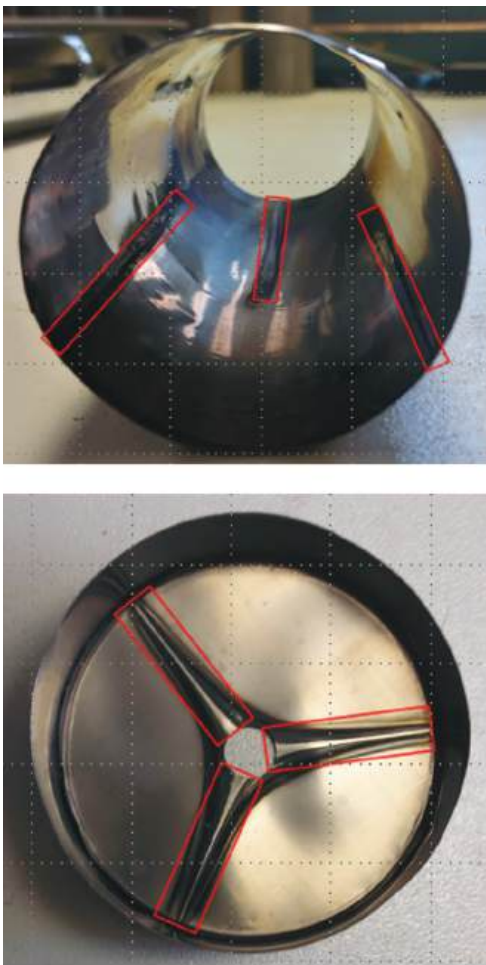


Рис. 5. Титановый цилиндрический лист и крышка. Красными прямоугольниками обозначены зоны эрозии материала после эксплуатации. Расчетная площадь зон эрозии составляет около 5000 мм^2 .

в плазменную камеру вводился элегаз с соответствующим уменьшением потока Ar. Из-за перекрытия пиков ионов S, F, Ar и Ti источник был настроен на Ti^{4+} , что можно четко идентифицировать, интенсивность пучка Ti^{4+} составляла около 150 мкА с достаточно хорошей стабильностью. Затем аналогичный эксперимент был проведен на циклотроне DC-280 с источником DECRIS-PM. В камеру источника устанавливался тонкий цилиндрический лист и крышка со стороны экстракции из Ti (рис. 5).

Источник настроен на Ti^{11+} , который можно четко идентифицировать. Соответствующий спектр показан на рис. 6, интенсивность Ti^{11+} составляет около 70 мкА. После настройки ионы источника Ti^{10+} были ускорены, и выведенный пучок с интенсивностью 32 мкА был получен с хорошей стабильностью.

Для второго эксперимента, выполненного с источником DECRIS-PM, цилиндрический лист и экстракционная крышка были удалены из камеры, а bias-электрод был изготовлен из Ti вместо Al в первом эксперименте диаметром 30 мм (рис. 7).

В этом эксперименте также был получен стабильный пучок ионов Ti от источника с СВЧ-мощностью 227 Вт, но с меньшей интенсивностью — около 30 мкА ионов Ti^{11+} . Коэффициент уменьшения интенсивности Ti^{11+} составляет около 2, но соотношение площадей зон эрозии для двух экспериментов составляет около 20.

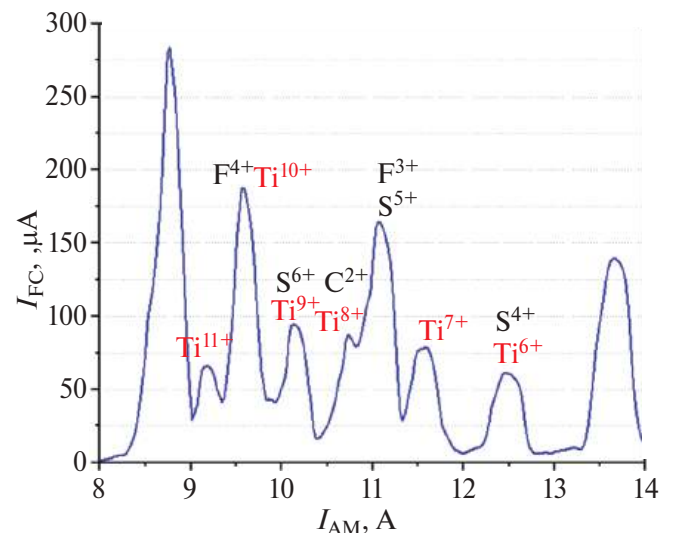


Рис. 6. Спектр ионов титана, полученный с помощью источника DECRIS-PM на циклотроне DC-280. Настройки источника были оптимизированы для получения ионов Ti^{11+} при СВЧ-мощности 278 Вт.

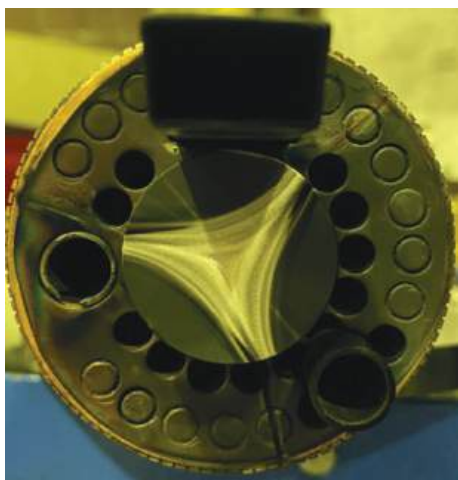


Рис. 7. Bias-электрод из титана. Площадь зоны эрозии (треугольная звезда) оценивается в 250 мм^2 .

Следует отметить, что bias-электрод поддерживается при отрицательном потенциале около 500 В, поэтому во втором эксперименте распыление Ti-электрода может дать вклад в извлекаемый ток.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены несколько методов получения пучка ионов Al. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что наибольший ток ионов Al^{6+} (до 250 мк) получен методом введения с использованием образца Al_2O_3 . Метод надежен, но требует дистанционного контроля положения образца и тщательной настройки. Метод MIVOC для получения ионов Al также показывает довольно хорошие результаты, и, вероятно, настройка сложного потока с помощью дистанционно управляемого клапана может обеспечить более высокий ток. Также мы продемонстрировали возможность получения ионов Ti с использованием элегаза SF_6 . Этот метод обеспечивает интенсивный и стабильный пучок и не требует какого-либо оборудования для испарения твердого металла. Для этого метода необходимо провести оптимизацию положения образца и его поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wutte D., Abbott S., Leitner M.A., Lyneis C.M. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. № 2. P. 521. <https://doi.org/10.1063/1.1425781>
2. Harkewicz R. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. P. 2176. <https://doi.org/10.1063/1.1147033>
3. Harkewicz R., Billquist P., Pardo R. et al., // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 2883. <https://doi.org/10.1063/1.1146501>
4. Ohshiro Y., Yamaka S., Watanabe S. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 02A912. <https://doi.org/10.1063/1.4825076>
5. Koivisto H., Arje J., Nurmi M. // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 785. <https://doi.org/10.1063/1.1148539>
6. Bogomolov S.L., Bondarchenko A., Efremov A. et al. // Phys. Part. Nuclei Lett. 2015. V. 12. № 7. P. 824. <http://doi.org/10.1134/S1547477115070043>
7. Bondarchenko A.E., Bogomolov S., Efremov A. et al. // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 307. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB37>
8. Bogomolov S.L., Bondarchenko A., Efremov A. et al. // Phys. Part. Nuclei Lett. 2018. V. 15. № 7. P. 878. <http://doi.org/10.1134/S1547477118070191>
9. Lu W., Feng Y.C., Guo J.W. et al. // Proc. ECRIS'20. East Lansing, MI, USA. 2020. P. 65. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ECRIS2020-TU-WZO03>
10. Nakagawa T., Yano Y. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. P. 637. <https://doi.org/10.1063/1.1150335>
11. Bogomolov S.L., Bondarchenko A., Efremov A. et al. // Proc. ECRIS'20. East Lansing, MI, USA. 2020. P. 43. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ECRIS2020-MOZZO01>
12. Pugachev D.K., Bogomolov S., Bondarchenko A. et al. // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 303. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB36>
13. Saitoh Y., Ohkoshi K., Yokota W. // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 703. <https://doi.org/10.1063/1.1148569>
14. Leherissier P., Barue C., Canet C. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 2003. V. 211. P. 274. [http://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01213-8](http://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01213-8)

УДК 621.384

СОЗДАНИЕ КАНАЛОВ ПУЧКОВ ИОНОВ УГЛЕРОДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ И ПРЕДКЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70¹

© 2025 г. В. И. Гаркуша^{а,*}, С. В. Иванов^а, В. А. Калинин^а, А. В. Максимов^а,
А. М. Маркин^а, Ф. Н. Новоскольцев^а, В. А. Пикалов^а, А. П. Солдатов^а, Р. Ю. Синюков^а

^а Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142280, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

* e-mail: Valeriy.Garkusha@ihep.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024 г.

После доработки 28.02.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

Представлена магнитооптическая схема канала транспортировки пучков ионов углерода $^{12}\text{C}^{+6}$ в зону радиобиологических исследований. Приведены результаты замедления ионов углерода в ускорителе У-70 от 455 до 200 МэВ/нуклон и вывода пучка из У-70. Рассмотрена схема формирования равномерного дозового поля с помощью вертикального и горизонтального вобблер-магнитов.

DOI: 10.7868/S3034564225080144

1. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире для лечения онкологических заболеваний широко применяются методы лучевой терапии. Однако накопленный клинический опыт свидетельствует о существовании определенных типов опухолей, резистентных к воздействию электронных и гамма-лучей. Для эффективной терапии таких опухолей наиболее подходящим инструментом являются ускоренные ионы углерода.

В течение длительного времени в ИФВЭ проводятся исследования по использованию пучков ионов углерода $^{12}\text{C}^{+6}$, выведенных из ускорителя У-70. Для проведения прикладных радиобиологических исследований функционирует временный радиобиологический стенд (РБС), на котором работают специалисты из Пущино и Обнинска. Транспортировка пучка в зону РБС осуществляется по каналу № 25.

Канал № 25 формирует пучок ионов с равномерным дозовым полем больших поперечных размеров. Для более эффективного лечения онкологических больных предпочтительнее

использование узкого пучка (pencil-beam), что может быть реализовано на ускорительном комплексе ИФВЭ в новом канале № 26.

ИФВЭ является единственным научным центром в России, использующим пучки ионов углерода для радиобиологических и медицинских исследований. Даже в мировом масштабе число таких центров крайне ограничено, в то время как потребность в них неуклонно растет.

2. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СХЕМА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ИОНОВ УГЛЕРОДА

Магнитооптический канал транспортировки пучка ионов углерода в радиобиологическую зону состоит из:

- группы отклоняющих магнитов CM_{34} , OM_1 , OM_2 , OM_3 ;
- квартета квадрупольных линз Q_1-Q_4 (диаметр апертуры 75 мм);
- триплета квадрупольных линз Q_5-Q_7 (диаметр апертуры 100 мм);
- вертикального и горизонтального вобблер-магнитов.

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

На рис. 1 представлен канал транспортировки выведенного пучка. Территориально канал состоит из двух частей. В кольцевом зале У-70 после магнита OM_3 размещены четыре квадрупольные линзы (квартет). Далее за биологической защитой У-70 размещен триплет квадрупольных линз, вобблер-магниты системы формирования равномерного дозового поля. Зона радиобиологических исследований отделена от зоны канала бетонной стенкой толщиной 1 м.

На расстоянии 6 м от последней линзы на входе в бетонную стенку установлен коллиматор, через 2.5 м от стенки находится изоцентр радиобиологической установки (центр поворотного стола). Расстояние от септум-магнита SM_{34} до изоцентра составляет примерно 34 м. Вакуум (порядка 10^{-2} мм рт. ст.) обеспечивается до последней квадрупольной линзы, на последнем участке от линзы до изоцентра (длина около 9 м) пучок транспортируется по воздуху.

3. ЗАМЕДЛЕНИЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА В У-70

Пучок ионов углерода, предварительно ускоренный в линейном ускорителе И-100 до энергии 16.7 МэВ/нуклон, инжектируется в бустерный синхротрон, где происходит его дальнейшее ускорение до 455 МэВ/нуклон и затем сгусток ионов переводится из бустера в основной синхротрон У-70.

Для проведения радиобиологических исследований в широкой области энергий энер-

гия ионного пучка может быть уменьшена до 200 МэВ/нуклон. Это достигается соответствующей процедурой замедления ионов углерода в синхротроне У-70 с обеспечением энергий 400, 350, 300, 250 и 200 МэВ/нуклон (активное замедление). Промежуточные значения энергий получаются с помощью дегрейдера непосредственно в канале транспортировки (пассивное замедление). На рис. 2 приведен пример активного замедления пучка до энергии 200 МэВ/нуклон.

Интенсивность ионного пучка при инъекции в У-70 составляет $(3-6) \cdot 10^9$ ионов/цикл. Доля оставшегося пучка после замедления до 300 МэВ/нуклон составляет около 80 %, до 200 МэВ/нуклон примерно 50–60 %.

4. ВЫВОД ИОНОВ УГЛЕРОДА ИЗ У-70

Для вывода ионного пучка применяется классическая двухступенчатая схема вывода Пиччиони–Райта [1] (рис. 3). В соответствии с этой схемой в 28-м прямолинейном промежутке ускорителя У-70 установлена внутренняя мишень (ВМ). Используется набор из 6 мишеней из бериллия длиной от 4.51 до 1.37 мм для вывода ионного пучка в диапазоне энергий соответственно от 455 до 200 МэВ/нуклон.

Наведение пучка на мишень осуществляется посредством шумовой (стохастической) раскачки амплитуд горизонтальных бетатронных колебаний циркулирующего пучка [2]. В процессе наведения циркулирующего пучка на мишень частицы, попавшие в мишень, испы-

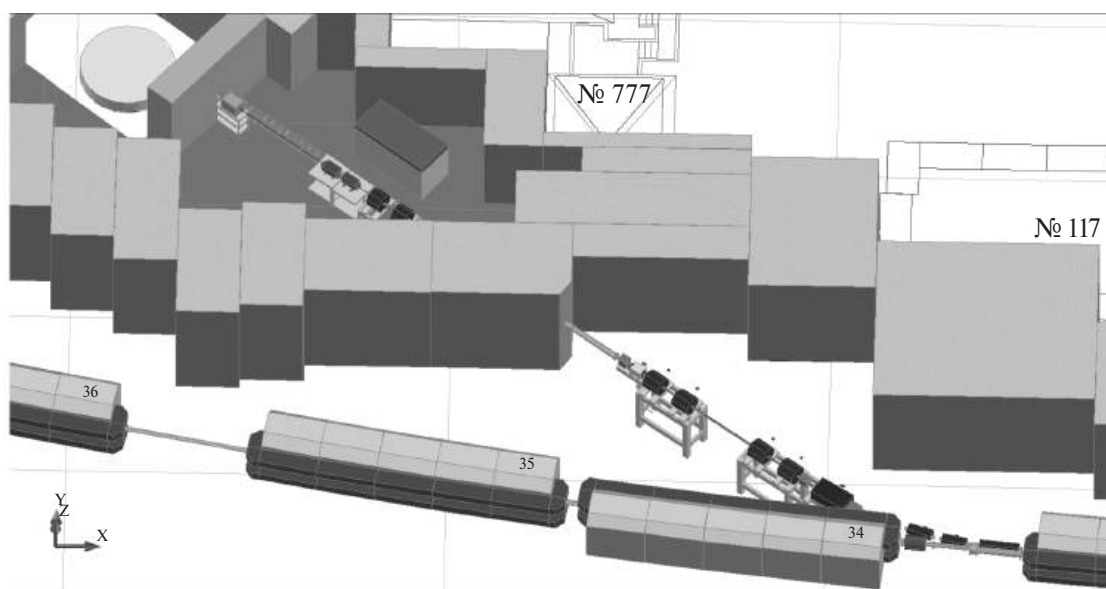


Рис. 1. Схема магнитооптического канала для вывода ионного пучка.

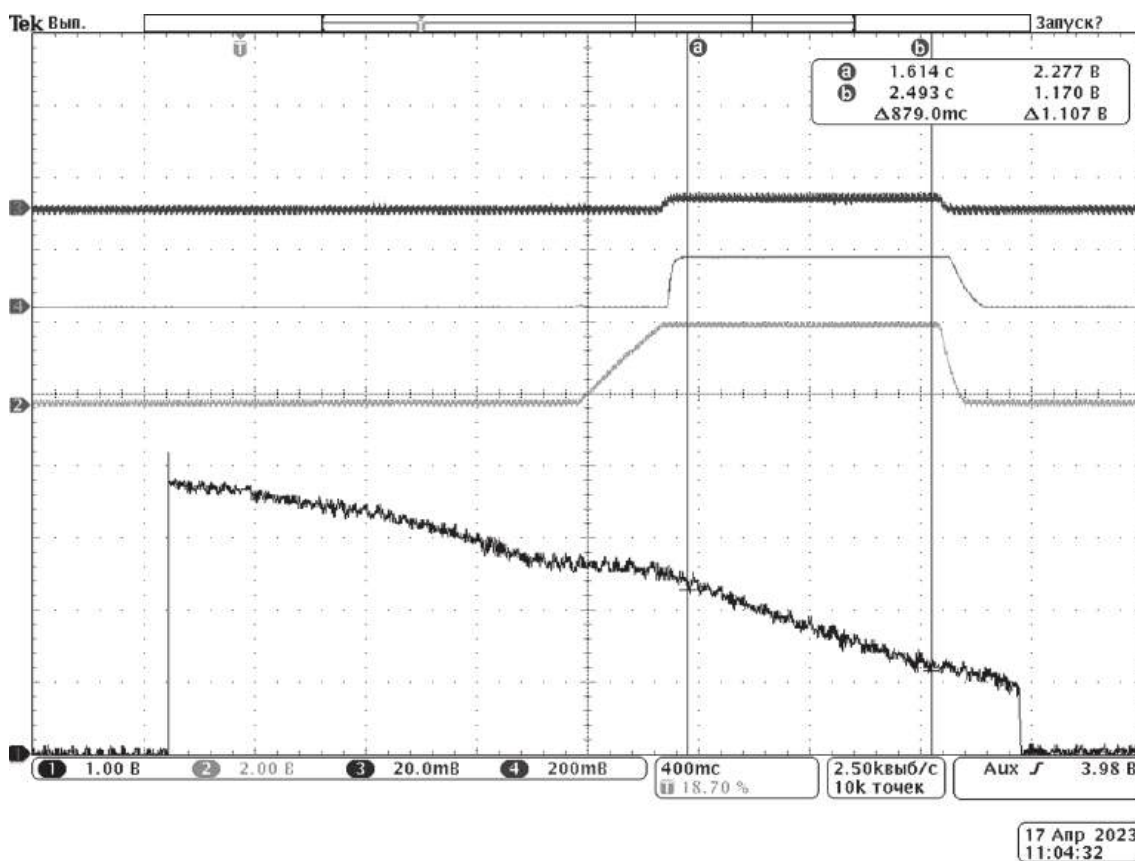


Рис. 2. Замедление ионов углерода в У-70 до энергии 200 МэВ/нуклон: лучи 1, 2 – токи бампов 24/30 и 32/38; луч 3 – ток септум-магнита SM_{34} ; луч 4 – интенсивность циркулирующего пучка.

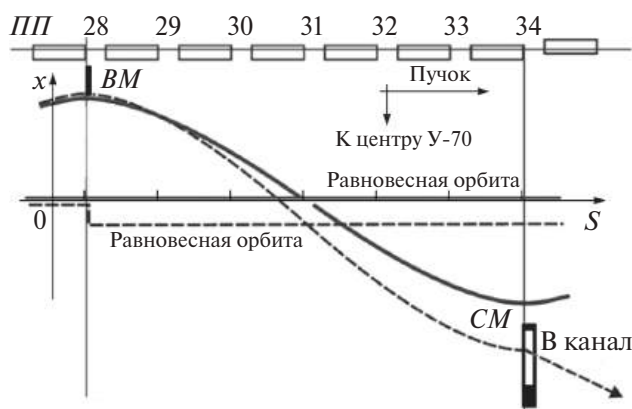


Рис. 3. Принципиальная схема вывода пучка из ускорителя У-70 (ПП – прямолинейный промежуток, ВМ – выводная мишень, СМ – септум-магнит).

тывают ионизационные потери энергии, причем для всех режимов вывода импульс частиц после прохождения через мишень уменьшается примерно на 0.7%. Вышедшие из мишени частицы совершают бетатронные колебания относительно новой смещенной внутрь кольца равновесной орбиты. Через половину длины волны

бетатронных колебаний далее по ходу пучка пространственное разделение между выводимой частью и циркулирующим пучком становится достаточным для размещения тонкой перегородки септум-магнита. В этом месте (начало 34-го прямолинейного промежутка) размещен септум-магнит SM_{34} .

5. ФОРМИРОВАНИЕ РАВНОМЕРНОГО ДОЗОВОГО ПОЛЯ

Для медицинского и радиобиологического применения пучков ионов углерода необходимо использовать специальные технологии, позволяющие формировать достаточно широкое и однородное поле облучения, покрывающее биологический объект должным образом как в поперечном, так и в продольном направлении. В нашем случае для формирования дозовых полей должной однородности применяется растровое сканирование широким пучком (диаметром 60–90 мм в зависимости от энергии пучка).

Сканирующая система состоит из горизонтального и вертикального вобблер-магнитов,



Рис. 4. Вобблер-магниты и стойки источников питания (справа).

источников питания к ним и контроллера управления. На рис. 4 приведено фото вобблер-магнитов и стоек источников питания. Параметры вобблер-магнитов приведены в табл. 1.

Сканирующая система позволяет обеспечить зону облучения более $100 \times 100 \text{ мм}^2$ с равномерностью не хуже 94–95 %.

Таблица 1. Параметры вобблер-магнитов

Параметр	Значение
Длина, м	0.50
Апертура $H \times V$, мм (горизонтальный магнит)	110×75
Число витков $H \times V$	3×6
Максимальное поле, Тл	0.2
Скорость сканирования, мм/мс	20
Индуктивность, мкГн	430
Сопротивление обмотки, мОм	8

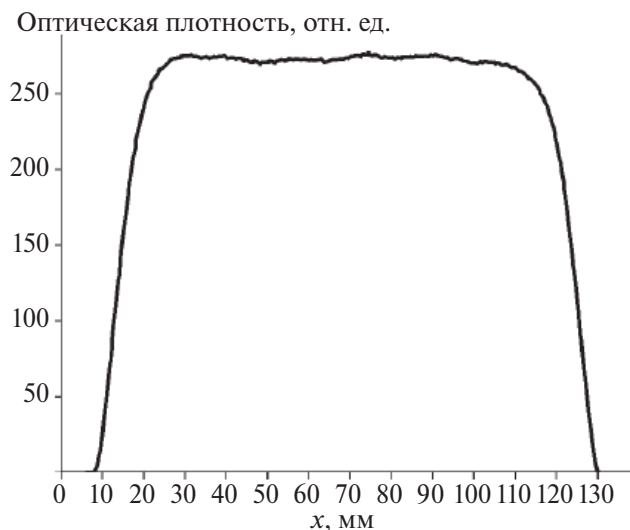


Рис. 5. Дозовое распределение в вертикальной плоскости перед изоцентром.

На рис. 5 представлено дозовое распределение плотности ядер углерода в радиохромной дозиметрической пленке GafChromic EBТ3 [3, 4] в центре пучка перед изоцентром в вертикальной полосе шириной 0.34 мм.

6. ПРОЕКТ РАЗВИТИЯ КАНАЛОВ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ИФВЭ

Дальнейшее развитие проводимых исследований, а также применение полученного углеродного пучка для целей ионной лучевой терапии связано с планами создания на ускорителе У-70 канала № 26 и специализированной медицинской зоны.

Схема расположения канала № 26 и медицинской зоны с двумя процедурными кабинетами в экспериментальном зале У-70 приведена на рис. 6. Пучок может быть поочередно направлен в одну из двух процедурных кабин, причем для первой из них предусмотрена также подача пучка под углом 30° в вертикальной плоскости (на рис. 6 этот участок канала изображен повернутым на 90°).

При разработке магнитооптической системы канала был реализован модульно-функциональный принцип построения оптики канала с локальным подавлением дисперсии на каждом участке [5].

Начальный участок канала, находящийся в кольцевом зале У-70, включает в себя пять квадрупольных линз, две из которых являются общими с каналом № 25, а также два отклоняющих магнита, отворачивающих пучок от направления канала № 25 на угол 30° . В направлении канала № 26 обеспечивается компенсация дисперсии, создаваемой выводными магнитами, и согласование параметров выведенного пучка с оптической системой последующих участков канала.

Для транспортировки пучка на горизонтальных участках канала используется периодическая система из квадрупольных линз с набегом фазы $\pi/2$ на периоде длиной 6 м. Это обеспечивает транспортировку пучка с небольшими относительно апертуры квадрупольных линз размерами в обеих поперечных плоскостях и компенсацию дисперсии, создаваемой магнитами, поворачивающими весь канал на угол 112° в направлении медицинской зоны, а также разделяющими канал на два направления к изоцентрам T_1 и T_2 .

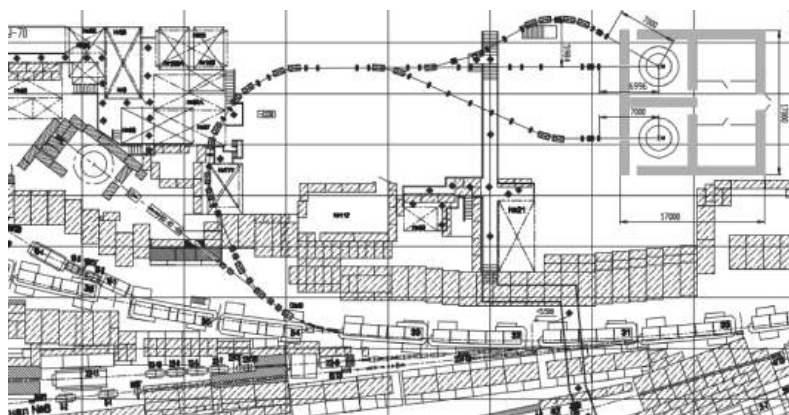


Рис. 6. Схема расположения канала № 26 и медицинской зоны в экспериментальном зале У-70. (РБС – радиобиологический стенд).

На вертикальном участке канала для обеих групп магнитов компенсация дисперсии осуществляется с помощью полевых квадрупольных линз, расположенных на равных расстояниях от центров поворота, а для передачи пучка от первой группы магнитов ко второй используется триплет квадрупольных линз. Это позволяет существенно сократить продольные и вертикальные размеры этого участка, а также количество используемых квадрупольных линз.

Окончательная фокусировка пучка перед изоцентром осуществляется компактными триплетами квадрупольных линз. Перед каждой терапевтической установкой предусмотрен свободный от магнитооптического оборудования промежуток длиной 7 м, необходимый для размещения сканирующей системы и диагностического оборудования.

Всего для создания канала требуется 20 отклоняющих магнитов и 51 квадрупольная линза. Особенности конструкции трех отклоняющих магнитов и соответствующих вакуумных камер должны позволить использовать их для разделения трассы канала на отдельные участки. Из общего количества квадрупольных линз девять с диаметром апертуры 100 мм задействованы на начальном участке канала и в объективах, фокусирующих пучок на мишенях. На остальных участках канала применяются квадрупольные линзы с диаметром апертуры 75 мм.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена магнитооптическая схема канала транспортировки пучка ионов $^{12}\text{C}^{+6}$ для проведения радиобиологических исследований. Приведены результаты замедления ионов углерода с энергиями от 455 до 200 МэВ/нуклон

в ускорителе У-70 и вывода пучка из него. Сканирующая система, состоящая из вертикального и горизонтального вобблер-магнитов, позволяет обеспечить зону равномерного дозового поля диаметром более 100 мм с требуемым уровнем равномерности. Создание канала № 26 позволит отработать и внедрить перспективную методику лечения пучком ионов углерода наиболее сложных (радиорезистентных) онкологических новообразований, а также выработать оптимальные технические и медицинские требования к типовому ионному центру для разработки и тиражирования в России.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Проект “Реконструкция здания 1БВ и здания 8 с целью создания экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем ускорительном комплексе У-70, г. Протвино, Московская область” выполняются в рамках Государственной программы научно-технологического развития Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piccioni O., Clark D., Cool R., Friedlander G., Kassner D. // Rev. Sci. Instruments. 1955. V. 26. P. 232. <https://doi.org/10.1063/1.1771259>
2. Иванов С.В., Лебедев О.П. // ПТЭ. 2013. № 3. С. 5.
3. Sorriaux J., Kacperek A., Rossomme S. et al. // European Journal of Medical Physics. 2013. V. 29. P. 599. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.10.001>
4. <http://www.gafchromic.ru/docs/EVT3-3.pdf>
5. Гаркуша В.И., Запольский В.Н., Иванов С.В., Карташев В.П., Солдатов А.П. Магнитооптическая система медицинского канала ионов углерода на ускорителе У-70. Препринт ИФВЭ 2022-10. Протвино, 2022.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.3.038.616

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА НАКОПИТЕЛЯ-
ОХЛАДИТЕЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА¹

© 2025 г. Ю. А. Роговский^{a, b, *}, Е. А. Бехтенов^{a, b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 690090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 690090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

* e-mail: rogovsky@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.03.2024 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 24.05.2024 г.

Проведена калибровка электростатических датчиков положения пучка двух типов. Сигналы с электродов преобразованы в координаты пучка при помощи нелинейного полиномиального преобразования, коэффициенты которого рассчитаны по методу наименьших квадратов. Это позволило измерять положение пучка с точностью лучше требуемой величины – 0.1 мм для однократного пролета пучка. Осуществлена привязка механического центра датчиков к внешним геодезическим знакам. Результат калибровки был использован при работе со всеми датчиками в кольце накопителя-охладителя, исходя из предположения о том, что все они изготовлены с одинаковой механической точностью. Это позволило измерять параметры пучка с лучшей точностью, чем до проведения калибровки.

DOI: 10.7868/S3034564225080158

1. ВВЕДЕНИЕ

Электростатические датчики положения пучка накопителя-охладителя инжекционного комплекса [1, 2] в ИЯФ были спроектированы, изготовлены и установлены на кольце накопителя в конце 90-х годов прошлого века. С тех пор не осталось детальной информации о производимой калибровке каждого датчика перед установкой в вакуумную камеру. Однако в наличии остались два запасных датчика разной формы, которые было решено использовать для калибровки исходя из предположения о том, что все они (16 шт. в накопителе) изготовлены с одинаковой механической точностью, с одинаковой пространственной геометрией электродов.

До проведения калибровки положение пучка электронов восстанавливалось с применением линейных формул (1), (2), в которых в качестве масштабных коэффициентов были использованы

характерные размеры вакуумной камеры в месте установки датчиков. Это позволило измерять относительные смещения пучка или вычисление частот бетатронных колебаний, но совсем не подходило для прецизионных измерений, где требуемая точность составляет порядка 0.1 мм. Результат калибровки планируется использовать при работе с остальными датчиками в кольце накопителя-охладителя.

2. ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Электростатический датчик положения пучка (пикап, pickup) представляет собой систему электродов, гальванически изолированных между собой и изолированных от стенок вакуумной камеры [3]. Обычно у датчика имеется не менее четырех электродов, и пролетающий сквозь него внутри вакуумной трубы пучок наводит электрические потенциалы на каждом

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



Рис. 1. Пикап на накопительном кольце: эллиптический (слева), круглый (справа).

из электродов. Измеряя напряжение на каждом электроде (относительно земли), можно определить координату пролетевшего пучка.

На рис. 1 изображен электростатический датчик положения пучка, который используется для измерения координат пучка на каждом последовательном обороте. В кольце накопителя-охладителя ИК установлено 16 электростатических датчиков, являющихся основным источником информации о положении пучка в вакуумной камере [4].

3. ЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ

Для определения координат пучка удобно поместить ось декартовой системы координат в точку, где находится механический центр пикапа, и пронумеровать каждый электрод в соответствии с четвертью декартовой системы координат, в которой он находится. Обозначим как s_1, s_2, s_3, s_4 напряжения, наведенные на соответствующий электрод относительно земли. Интуитивно понятно, что если пучок находится в верхней полуплоскости, то s_1 и s_2 должны быть больше, чем s_3 и s_4 . Аналогично, если пучок имеет координату $x > 0$ то s_1 и s_4 будут превышать s_2 и s_3 . Тогда можно ввести так называемые электрические координаты (h, v) , где h (horizontal) – горизонтальное электрическое положение пучка, а v (vertical) – вертикальное электрическое положение пучка. Далее удобно выбрать h и v следующим образом:

$$\begin{aligned} h &= (s_1 - s_2 - s_3 + s_4)/s, \\ v &= (s_1 + s_2 - s_3 - s_4)/s, \\ s &= s_1 + s_2 + s_3 + s_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где $s = (s_1 + s_2 + s_3 + s_4)$ – суммарный сигнал для нормировки.

Для датчика повернутого на угол $\pi/4$ более удобной будет пара переменных h' и v' , определенная следующим образом:

$$\begin{aligned} h' &= (s_1 - s_3)/(s_1 + s_3), \\ v' &= (s_2 - s_4)/(s_2 + s_4). \end{aligned} \quad (2)$$

При малых отклонениях x и y от нуля (амплитуда колебаний и положение равновесной орбиты порядка нескольких миллиметров или меньше) справедливо линейное приближение: $x = ah, y = bv$. При больших смещениях пучка от центра датчика вычисление координаты пучка по формулам выше может давать значительную ошибку, вызванную нелинейностью датчика.

На рис. 2 красными точками показаны положения пучка в узлах прямоугольной сетки, а синим точками показаны вычисленные по формулам (1) с масштабными коэффициентами (a, b) , подобранными так, чтобы вычисленное положение пучка вблизи центра датчика хорошо совпадало и измерениями. Видно проявление нелинейности уже при отклонениях порядка 5 мм, а также “подушкообразное” искажение при приближении к электроду пикапа.

На момент запуска накопителя-охладителя пикапы были калиброваны в линейном приближении с применением формул $x = ah$ и $y = bv$, поэтому для улучшения системы диагностики и уменьшения ошибок измерения координат была проведена нелинейная полиномиальная калибровка.

Исходные данные для рис. 2 получены при калибровке датчика положения пучка, о которой будет подробно рассказано далее.

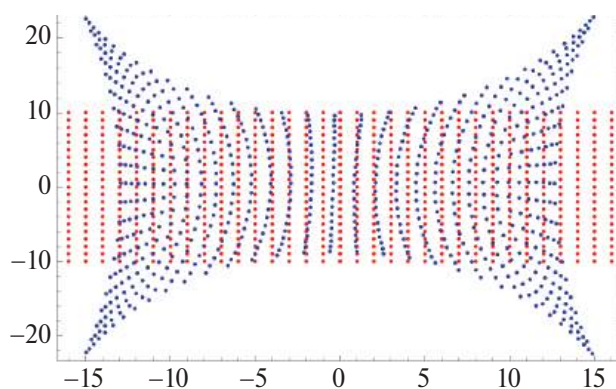


Рис. 2. Положение пучка в пикапе в линейном приближении.

4. НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ

Чтобы расширить рабочую область датчика, в которой сохраняется линейность, составим полиномиальное преобразование вида (тут $0 \leq i, j \leq N$, где N – максимальная степень полинома):

$$\begin{aligned} x(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} \cdot h^i \cdot v^j, \\ y(h, v) &= \sum_i \sum_j b_{ij} \cdot h^i \cdot v^j. \end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов полиномиального разложения будем рассматривать величины h и v и их различные степени как независимые величины. Тогда задача может быть сведена к задаче о линейной регрессии. Рассмотрим систему уравнений для восстановленных горизонтальных координат x^{rec} , где ε – все высшие члены полиномиального разложения (пока мы не определяем их точно), которые далее отбросим:

$$\begin{aligned} x_1^{\text{rec}}(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} h_i^i v_1^j + \varepsilon_1, \\ x_2^{\text{rec}}(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} h_2^i v_2^j + \varepsilon_2, \\ &\dots \\ x_m^{\text{rec}}(h, v) &= \sum_i \sum_j a_{ij} h_m^i v_m^j + \varepsilon_m. \end{aligned} \quad (4)$$

Система для y^{rec} выглядит аналогично с точностью до замены a_{ij} на b_{ij} . Тогда воспользуемся удобной матричной формой записи:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix},$$

$$\widehat{\mathbf{W}} = \begin{pmatrix} 1 & h_1 & h_1^2 & \dots & v_1 & v_1^2 & \dots & h_1 \cdot v_1 & \dots & h_1 \cdot v_1^2 & \dots & h_1^3 v_1^2 & \dots \\ 1 & h_2 & h_2^2 & \dots & v_2 & v_2^2 & \dots & h_2 \cdot v_2 & \dots & h_2 \cdot v_2^2 & \dots & h_2^3 v_2^2 & \dots \\ & & & \dots & & & & & & & & & \dots \\ 1 & h_m & h_m^2 & \dots & v_m & v_m^2 & \dots & h_m \cdot v_m & \dots & h_m \cdot v_m^2 & \dots & h_m^3 v_m^2 & \dots \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{kk} \end{pmatrix}.$$

Максимальная степень полинома $N = (i + j)$. Подбирая ее, можно добиться разной степени точности, с которой наше разложение воспроизводит экспериментальные данные. Число членов в полиномиальном разложении равно k . Число уравнений m соответствует количеству

различных точек, в которых происходило изменение величин x, y, h, v . Для случая y^{rec} имеем вектор коэффициентов $\widehat{\mathbf{V}}$.

В матричной форме вся система уравнений будет выглядеть как $\mathbf{X} = \widehat{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{A}$ и $\mathbf{Y} = \widehat{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{B}$. Используя метод наименьших квадратов, получим, что оптимальные значения коэффициентов \mathbf{A}^{opt} и \mathbf{B}^{opt} могут быть найдены следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{\text{opt}} &= (\widehat{\mathbf{W}}^T \widehat{\mathbf{W}})^{-1} \widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{X}, \\ \mathbf{B}^{\text{opt}} &= (\widehat{\mathbf{W}}^T \widehat{\mathbf{W}})^{-1} \widehat{\mathbf{W}}^T \mathbf{Y}, \end{aligned} \quad (5)$$

где величины x_i, y_i, h_i, v_i являются измеримыми.

Для экспериментального построения нелинейного преобразования сигналов от пикапа к координатам пролетающего сгустка можно последовательно помещать источник сигнала в известные точки внутри пикапа x_i и y_i , а по измеренным сигналам от электродов можно получить величины h_i и v_i , и тогда по формулам (5) можно вычислить коэффициенты преобразования.

5. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью специального стенда в ИЯФ СО РАН [5] была проведена калибровка двух датчиков эллиптической и круглой формы. Схема стенда изображена на рис. 3. Исследуемый датчик жестко закрепляется на неподвижном столике. На подвижную антенну (диаметром 5 мм) с генератора подается синусоидальный сигнал с частотой 3 МГц и амплитудой 1 В. Подвижный столик перемещается при помощи шаговых двигателей (ШД X, ШД Y), с помощью которых центр антенны можно позиционировать в узлах декартовой сетки с точностью до 2–3 мкм. Напряжения s_1, s_2, s_3, s_4 на электродах датчика измеряются на пикап-станции (электроника стенда) с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Была проведена серия калибровочных измерений в области $\Delta x \times \Delta y = 40 \times 40 \text{ мм}^2$ для круглого датчика и $\Delta x \times \Delta y = 32 \times 20 \text{ мм}^2$ для датчика эллиптической формы.

В ходе калибровки было исследовано, как ведет себя ошибка восстановления координат в зависимости от максимальной степени полиномиального преобразования для датчиков разной формы. Определим ошибку калибровки в точке (x_m, y_m) следующим образом:

$$\delta_m = \sqrt{(x_m^{\text{rec}} - x_m^0)^2 + (y_m^{\text{rec}} - y_m^0)^2}, \quad (6)$$

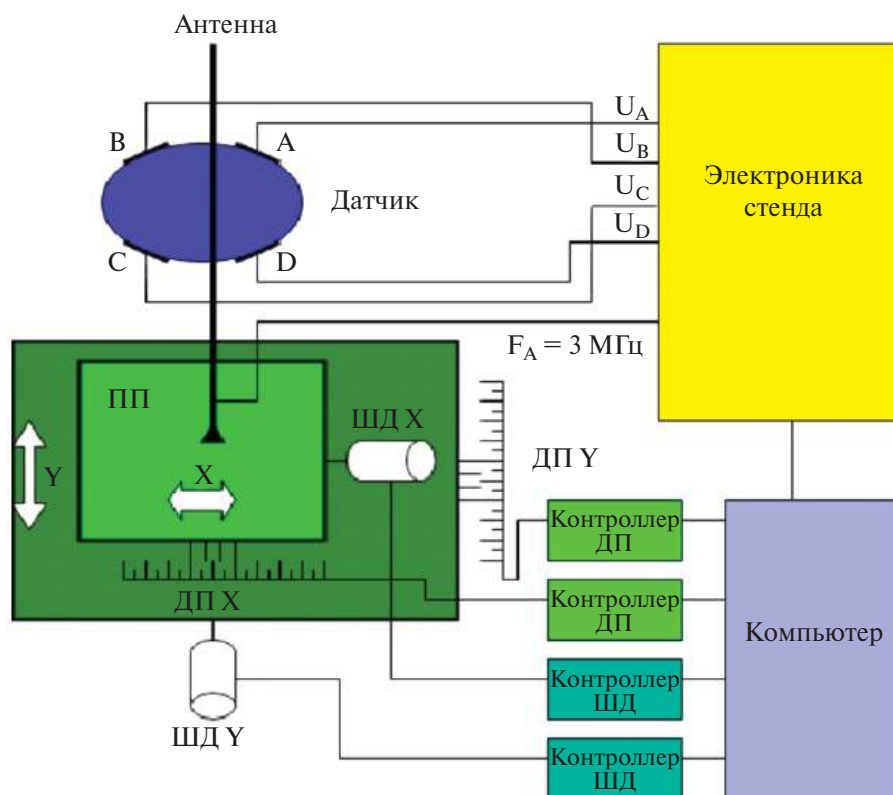


Рис. 3. Схематическое изображение измерительного стенда.

где (x_m^0, y_m^0) – положения антенны в момент измерения (узлы декартовой сетки). Тогда средняя ошибка калибровки для M калибровочных точек может быть определена следующим образом:

$$\delta = \sum_m \delta_m = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sqrt{(x_m^{rec} - x_m^0)^2 + (y_m^{rec} - y_m^0)^2}. \quad (7)$$

Заметим, что средняя ошибка будет возрастать при увеличении размеров области, в которой перемещается антенна. Понятно, что такой нежелательный эффект появляется из-за того, что близкие к электродам точки имеют боль-

шую δ_m , именно такие точки дают значительный вклад в среднюю ошибку. Сравнение ошибки для разных калибровочных площадей приведено на рис. 4: для области 32×20 мм² (слева), для области 20×20 мм² (справа) эллиптического датчика.

На рис. 5 показано поведение средней ошибки для датчиков разной формы в зависимости от максимальной степени полинома: красные точки – для круглого датчика, синие точки – для датчика эллиптической формы. Заметим, что средняя ошибка δ сильно уменьшается при

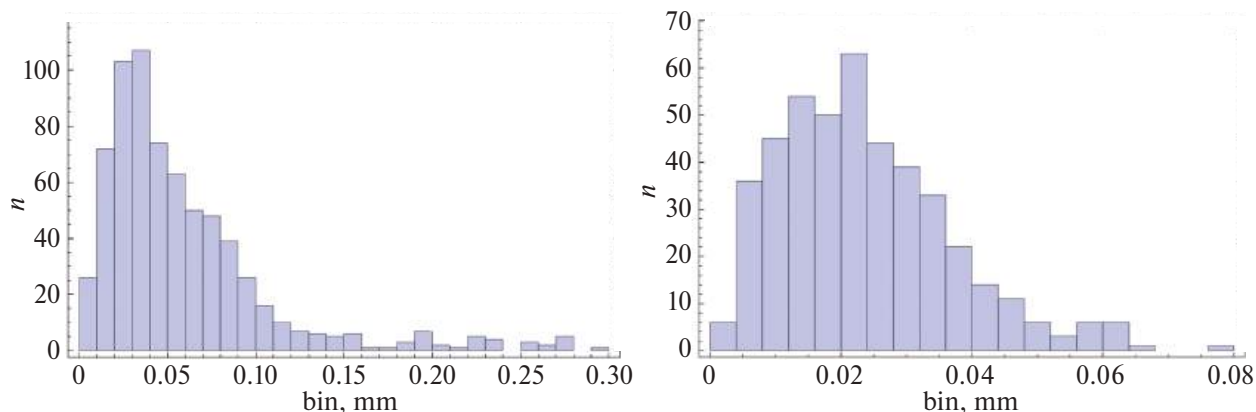


Рис. 4. Гистограмма ошибки определения координаты.

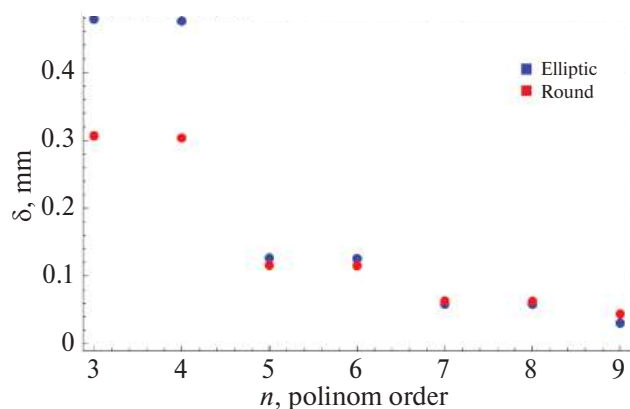


Рис. 5. Средняя ошибка восстановления координаты при калибровке.

переходе с четной на нечетную степень, а не наоборот. Это объясняется тем, что калибровочное преобразование должно быть нечетной функцией по h и v .

Полиномиальное преобразование с 7-й степенью было выбрано как оптимальное, так как при переходе с 7-й на 9-ю степень ошибка уменьшается не более чем в полтора раза, а количество коэффициентов сильно возрастает, что ухудшает быстродействие расчетов. Для эллиптического пикапа в таком случае средняя ошибка восстановления координаты составляет по абсолютному значению около 50 мкм, для круглого около 80 мкм. Само же полиномиальное преобразование для двух датчиков приведено в табл. 1, 2.

Таблица 1. Коэффициенты полиномиального разложения при степенях h и v

Датчик	Круглой формы		Эллиптической формы	
	A^{opt}	B^{opt}	A^{opt}	B^{opt}
Полиномиальный член				
1	0.80597	-0.672278	0.330479	-0.480214
H	21.2324	0.149678	11.944	-0.188307
h^2	-0.187386	-0.335632	0.12393	0.806753
h^3	10.1779	0.153259	12.9732	0.346029
h^4	0.215058	0.346976	-0.37967	-0.92824
h^5	-10.1409	-0.607003	-24.3921	-0.230889
h^6	-0.50895	-0.695091	0.819445	0.626938
h^7	13.3358	-0.17372	37.3839	0.275377
v	-0.30566	21.2576	-0.269354	24.9339
v^2	0.063335	-0.00843348	-0.523961	-1.41018
v^3	0.86871	9.49248	0.0865769	32.4984
v^4	0.300523	0.730036	1.00278	-3.42326
v^5	-3.12408	-8.30805	0.314004	65.3245
v^6	-0.159042	-0.502069	0.102949	-1.60618
v^7	3.67172	11.7417	-2.70468	38.7775

Таблица 2. Коэффициенты полиномиального разложения при смешанных степенях h и v

Датчик	Круглой формы		Эллиптической формы	
	A^{opt}	B^{opt}	A^{opt}	B^{opt}
hv	-0.706011	0.201741	0.514765	-1.64831
h^2v	0.389029	17.0454	0.650838	37.9993
h^3v	2.30553	-0.265489	0.832079	3.49761
h^4v	-2.20344	-33.2647	-0.583907	36.3651
h^5v	-4.79066	0.356866	0.608058	-2.77524
h^6v	3.32789	40.9357	0.441795	-21.1242
hv^2	18.178	-0.368745	-16.8744	-0.0759034
h^2v^2	0.78504	2.99317	1.53288	5.07361
h^3v^2	-63.3138	0.972817	19.3575	0.0155894
h^4v^2	2.69276	-8.56937	1.27002	4.93759
h^5v^2	100.623	-1.49321	-21.6283	-0.257526
hv^3	1.41763	-0.152582	0.855161	-2.03374
h^2v^3	-2.23193	-58.7074	-1.08868	-94.1008
h^3v^3	-8.76335	3.78318	-1.0991	3.86928
h^4v^3	3.12021	135.537	-0.652904	90.3764
hv^4	-36.6924	1.6943	23.2286	0.326715
h^2v^4	3.54978	-6.96035	-1.53116	6.15944
h^3v^4	141.806	-3.63064	35.3388	0.748685
hv^5	-1.6927	1.6877	-0.0340528	-1.22195
h^2v^5	3.0338	95.9189	3.58527	-122.039
hv^6	43.8307	-3.23372	-14.3055	-0.28814

6. ПОИСК МЕХАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ДАТЧИКА

При проведении калибровки точка $(0, 0)$ декартовых координат, вообще говоря, не совпадает с механическим центром датчика, так как система координат привязана к столу стенда, а не к пикапу. Учитывать сдвиг сетки необходимо по той причине, что датчик в дальнейшем устанавливается в кольцо ускорителя соосно вакуумной трубе (ось пикапа проходит через его механический центр). Определим механический и электрический центры поворотного датчика положения пучка следующим образом.

- Механический центр – точка, определяемая геометрией, физический центр. Например, для датчика идеально круглой формы механический центр – центр окружности.

- Электрический центр – точка, определяемая электростатическими свойствами (преимущественно электродами). А именно: точка, в которой $s_1 = s_2 = s_3 = s_4$ и, как следствие, $h = v = 0$. Тогда координатами электрического центра должны быть a_{00} и b_{00} – коэффициенты при нулевых степенях h и v калибровочного полиномиального преобразования.

В идеальном случае оба центра должны совпадать, но в реальности это не так: при изготовлении

пикапа могут быть механические ошибки, смещающие электрический центр. В этом случае точно определить координату электрического центра можно тоже из калибровки. Для поиска механического центра необходимо провести уже серию минимум из трех калибровочных измерений.

1. При зафиксированном положении № 1 датчика на столе стенда, проводятся калибровочные измерения для 15–20 точек положения антенны в центральной области, из которых можно получить координату электрического центра для первого положения датчика в положении № 1 (x_1, y_1).

2. При измененном положении № 2 датчика (осуществлен поворот пикапа на произвольный угол φ , например 100°) выполняем калибровочные измерения, из которых определяется координата электрического центра для повернутого датчика в положении № 2 (x_2, y_2).

3. Снова повернем пикап на произвольный угол φ , зафиксируем датчик в положении № 3, выполним калибровочные измерения, из которых вновь определим электрического центра для повернутого датчика в положении № 3 (x_3, y_3).

Точки (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) образуют треугольник, который можно описать окружностью. Теперь заметим, что в положениях № 1–3 механический центр находится в одном и том же месте, а его координата совпадает с координатой центра описанной окружности.

Используя уравнение описанной окружности, получаем координаты механического центра:

$$x_0 = \frac{1}{D} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & y_3 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$y_0 = \frac{1}{D} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}, \quad D = \det \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix}.$$

В результате несложных вычислений было получено, что для эллиптического датчика абсолютный сдвиг нуля калибровочной сетки составлял 1.06 мм, а для круглого – 0.22 мм. Соответ-

ствующие сдвиги нуля по осям учтены также в результирующих величинах a_{00} и b_{00} нашего полиномиального преобразования электрических сигналов в координаты.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была проведена калибровка пикапов для кольца накопителя-охлаждителя инжеционного комплекса с применением нелинейного полиномиального преобразования. Предложен метод определения механического центра датчика с точностью не хуже, чем проведенная калибровка в целом, что позволило построить преобразование относительно механического центра датчика, а значит, привязать координаты пучка к внешним реперам (геодезическим знакам, вакуумной камере). Ранее для этих датчиков использовалась только линейная калибровка, что ограничивало возможности системы диагностики кольца, особенно при смещении положения пучка более чем 10 мм. Полученные результаты позволяют ожидать, что точность восстановления координаты по измеренным сигналам будет не хуже 20–30 мкм при однократном измерении, однократном пролете пучка сквозь датчик. Далее точность будет заметно выше при усреднении полученной координаты на протяжении нескольких тысяч оборотов пучка в накопителе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maltseva Yu.I., Andrianov A.V., Astrelina K.V. et al. // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUA02>*
2. Физический проект комплекса ВЭПП-5. Препринт ИЯФ СО РАН. 1995.
3. *Смалюк В.В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. ISBN 978-5-98901-063-9. Параллель, 2009.
4. *Bekhtenev E.A., Bolkhovitianov D.Yu., Dementev E.N. et al. // Proc. RuPAC'2006. Novosibirsk, Russia. 2006.*
5. *Бехтенева Е.А.* Частное сообщение. 01.05.2016.

УДК 621.384.665

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ¹

© 2025 г. Н. А. Винокуров^{a, c, *}, Ш. Б. Лачынов^{a, c}, Д. А. Никифоров^{a, b}, В. Г. Ческидов^a

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

^c Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

* e-mail: nikolay.vinokurov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.12.2023 г.

После доработки 19.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

Рассмотрен проект источника рентгеновского излучения высокой яркости с низким (на порядок меньшим, чем в существующих и строящихся источниках) энергопотреблением. Такой качественный выигрыш достигается за счет применения новых технологий. Магнитная система электронного накопителя, которая в существующих источниках использует электромагниты, построена на основе постоянных магнитов из сплава неодим–железо–бор. Кроме нулевого потребления электроэнергии, магнитная система на постоянных магнитах обеспечивает высокую стабильность параметров излучения, так как магнитное поле в ней никогда не выключается.

DOI: 10.7868/S3034564225080163

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники рентгеновского излучения используются во многих областях науки и медицины. Для большинства пользователей требуется достаточная для их задач интенсивность излучения в заданном диапазоне длин волн на образце или входном окне экспериментальной станции. Кроме того, обычно требуется малая угловая расходимость излучения в каждой точке образца (равная поперечному размеру источника излучения, деленному на расстояние от источника до образца). Поэтому хороший источник излучения не только должен быть достаточно мощным, но и иметь малые поперечные размеры. В этом случае говорят, что источник имеет высокую яркость, которая определяется как мощность излучения, деленная на площадь (источника или коллимирующего отверстия) и на телесный угол, в котором идут лучи. Сейчас наиболее яркими лабораторными источниками рентгеновского

излучения являются пучки электронов высокой энергии, проходящие через сильное поперечное магнитное поле и испускающие так называемое синхротронное излучение (СИ), а также лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Для создания таких источников может быть использован электронный пучок с малыми (менее 0.1 мм) поперечными размерами, циркулирующий в специальной установке – электронном накопителе. Далее описан возможный вариант такого накопителя.

С учетом того, что планируемые сейчас источники СИ будут работать через 10–20 лет, желательно существенно изменить (улучшить) их по сравнению с существующими. Это возможно, если применять новые технические решения и технологии. Кроме того, для источника излучения, ориентированного на работу с исследовательским университетом, т.е. на эксперименты в очень разных областях науки и медицины, необходимо обеспечить возможность получения фотонов с различными энергиями – от вакуумного ульт-

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

трафиолета (5 эВ) до жесткого рентгена (100 кэВ) и одновременной работы многих пользователей на соответствующих экспериментальных станциях. Сейчас в мире работает много (в России — всего 3) источников рентгеновского излучения, использующих электронные накопители.

Предлагаемый проект имеет шесть существенных отличий, которые позволят сделать установку с уникальными параметрами и возможностями для проведения экспериментов с использованием излучения и тем самым вернуть России лидерство в этой области техники:

1. Наиболее яркими источниками рентгеновского излучения являются лазеры на свободных электронах. ЛСЭ на предлагаемом накопителе позволит получать когерентное излучение с длиной волны порядка 10 нм и средней мощностью до 100 Вт. По-видимому, возможно получение излучения с относительной спектральной шириной порядка 10^{-4} и меньше. Сейчас рентгеновских ЛСЭ с такими параметрами и аналогичных проектов нет. ЛСЭ будет единственным в мире ЛСЭ в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне на электронном накопителе.

2. Современные сверхпроводящие магниты позволяют получать магнитные поля 20 Тл и более. Однако для того, чтобы излучение в таком магните не приводило к росту поперечного размера электронного пучка, следует создавать такое высокое поле на минимально возможной длине. Для этого в проекте используются магниты с полем 16 Тл и эффективной длиной менее 0.1 м. При энергии электронов 1.5 ГэВ критическая энергия фотонов СИ в поле 16 Тл составляет 24 кэВ (в будущем возможно повышение поля в таких магнитах до 20 Тл). Это значит, что на таком источнике можно получать значительные потоки фотонов с энергиями вплоть до 100 кэВ, что достаточно для большинства из современных методик использования СИ. Конструкция магнитной системы накопителя обеспечивает малые (менее 0.1 мм) размеры электронного пучка в магнитах-излучателях.

3. Для достижения стабильности положения источника (т. е. электронного пучка) в магнитной системе накопителя не используются стандартные несверхпроводящие электромагниты с железными сердечниками. Вместо них применяются постоянные магниты и несколько сверхпроводящих магнитов с источником бесперебойного питания. Это исключает зависимость положения пучка от нестабильности электри-

ческой сети и вибраций, вызванных течением воды в обмотках электромагнитов. Кроме того, использование постоянных магнитов позволяет увеличить апертуру вакуумной камеры, что значительно упрощает вакуумную систему накопителя (не надо заботиться о гладкости, простые приемники СИ и откачка вблизи них, простые стыки отдельных кусков) и систему инжекции (можно установить инфлектор в квадрупольной линзе, увеличивается поперечный акцептанс, что облегчает многократную инжекцию), а также повышает пороговые токи неустойчивостей.

4. Для получения большого пикового и среднего токов электронного пучка предполагается применить низкочастотную ускоряющую систему с третьей гармоникой (например, 30 и 90 МГц). Это увеличит длину электронных сгустков, что позволит сузить спектральную ширину линии излучения ЛСЭ, подавить внутривидовое рассеяние (эффект Тушека) и повысить пороговые токи неустойчивостей.

5. В качестве ондулятора ЛСЭ и ондуляторов, расположенных в малых прямолинейных промежутках, будут использованы недавно разработанные и испытанные в ИЯФ СО РАН ондуляторы с переменным периодом. По сравнению со стандартными ондуляторами с переменной амплитудой поля они обеспечивают больший диапазон перестройки длины волны излучения.

6. Накопитель и пользовательские станции могут быть размещены в одном стандартном промышленном здании и потребляют относительно мало (около 2 МВт) электроэнергии, что сильно снижает стоимость установки.

Широкий диапазон доступных для пользователей параметров излучения, малая потребляемая мощность (из-за использования постоянных магнитов) и относительно низкая стоимость (из-за использования стандартного промышленного здания, постоянных магнитов и низкой энергии электронов) делают перспективным строительство подобных установок в федеральных университетах РФ.

2. ВЫБОР ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Спектрально-угловая плотность потока фотонов СИ равна [1]

$$\left. \frac{d^2 N_p}{d\theta d\psi} \right|_{\psi=0} \left[\frac{\text{фотон}}{\text{с} \cdot \text{мрад}^2} \right] = 1.33 \cdot 10^{13} E^2 [\text{ГэВ}] I [\text{А}] H_2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) 10^3 \frac{\Delta\omega}{\omega}, \quad (1)$$

где E – энергия электронов, I – ток пучка, ω – угловая частота излучения,

$$\hbar\omega_c [\text{кэВ}] = 0.665E^2 [\text{ГэВ}]B [\text{Тл}] \quad (2)$$

– критическая энергия фотонов, B – индукция магнитного поля,

$$H_2(x) = x^2 K_{2/3}^2\left(\frac{x}{2}\right) \approx \pi x e^{-x} \left(1 + \frac{49}{162x} + \dots\right), \quad (3)$$

$K_{2/3}$ – функция Макдональда. Заметим, что $H_2(4) \approx 0.25$, поэтому даже для энергии фотона, в четыре раза превышающей критическую, поток фотонов не мал.

В современных сверхпроводящих магнитах достигнуто поле более 20 Тл, а для генерации СИ использовались вигглеры с полем до 10 Тл. Поэтому предполагается разработать поворотный магнит с полем 16 Тл и эффективной длиной менее 0.1 м. Тогда при энергии электронов 1.5 ГэВ формула (2) дает критическую энергию 24 кэВ, что позволяет проводить эксперименты с энергиями фотонов до 100 кэВ. Таким образом, энергии 1.5 ГэВ достаточно, чтобы перекрыть практически весь диапазон энергий, используемых в экспериментах на СИ. Угол поворота магнита составит 0.3 радиана, что позволит установить 6 станций, использующих излучение двух таких магнитов. При горизонтальной бета-функции 0.1 м и горизонтальном эмиттансе 1 нм горизонтальный среднеквадратичный размер электронного пучка в магните составит 10 мкм, что вполне подходит большинству пользователей, так как соответствующий угловой размер источника на расстоянии, например, 30 м составит 0.3 мкрад. Существенным преимуществом СИ перед излучением из ондулятора является гораздо большая угловая расходимость $1/\gamma = 0.3$ мрад, что обеспечивает равномерное освещение полосы высотой 20 мм на расстоянии 30 м от источника.

3. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитовакуумная система накопителя состоит из двух длинных прямолинейных промежутков и двух полуколец. Регулярные части полукольца состоят из одинаковых пар поворотных магнитов – дефокусирующего и фокусирующего. Дефокусирующий магнит поворачивает электроны с энергией 1.5 ГэВ на угол 9.5° , а фокусирующий – на угол 2° . Таким образом, каждое полукольцо накопителя представляет собой последовательность поворотов на 7.5°

с фокусирующей системой ФОДО и средним радиусом 26.55 м. Конструкция поворотных магнитов будет описана отдельно. Основные параметры поворотных магнитов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры поворотных магнитов

Магнит	Фокусирующий	Дефокусирующий
Угол поворота при энергии электронов 1.5 ГэВ	-2°	9.5°
Магнитное поле, Тл	-0.4	1
Фокусирующий градиент, Тл/м	13.7	-5
Магнитная длина, м	0.436	0.829
Вертикальная апертура, мм	50	46
Длина, м	0.57	0.9
Ширина, м	0.3	0.313
Высота, м	0.64	0.64
Масса, кг	600	1000

4. ПАРАМЕТРЫ НАКОПИТЕЛЯ

Расчетный горизонтальный эмиттанс в накопителе с такими магнитами составляет 0.5 нм, энергетический разброс 0.07%, а потери энергии за один оборот 123 кэВ. Коэффициент расширения орбит равен $0.75 \cdot 10^{-3}$. Он имеет “неестественный” отрицательный знак. Тогда для стабилизации дипольной моды поперечной неустойчивости типа голова-хвост требуется не положительный, как обычно, а отрицательный хроматизм $\xi = dQ/d \ln E$, где Q – бетатронная частота. Это значительно снижает величины секступольных коррекций, необходимых для компенсации относительно большого (как и во всех накопителях с малым эмиттансом) отрицательного линейного хроматизма, и, следовательно, увеличивает динамическую апертуру.

Такая магнитная система (рейстрек с фокусирующими поворотными магнитами) не нова. Она давно и успешно используется в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН на электронных накопителях ВЭПП-3 и ВЭПП-4. Применение системы с магнитами, поворачивающими электроны в разные стороны, позволит ослабить линейный хроматизм и получить отрицательный коэффициент расширения орбит. Последнее еще силь-

нее уменьшает необходимые секступольные коррекции, что должно существенно повысить динамическую апертуру. Этому же способствует последовательное расположение одинаковых суперпериодов с относительно малыми набегамии бетатронных фаз, что приводит к взаимной компенсации возмущений движения от секступольных полей в суперпериодах.

5. ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В одном из прямолинейных промежутков накопителя может быть установлен ЛСЭ ультрафиолетового диапазона.

Длина волны излучения ЛСЭ (вынужденного ондуляторного излучения) зависит от периода ондулятора λ_u и энергии электронов E как (см. [2, 3])

$$\lambda = \lambda_u \frac{1 + K^2}{2\gamma^2}, \quad (4)$$

где $\gamma = E/mc^2$ – полная энергия электрона, нормированная на его энергию покоя,

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi mc^2}, \quad (5)$$

e – заряд электрона, B – магнитное поле на оси спирального ондулятора либо среднеквадратичное поле на оси плоского ондулятора.

Электронный КПД (доля энергии электронов, преобразуемая в энергию излучения) ЛСЭ относительно низок (обычно не более 1%). Поэтому в самом начале развития работ по ЛСЭ было предложено использовать один и тот же электронный пучок многократно, установив ЛСЭ в прямолинейный промежуток электронного накопителя, как это показано на рис. 1.

После прохождения через ондулятор ЛСЭ электроны, отдавшие часть энергии, проходят

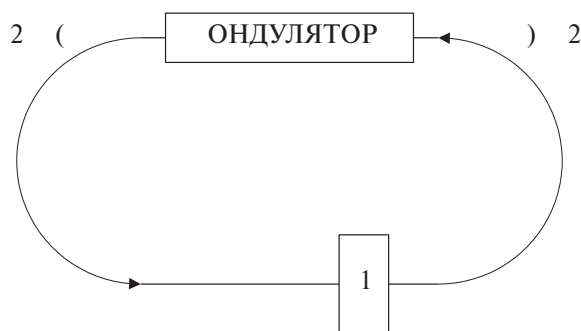


Рис. 1. Лазер на свободных электронах, установленный на электронный накопитель: 1 – высокочастотный резонатор, восполняющий потери энергии электронов на излучение, 2 – зеркала ЛСЭ.

через поворотные магниты накопителя и возвращаются в ЛСЭ, где снова усиливают излучение. Однако при каждом взаимодействии с излучением в ЛСЭ одни частицы ускоряются, а другие – замедляются. В результате при каждом проходе через ЛСЭ нарастает энергетический разброс электронного пучка. Средние потери энергии электронами восполняются высокочастотным резонатором с продольным электрическим полем, но рост энергетического разброса сильно ограничивает среднюю мощность излучения ЛСЭ на накопителе. Максимальное достигнутое значение этой величины не превышает нескольких ватт.

Механизм основного ограничения мощности ЛСЭ на электронном накопителе был теоретически изучен [4, 5] еще до создания первых ЛСЭ такого типа. С одной стороны, увеличение разброса приводит к снижению усиления ЛСЭ и стабилизации генерируемой мощности на уровне, при котором усиление излучения за один проход через ЛСЭ равно потерям излучения за один проход оптического резонатора. С другой стороны, радиационное затухание синхротронных колебаний в накопителе постоянно снижает энергетический разброс. В результате устанавливается некоторый равновесный энергетический разброс электронов и соответствующая ему средняя мощность излучения ЛСЭ.

Поскольку скорость радиационного затухания растет с ростом энергии электронов в накопителе, для увеличения мощности излучения ЛСЭ следует повышать энергию [6]. При заданной длине волны излучения при увеличении энергии электронов надо увеличивать период и поле ондулятора, чтобы выполнялось следующее из (4) соотношение:

$$\lambda_u (1 + K^2) = 2\gamma^2 \lambda. \quad (6)$$

Все ранее построенные ЛСЭ на накопителях работали в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах. Это было связано с отсутствием зеркал с высоким коэффициентом отражения для высоких частот. Кроме того, для получения достаточно высокого усиления ЛСЭ за проход желателен достаточно малый поперечный эмиттанс электронного пучка:

$$\varepsilon < \frac{\lambda}{4\pi}, \quad (7)$$

где λ – длина волны излучения. За последние десятилетия были разработаны хорошие интерференционные зеркала для длин волн

порядка 10 нм [7], а также методы получения малых эмиттансов на электронных накопителях [8]. Например, как следует из (7), для создания ЛСЭ, работающего на длине волны 13.5 нм (где есть зеркала с коэффициентом отражения более 60%), требуется эмиттанс не более 1 нм. Это позволяет создать ЛСЭ с мощностью до сотен ватт в области вакуумного ультрафиолета на основе специализированного электронного накопителя.

Высшие гармоники спонтанного ондуляторного излучения вызывают дополнительный нагрев зеркал оптического резонатора. Поэтому для ЛСЭ на электронном накопителе предпочтительно использование спирального ондулятора [6]. При этом большая часть мощности спонтанного излучения идет вдоль образующих конуса с углом раствора $2(K+1)/\gamma$. Поскольку требуется относительно большая апертура вакуумной камеры, была выбрана схема ондулятора на постоянных магнитах с переменным периодом, похожая на описанную в [9], но обеспечивающая спиральную траекторию электронов [10].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение сильнополевых сверхпроводящих магнитов позволяет существенно понизить энергию электронов в источнике. Это снижает не только размеры источника, но и его радиационную опасность. Последнее позволяет разместить установку в стандартном промышленном здании, что сильно уменьшает строительные затраты. Энергосберегающие недорогие и простые в обращении источники рентгеновского излучения могут быть построены при больших университетах и использоваться для мультидисциплинарных исследований и обучения студентов и аспирантов. Наличие таких источников качественно изменит уровень научно-технологических разработок в больших университетах, так как последние не только получают постоянный доступ к излучению, но и смогут модернизировать свои источники в соответствии с потребностями конкретных экспериментов с использованием рентгеновского излучения.

Синхротрон-инжектор может быть размещен внутри кольца накопителя. Он представляет

собой модификацию компактного синхротрона-инжектора с энергией электронов 1.2 ГэВ [11], сделанного в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН для университета Дюка (США) и успешно работающего там с 2006 г. Накопитель, инжектор и пользовательские станции могут быть размещены в одном стандартном четырехпролетном промышленном здании с размерами $100 \times 200 \text{ м}^2$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках исследовательской программы № 075-15-2021-1359 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim K.-J. // Nucl. Instr. and Meth. 1986. V. 246. P. 71. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(86\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90048-3)
2. Винокуров Н. А., Шевченко О.А. // УФН. 2018. Т. 188. С. 493. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.02.038311>
3. Винокуров Н.А., Левичев Е.Б. // УФН. 2015. Т. 185. № 9. С. 917. <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.0185.201509b.0917>
4. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. Препринт 77-67. Новосибирск: ИЯФ СОАН СССР, 1977. http://wwwold.inp.nsk.su/activity/preprints/files/1977_067.pdf
5. Renieri A. // Nuovo Cimento B. 1979. V. 53. P. 160. <https://doi.org/10.1007/BF02739308>
6. Vinokurov N.A. // Nucl. Instr. and Meth. 1991. V. 308. P. 24. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(91\)90579-F](https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90579-F)
7. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(91\)90579-F](https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90579-F)
8. Pelizzo M.G., Suman M., Monaco G., Nicolosi P., Windt D.L. // Optics Express. 2008. V. 16. № 19. P. 15228. <https://doi.org/10.1364/OE.16.015228>
9. Левичев Е.Б. // УФН. 2018. Т. 188. С. 31. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.12.038014>
10. Davidyuk I., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 2019. V. 915. P. 36. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.168>
11. Shevchenko O.A., Vinokurov N.A., Getmanov Y.V. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20. P. 894. <https://doi.org/10.1134/S154747712304060X>
12. Mikhailov S.F., Busch M.D., Emamian M. et al. // IEEE Particle Accelerator Conference (PAC). Albuquerque, NM, USA. 2007. P. 1209. <https://doi.org/10.1109/PAC.2007.4441032>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.384.6:621.373

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ
ДЛЯ ПРОТОТИПОВ ПОВОРОТНЫХ МАГНИТОВ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ¹

© 2025 г. Я. И. Горбачёв^{a, *}, В. Г. Ческидов^a, О. А. Шевченко^a,
Ш. Б. Лачынов^{a, b}, Н. А. Винокуров^{a, b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

* e-mail: Jiva-5m@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.12.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Описана методика измерений, и представлены предварительные результаты измерения параметров постоянных магнитов, используемых в энергосберегающих источниках синхротронного излучения, разрабатываемых в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера.

DOI: 10.7868/S3034564225080176

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники рентгеновского излучения используются во многих областях науки и медицины. Большинству пользователей для своих задач требуется достаточно высокая интенсивность излучения в заданном диапазоне длин волн на образце или входном окне экспериментальной станции. Кроме того, обычно требуется достаточно маленькая угловая расходимость (равная поперечному размеру источника излучения, деленному на расстояние от источника до образца) излучения в каждой точке образца. Поэтому хороший источник излучения должен быть не только достаточно мощным, но и иметь небольшие поперечные размеры. В этом случае говорят, что источник имеет высокую яркость, которая определяется как мощность излучения, деленная на площадь (источника или коллимирующего отверстия) и телесный угол, в котором распространяются лучи. Сейчас самыми яркими лабораторными источниками рентгеновского

излучения являются пучки высокоэнергетических электронов, проходящие через сильное поперечное магнитное поле и излучающие синхротронное излучение (СИ), а также лазеры на свободных электронах. Для создания таких источников может быть использован электронный пучок небольших (менее 0.1 мм) поперечных размеров, который циркулирует в специальном устройстве – накопителе электронов.

Учитывая тот факт, что планируемые в настоящее время источники СИ заработают через 10–20 лет, их желательно существенно изменить (усовершенствовать) по сравнению с существующими. Это возможно, если будут применены новые технические решения и технологии. Кроме того, для источника излучения, ориентированного на работу в исследовательском университете, т. е. для экспериментов в самых разных областях науки и медицины, необходимо предусмотреть возможность получения фотонов с разными энергиями – от 5 эВ для ультрафиолетового излучения в вакууме до 100 кэВ для

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

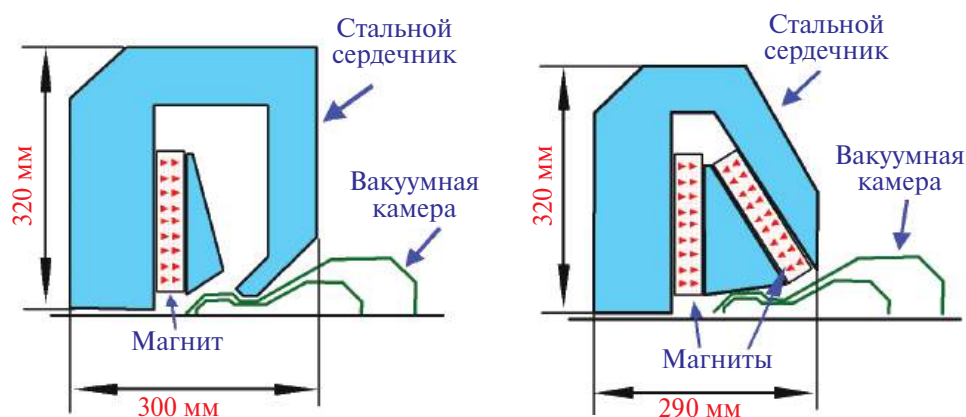


Рис. 1. Конструкция фокусирующего (а) и дефокусирующего (б) поворотного магнита.

жесткого рентгеновского излучения и одновременной работы многих пользователей на соответствующих экспериментальных станциях. Сейчас в мире существует множество (в России всего 3) источников рентгеновского излучения, использующих накопители электронов.

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера разрабатывается концепция энергосберегающего источника синхротронного излучения. Одним из основных отличий нового источника излучения от существующих является отсутствие источников питания постоянного тока (и соответствующего водяного охлаждения) для большинства элементов магнитной системы, использующих постоянные магниты. Для проверки этого нового технического решения были разработаны прототипы поворотных магнитов. Магнитные элементы этого типа могут быть использованы для создания новых источников рентгеновского излучения и модернизации существующих накопителей электронов.

Допуски на магнитное поле в поворотных магнитах современных накопителей достаточно жесткие. Чтобы обеспечить выполнение этих допусков, было разработано устройство для измерения вектора намагниченности каждого постоянного магнита. Оно использовалось для измерения магнитных моментов всех постоянных магнитов, купленных для прототипов поворотных магнитов.

2. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

Постоянные магниты имеют значительный разброс намагниченности. В наших поворотных магнитах (рис. 1) с железными полюсами в величину поля в рабочем зазоре вносят вклад несколько постоянных магнитов. Стандартное

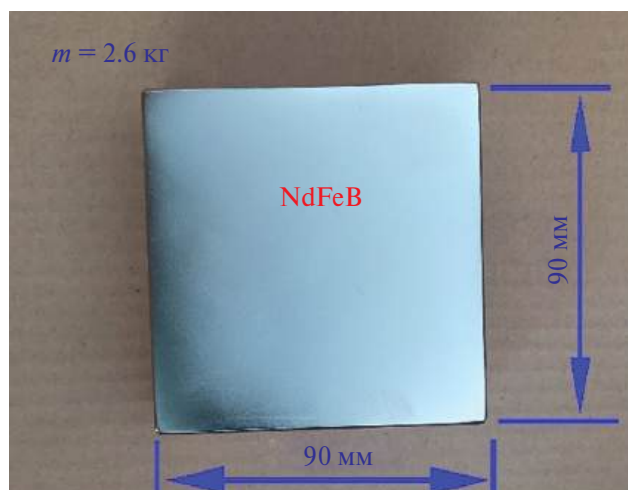


Рис. 2. Один магнитный блок.

решение этой проблемы заключается в сортировке магнитов.

Для сортировки необходимо измерить все компоненты вектора намагниченности каждого магнита, который планируется использовать в поворотном магните. После этого можно подобрать подходящий набор магнитов, чтобы обеспечить желаемую величину поля в рабочем зазоре поворотного магнита. В наших поворотных магнитах мы используем магниты NdFeB массой 2.6 кг и размерами $90 \times 90 \times 40 \text{ мм}^3$ (рис. 2).

3. КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Стандартный метод измерения усредненной по объему намагниченности магнитного блока основан на использовании катушек Гельмгольца. В этом методе с помощью интегрирующего вольтметра измеряют интеграл напряже-

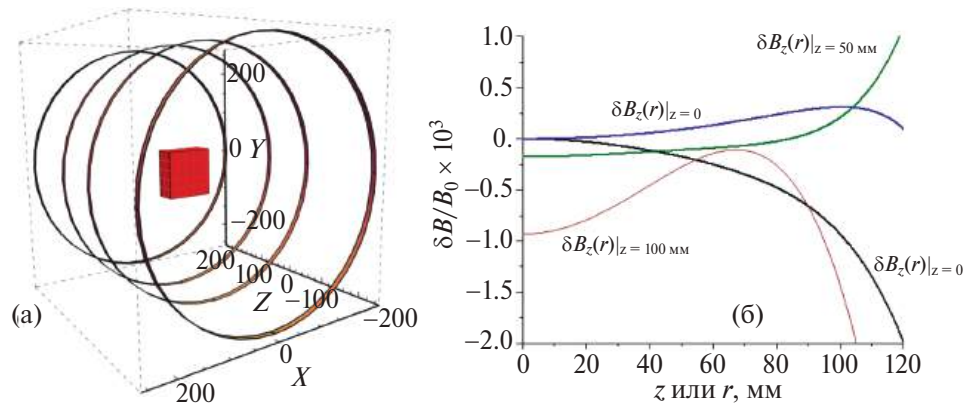


Рис. 3. а – Модель измерительной катушки, использованная в расчетах; б – расчетная однородность поля измерительной катушки.

ния, наведенного в катушке, при извлечении магнита из катушки или его повороте на 180° . Для правильного измерения катушка должна быть способна создавать магнитное поле с достаточно большой областью однородности, но само поле для измерения не требуется. Величина измеряемого интеграла пропорциональна проекции полного магнитного момента на ось катушек [1–2]:

$$\langle M_{\parallel} \rangle = \frac{1}{2V_{\text{magnet}}} \frac{I}{B_{\parallel}} \int \varepsilon(t) dt,$$

где $\langle M \rangle$ – продольная составляющая вектора намагниченности, усредненная по объему магнита; V_{magnet} – объем магнита, I/B_{\parallel} – отношение тока катушки к магнитному полю катушки, которое зависит только от геометрии катушки; $\varepsilon(t)$ – напряжение, наводимое в катушке при вращении магнита.

Для проведения правильного измерения магнит в исходном положении должен полностью поместиться в область однородности магнитного поля катушек. Для уменьшения габаритов измерительного стенда при сохранении размеров области однородности вместо катушек Гельмгольца целесообразно использовать катушки Бейкера [3], представляющие собой четыре коаксиальные катушки одинакового диаметра, но с разным числом витков. Число витков во внешних катушках больше, чем во внутренних.

В случае идеальных бесконечно тонких катушек Бейкера между продольным положением катушек относительно центра и их радиусом имеют место следующие соотношения: $Z_{in} = \pm 0.243196 \cdot R$, $Z_{out} = \pm 0.940731 \cdot R$, соотношение токов во внутренней и внешней катушках равно 0.442391. Реальные катушки имеют конечное сечение, поэтому при их проектировании нет

необходимости выполнять эти соотношения с большой точностью, но их можно использовать в качестве исходных значений. На рис. 3а представлена модель реальных катушек, созданная в программе Radia [4], которая использовалась для оптимизации их размеров и расчета области однородности магнитного поля. С помощью этой модели была также получена связь между величиной намагниченности и интегралом напряжения для случая реального магнита. Размер образовавшейся области однородности можно оценить по графикам, представленным на рис. 3б, где показано относительное отклонение значения продольного поля от его значения в центре для различных значений радиуса r и продольной координаты z . Из этих графиков следует, что размер области однородности, в пределах которой относительное отклонение поля катушек не превышает $2 \cdot 10^{-3}$, позволяет целиком разместить в ней измеряемые магнит, что обеспечивает достаточную точность измерения значений намагниченности.

На основе полученных в результате оптимизации размеров катушек был спроектирован измерительный стенд, 3D-модель которого представлена на рис. 4. Катушки намотаны тонкой проволокой на каркасах из стеклотекстолита. Радиус витков 250 мм, ширина намотки 10 мм, толщина – около 0,33 мм. Число витков во внешних катушках – 100, во внутренних – 44. Катушки соединены последовательно и подключены к интегрирующему вольтметру VsDC3, разработанному в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН [5]. Каркасы катушек смонтированы на алюминиевом профиле, на котором также расположен поворотный стол. На столе имеются ограничители, четко фиксирующие положение магнита.

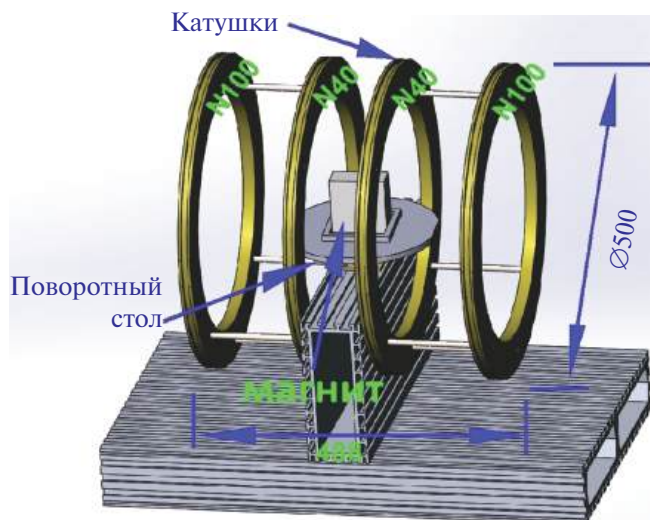


Рис. 4. 3D-модель измерительного стенда.

Для измерения основной составляющей намагниченности магнит располагают вертикально, а для измерения поперечных составляющих – его кладут на стол горизонтально. Чтобы центр масс магнита находился как можно ближе к центру катушек, в случае вертикальной и горизонтальной его ориентации используются два разных поворотных столика, различающихся по высоте. В конструкции предусмотрена регулировка угла поворота, которая осуществляется путем тонкой регулировки ограничителей.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Фотография стенда с установленным магнитом представлена на рис. 5. Положение магнита, указанное на фотографии, использовалось для измерения основной составляющей намагниченности. Для измерения поперечных составляющих магнит располагался горизонтально,

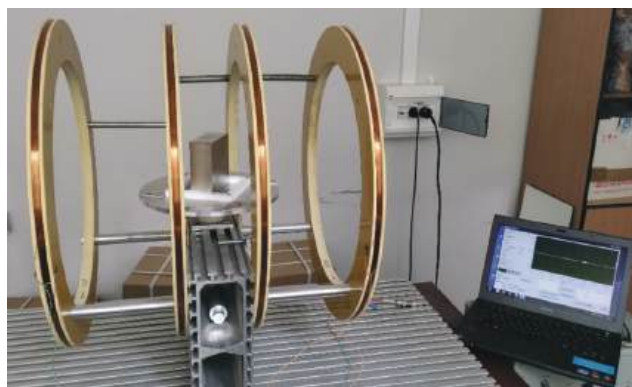


Рис. 5. Фотография измерительного стенда в работе.

измерения каждой поперечной составляющей проводились при двух положениях магнита с направлением основной составляющей намагниченности вверх и вниз, а результат усреднялся. Это сделано для того, чтобы исключить вклад в измерение основной составляющей, который может возникнуть из-за наклона плоскости стола относительно оси катушек.

Для оценки погрешностей измерений сначала была проведена серия измерений с одним магнитом. В этой серии неоднократно измерялась основная составляющая намагниченности, причем в этих измерениях положение магнита время от времени менялось в продольном и поперечном направлениях в пределах 1 см. Среднеквадратичный разброс измеренных значений в этой серии составил $2 \cdot 10^{-4}$. Также было проверено, что дрейф измеренных величин при фиксированном положении магнита за несколько часов не превышает $2 \cdot 10^{-5}$, а по результатам измерений поперечных составляющих определено, что угол наклона магнита на вращающейся платформе составляет менее $1 \cdot 10^{-3}$. Таким образом, установлено, что использованная методика измерений обеспечивает необходимую точность. Далее были измерены намагниченности 172 магнитов.

Для всех магнитов величина поперечных составляющих намагниченности оказалась в допустимых пределах: $\max(\Delta M_x/M_0) \leq 6 \cdot 10^{-3}$, $\max(\Delta M_y/M_0) \leq 5 \cdot 10^{-3}$. Результаты измерений основной компоненты представлены на рис. 6.

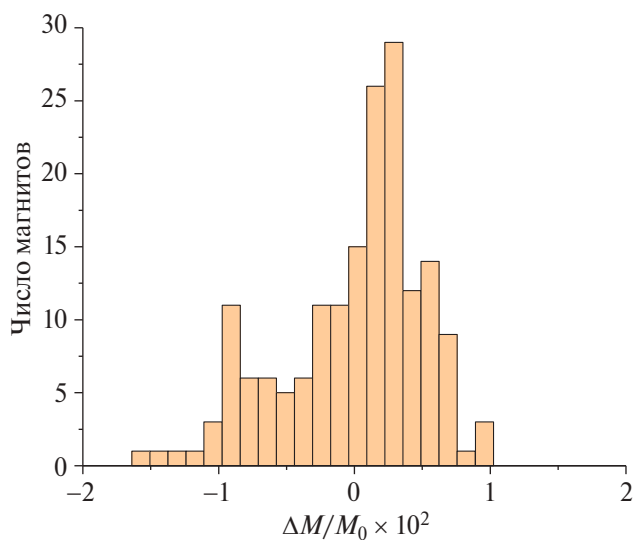


Рис. 6. Распределение основной составляющей намагниченности для 172 магнитов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные технологии позволяют изготавливать магниты произвольной формы с достаточно малым разбросом параметров, что дает возможность использовать их в поворотных магнитах для энергосберегающих синхротронов. Однако, несмотря на достаточно высокое качество изготовления, контроль параметров магнитов является важным этапом сборки поворотных магнитов. Для измерения параметров в зависимости от выбранной формы магнитов может потребоваться модификация стандартных методов измерения или разработка новых. Рассмотренный в статье метод измерения намагниченности обеспечивает точность, достаточную для изготовления поворотных магнитов для энергосберегающего синхротрона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы исследований № 075-15-2021-1359.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martin D., Benz M.* // IEEE Trans. Magn. 1972. V. 8. № 1. P. 35.
2. *Trout S.R.* // IEEE Trans. Magn. 1988. V. 24. № 4. P. 2108.
3. *Barker J.R.* // J. Sci. Instrum. 1949. V. 26. № 8. P. 273.
4. *Chubar O., Elleaume P., Chavanne J.* // J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5. № 3. P. 481.
5. *Batnikov A., Pavlenko A., Shickov D., Vagin P.* // Proc. of RuPAC. 2012. P. 617.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 538.945:621.384.66

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МАГНИТЫ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ¹

© 2025 г. Е. Р. Запретилина^а, Ю. А. Климченко^{а, *}, О. А. Ковальчук^а, А. Н. Лабусов^а,
Е. А. Ламзин^а, И. Ю. Родин^а, В. Н. Танчук^а, Н. А. Хитров^а, Т. А. Хон^а

^а Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова
Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3

* e-mail: klimchua@sintez.niiefa.spb.su

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 03.05.2024 г.

Принята к публикации 13.06.2024 г.

Статья посвящена разработке специалистами АО “НИИЭФА” сверхпроводниковых магнитов, применяемых в системах инжекции (источники ионов) различного типа. Представлены два сверхпроводниковых магнита различной конфигурации, применяемых в сильноточном инжекторе многозарядных ионов на базе сверхпроводникового источника ионов с электронно-циклотронным резонансом с индукцией магнитного поля на оси со стороны инжекции 4 Тл, со стороны экстракции пучка ионов 2–2.5 Тл, а также в электронно-лучевом источнике многозарядных ионов системы внешней инжекции циклотронного комплекса с индукцией магнитного поля 5 Тл. Приведены обоснование выбора основных параметров магнитной системы и ее защиты, а также электромагнитный, тепловой и механический анализ выбранной конфигурации магнитной системы.

DOI: 10.7868/S3034564225080187

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ускорительные установки различной конфигурации находят большое применение в сферах медицинской и научной деятельности. Одним из основных направлений работ по развитию ускорительной техники является увеличение энергии пучков заряженных частиц, что достигается совершенствованием магнитной системы ускорителя и системы инжекции.

В данный момент в АО “НИИЭФА” ведутся работы по созданию двух сверхпроводниковых магнитов для источников ионов.

Первый магнит – это сверхпроводниковая магнитная система на базе сверхпроводникового источника ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР), входящая в комплекс работ по созданию “фабрики” для синтеза сверхтяжелых элементов. Одним из элементов разрабатываемой установки является сильноточный инжектор многозарядных ионов на базе сверхпроводникового ЭЦР-источника с частотой 28 ГГц.

Второй магнит – это сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл, являющаяся составной частью электронно-лучевого источника многозарядных ионов, который использует магнитно-сжатый квазимоноэнергетический пучок электронов с энергией до 20 кэВ и плотностью тока до 1000 А/см² и более для последовательной ионизации ионов с низкой зарядностью, инжектируемых в электронный пучок. Магнитное поле для сжатия электронного пучка генерируется специальной сверхпроводниковой магнитной системой, состоящей из неэкранированного секционного сверхпроводящего соленоида.

2. СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЭЦР-ИСТОЧНИКА НА ЧАСТОТЕ 28 ГГц

Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника предназначена для формирования конфигурации магнитного поля, типичной для магнитной ловушки, способной удерживать заряженные частицы плазмы в рабочем

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

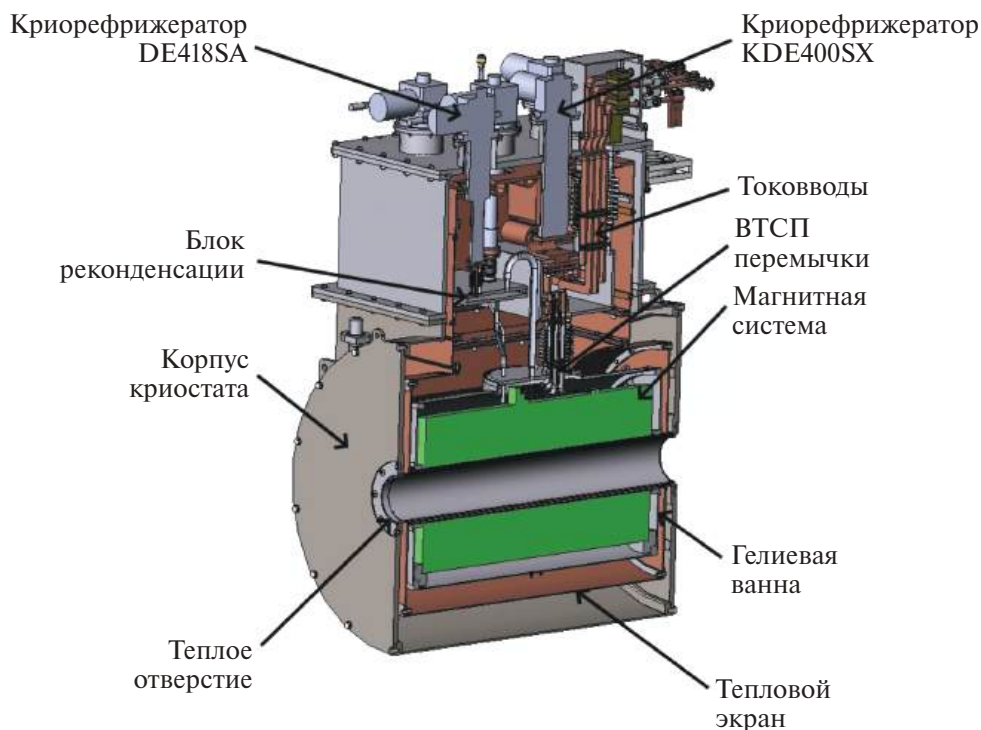


Рис. 1. ЭЦР-источник на частоте 28 ГГц.

объеме. Заданная частота (28 ГГц) определяет ряд основных параметров, в том числе требования к уровню и распределению магнитного поля в рабочей области источника.

Конструктивно ЭЦР-источник состоит из криостата с “теплым” отверстием, гелиевой ванны, системы криогенного обеспечения, теплового экрана, блока реконденсации жидкого гелия и сверхпроводниковой магнитной системы (рис. 1).

В рамках данной работы разработана концептуальная модель криостата, система поддержки холодных масс и система криогенного обеспечения. ЭЦР-источник включает в себя комплекс оборудования: систему питания и управления сверхпроводниковой магнитной системы, систему вакуумной откачки, систему термометрии и систему защиты обмоток сверхпроводниковой магнитной системы.

На основе требований к параметрам магнитной системы ЭЦР-источника выполнены расчетно-конструкторские работы по выбору и обоснованию рабочего варианта магнитной системы [1]. Магнитное поле создается продольными и поперечными катушками. Конструктивно система продольного поля состоит из набора соленоидальных катушек, создающих поле с конфигурацией, отвечающей полю прямой зеркальной ловушки.

Система поперечного поля в подобных источниках имеет шесть рейстрекковых катушек, расположенных на цилиндрической поверхности, с чередующейся полярностью питания для создания гексапольного поля.

Катушками по отношению друг к другу можно разместить в двух вариантах [2]. Первый вариант (рис. 2а), традиционный, в котором гексаполь располагается внутри соленоидов. Конструктив-

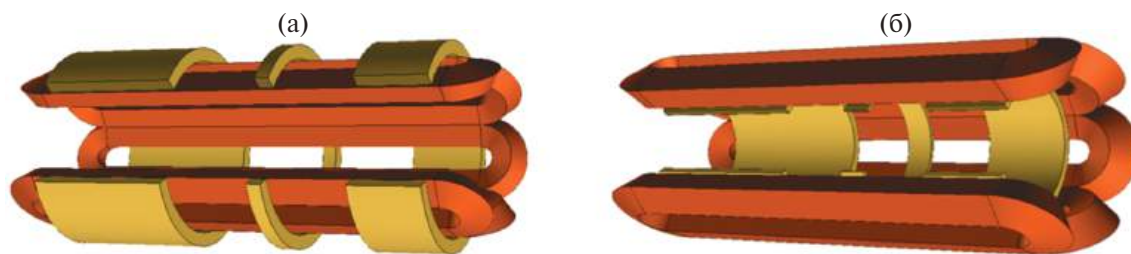


Рис. 2. Расположение обмоток сверхпроводниковой магнитной системы: а – традиционный вариант, б – обращенный вариант.

ной особенностью является использование элементов, выполненных из магнитомягкой стали, которая в условиях работы источника находится в состоянии технического насыщения. К этим элементам относятся полюса катушек гексаполя и магнитопровод (бустер), охватывающий снаружи все катушки. Наличие этих элементов снижает критический ток и поле в катушках на 20 и 5% соответственно, что удовлетворяет рекомендованным значениям этих величин для сверхпроводниковых обмоток на основе NbTi-сплава.

Во втором варианте (рис. 2б), реверсном, обращенном, сверхпроводниковые соленоиды находятся внутри рейстречковых катушек.

В данном варианте рабочие параметры сверхпроводника находятся в области критических значений, что снижает надежность работы такой системы.

Как результат, за основу принят традиционный вариант конструктивного исполнения магнитной системы с расположением соленоидов на внешнем диаметре гексаполя.

Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника ионов (рис. 3) представляет из себя магнитную систему, находящуюся внутри ферромагнитного бустера. Ферромагнитный бустер, согласно электромагнитному расчету, предназначен для замыкания магнитного потока, что способствует снижению рабочего тока и магнитного поля в обмотках соленоидов и гексаполя до допустимых рабочих значений.

На основе требований к параметрам магнитной системы ЭЦР-источника выполнены расчетно-конструкторские работы по выбору и обоснованию рабочего варианта магнит-

ной системы. Основные параметры отражены в табл. 1. Как видно, уровень магнитного поля на продольной оси источника со стороны инъекции нейтральных атомов достигает 4 Тл. Такой уровень поля обеспечивается использованием сверхпроводниковых материалов на основе NbTi.

Таблица 1. Основные параметры магнитной системы ЭЦР-источника на частоте 28 ГГц

Параметр	Значение
Диаметр “теплого” отверстия, мм	142
Внутренний радиус вакуумной камеры, мм	62
Расстояние между максимумами поля (B_{inj} и B_{extr}) на оси, мм	420
Продольное поле B_{inj} на оси со стороны инъекции, Тл	4
Продольное поле B_{extr} на оси со стороны экстракции пучка ионов, Тл	2–2.5
Минимум B_{min} продольного поля на оси, Тл	0.5–0.8
Модуль поля $ B $ на радиусе $R = 62$ мм не меньше, Тл	2.02

Для выбора размеров магнитной системы были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния источника под действием расчетных электромагнитных нагрузок с учетом захлаживания до 4К. Основная проблема – сложный характер распределения электромагнитных и механических нагрузок: предварительная затяжка болтов/шпилек, термическое расширение/сжатие, электромагнитные силы.

В результате оптимизации размеров магнитной системы было получено, что предпочтительными являются:

- длина линейных участков гексаполей (рейстречков) – 810 мм;
- увеличение третьего соленоида в осевом направлении;
- увеличенная предварительная затяжка шпилек;
- увеличенные размеры поджимного и приварного колец;
- материалы поджимного и приварного колец – алюминиевый сплав Д16Т;
- тепловая посадка поджимного и приварного колец не требуется.

Интенсивность напряжений в лобовых участках рейстрека под действием всех нагрузок (предзатяг болтов/шпилек, захлаживания, электромагнитные силы) на 3% меньше допустимого значения.

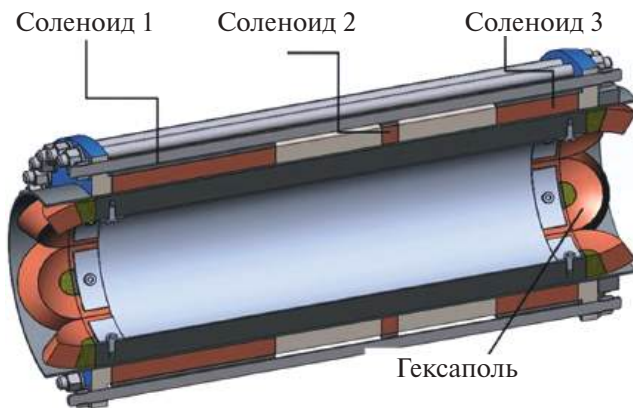


Рис. 3. Сверхпроводниковая магнитная система ЭЦР-источника ионов.

3. СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ПОЛЕМ ИНДУКЦИИ 5 Тл

Сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл является составной частью электронного-лучевого источника многозарядных ионов и представляет собой комплекс оборудования, включающий в себя сверхпроводящий соленоид специальной конструкции, криостат, систему криогенного обеспечения, систему вакуумной откачки, систему мониторинга основных рабочих параметров соленоида: температура, давление, рабочий ток, а также систему электропитания, управления и защиты. Модель СМС представлена на рис. 4.

Сверхпроводниковая магнитная система удовлетворяет следующим требованиям:

- специальная конструкция соленоида, оптимизированная для работы без жидких хладагентов, длиной 1020 мм;
- диаметр “теплого” отверстия 165 мм;
- ориентация поля горизонтальная;
- величина поля в центре соленоида – 5 Тл (при 4.2 К на обмотке соленоида);
- рабочий ток системы составляет порядка 139 А;
- однородность поля $\pm 0.16\%$ на расстоянии ± 300 мм от центра соленоида (вдоль оси) и $\pm 0.7\%$ на расстоянии от 300 мм до 350 мм от центра соленоида (вдоль оси);
- имеет систему защиты от перехода сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние.

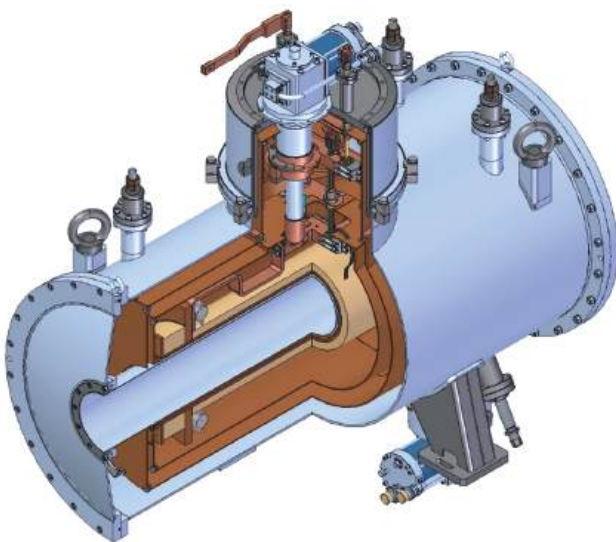


Рис. 4. Сверхпроводниковая магнитная система с полем индукции 5 Тл.

Соленоид намотан из сверхпроводника на основе эмалированного NbTi последовательно соединенными секциями.

Центральная секция (длиной 814 мм) состоит из 26 слоев проводника. Для повышения однородности поля с каждого конца соленоида наматывается по секции сверхпроводящего провода (рис. 5) длиной 72 мм из 56 слоев по 80 мм.

Расчет напряженно-деформированного состояния и оценка прочности соленоида с полем индукции 5 Тл показали следующее:

- величины напряжений, возникающих в силовых элементах конструкции, выполненных из бескислородной меди, при эксплуатационных нагрузках не превышают допустимых;
- при захолаживании (4 К) величина радиального зазора между сверхпроводящими обмотками и медной бобиной составляет 2 мкм. Наличие данного зазора не осложнит пассивное охлаждение обмотки теплопроводностью, вследствие чего нет необходимости предусматривать радиальное обжатие обмотки с целью устранения зазора в рабочем режиме;
- величины напряжений в Cu/NbTi-сверхпроводнике при совместном действии равномерного температурного поля 4 К и электромагнитных сил не превышают допустимых.

Для данной магнитной системы были спроектированы система криогенного обеспечения, криостат с “сухой” системой охлаждения, система вакуумной откачки, системы электропитания, управления и защиты.

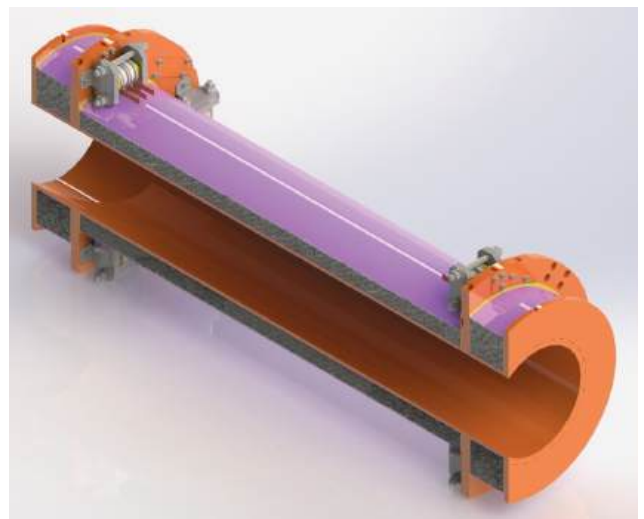


Рис. 5. Обмотки сверхпроводящего соленоида.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены основные этапы по созданию сверхпроводниковых магнитов источников ионов, выбраны конфигурации магнитных систем, проведены расчеты, подтверждающие надежность конструкций, разработаны криостаты и системы криогенного обеспечения, выбраны компоненты систем диагностики, защиты сверхпроводящих обмоток, управления и питания. Проработаны режимы захлаживания, стационарные режимы и режимы отогрева сверхпроводниковой магнитной системы.

В настоящий момент магнитные системы находятся на стадии изготовления и сборки. Следующим этапом будут приемо-сдаточные испытания изделий с последующей передачей заказчику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов М., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гапионов Е.И., Гаркуша Д.Б., Глухих М.И., Кухтин В., Ламзин Е.А., Максименкова Н.А., Мингалев Б.С., Сычевский С.Е., Филатов О.Г.// Официальный бюллетень российского агентства по патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС, 2004. Т. 1 (46). С. 57.
2. Выбор системы криогенного обеспечения и анализ напряженно-деформированного состояния конструкции для реверсного варианта магнитной системы. Технический отчет. Предварительный электромагнитный анализ сверхпроводящей магнитной системы ЭЦР-источника ионов на частоте 28 ГГц в “обращенном” исполнении.

СЕРИЙНЫЕ МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ КОЛЛАЙДЕРА NICA¹

© 2025 г. Д. А. Золотых^а, *, В. В. Борисов^а, И. И. Донгузов^а, О. М. Голубицкий^а,
Г. Г. Ходжибагиян^а, Б. Кондратьев^а, С. А. Костромин^а, А. В. Кудашкин^а, Д. Н. Никифоров^а,
И. Ю. Николайчук^а, М. М. Омеляненко^а, М. М. Шандов^а, А. В. Шемчук^а,
И. А. Смирнов^а, Е. В. Золотых^а

^а Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

* e-mail: zolotykh@jinr.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024 г.

После доработки 30.03.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

В научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий (НЭОСМТ) в лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) проведены испытания и магнитные измерения 70 двухапертурных сверхпроводящих магнитов. Магниты измерены специально разработанной магнитометрической системой при температуре окружающей среды и рабочей температуре (4.5 К). Данная статья описывает магнитометрические системы и результаты магнитных измерений структурных квадрупольных магнитов арок и блоков квадрупольных магнитов коллайдера NICA.

DOI: 10.7868/S3034564225080191

1. ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) [1] – новый ускорительный комплекс, который создается в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств барионной материи высокой плотности. Ускорительный комплекс состоит из двух линейных ускорителей, бустерного синхротрона (бустера), существующего синхротрона Нуклотрона и накопителя – коллайдера. Магнитная система коллайдера состоит из двух накопительных колец периметром 503 м каждое и включает 46 двухапертурных сверхпроводящих квадрупольных магнитов (рис. 1) трех типоразмеров длин, формирующих регулярные периоды магнитной системы арок. Магниты отличаются по длине ярма по своему функциональному назначению. Модуль магнита имеет по одному мультиполюсному корректирующему магниту (МПК) для каждой апертуры.

Основные характеристики магнитов арок приведены в табл. 1 [1]. В прямолинейных участках расположены двухапертурные квадрупольные

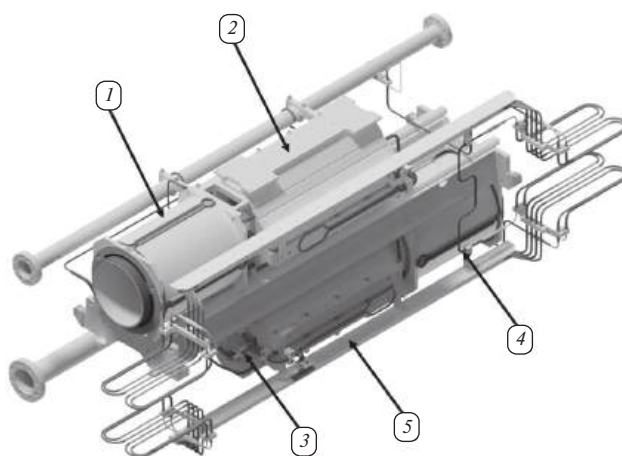


Рис. 1. Двухапертурный квадрупольный магнит арки коллайдера NICA: 1 – МПК, 2 – ярмо, 3 – обмотка, 4 – охлаждающая трубка, 5 – кабели электрической связи соседних магнитов.

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

магниты (24 магнита), объединенные в дублеты (рис. 2) с установленным между ними МПК.

Таблица 1. Основные характеристики квадрупольного магнита арок коллайдера NICA

Характеристика	Величина
Максимальный градиент магнитного поля G_{max} , Тл/м	23.1
Минимальный градиент магнитного поля, G_{min} , Тл/м	7.3
Эффективная длина магнита L_{eff} , м	0.47
Скорость изменения градиента магнитного поля dG/dt , (Тл/м)/с	≤ 1.3
Неоднородность градиента магнитного поля DG/G на радиусе 30 мм	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$
Расстояние от оси до полюса, м	0.0475
Расстояние между пучками, мм	320
Ширина ярма, м	0.3
Высота ярма, м	0.594
Масса магнита, кг	250
Ток при максимальном градиенте поля, кА	10.4
Число витков в обмотке (на полюс)	8(2)
Индуктивность, мкГн	94

С 2016 года в НЭОСМТ ЛФВЭ ОИЯИ начато серийное производство (сборка и испытания) структурных элементов ускорительного комплекса NICA. В НЭОСМТ осуществляется изготовление сверхпроводящего кабеля и обмотки, проводится контроль геометрии железных ярм, сборка обмотки с ярмом, выполняются “теплые” (при температуре окружающей среды) и “холодные” (при температуре 4.5 К) магнит-

ные измерения и другие испытания (электрические, криогенные, вакуумные и пр.). На данный момент полностью завершены работы по производству магнитов бустера [2], дипольных двухпертурных магнитов коллайдера [3], завершены испытания двухпертурных квадрупольных магнитов коллайдера и находятся на завершающей стадии испытания БЛ коллайдера [4].

В каждом квадрупольном магните за один сеанс охлаждения измеряются следующие параметры:

- градиент магнитного поля G в центре магнита [Тл/м];
- интеграл градиента $\int Gdl$ [Тл];
- относительные интегральные гармоники поля до 10-й включительно;
- величина поля каждого корректирующего магнита в МПК (датчиком Холла).

Предварительные результаты измерений МПК приведены в работе [5].

Согласно техническому заданию на проведение серийных магнитных измерений квадрупольных магнитов коллайдера NICA для значений токов, соответствующих энергиям пучка 1 ГэВ/нуклон (7.3 Тл/м, 2300 А), 3 ГэВ/нуклон (16.4 Тл/м, 6890 А) и 4.5 ГэВ/нуклон (23 Тл/м, 10440 А) на радиусе $r_{ref} = 30$ мм качество поля оценивается по следующим критериям:

- относительный разброс эффективных длин (отклонение эффективной длины магнита от среднего по всем магнитам);
- относительный разброс интегралов поля;
- качество магнитного поля (относительные гармоники);
- положение магнитной оси элемента относительно референсной системы координат (оценивается при температуре окружающей среды на специализированном магнитометрическом стенде, результаты данных измерений приведены в работе [6]).

2. МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Для проведения магнитных измерений в соответствии с указанными требованиями выбран метод гармонических катушек [2, 3]. Основной измерительный элемент магнитометра – массив гармонических катушек 2 (рис. 3, 4), выполненный по технологии многослойных печатных плат. Печатная плата состоит из 20 слоев, в каждом из которых содержится 20 витков (суммарно 400 витков на измерительную катушку).

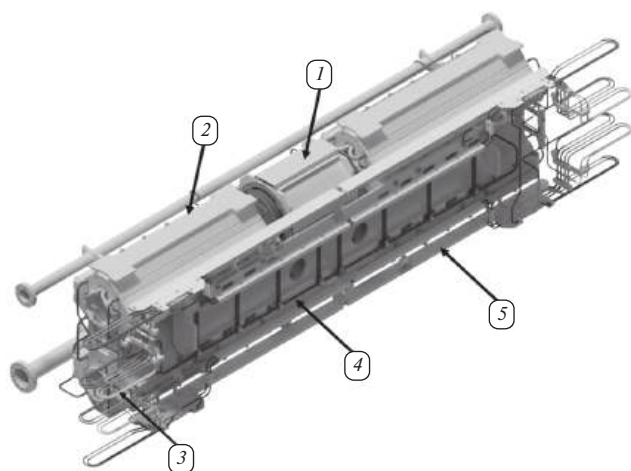


Рис. 2. Блоки линз (БЛ) коллайдера NICA: 1 – МПК, 2 – ярмо, 3 – обмотка, 4 – охлаждающая трубка, 5 – кабели электрической связи соседних магнитов.

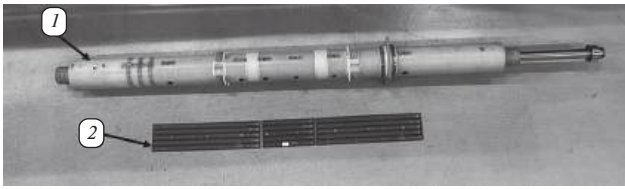


Рис. 3. Магнитометр квадрупольных магнитов арок коллайдера 1 с блоками гармонических катушек 2.

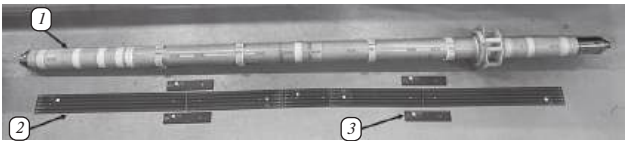


Рис. 4. Магнитометр БЛ коллайдера 1 с блоками гармонических катушек 2, 3.

Количество и длина массивов катушек (для измерений квадрупольных магнитов используются массивы по 5 катушек в каждом), используемых в магнитометрах, подбирается таким образом, чтобы обеспечить перекрытие всей области распространения магнитного поля (включая краевые участки). Зазоры между измерительными катушками учитываются при обработке путем экстраполяции данных измерений с соседних катушек.

Разработаны два отдельных типа магнитометра, предназначенных для определенного типа квадрупольных магнитов: арок (рис. 5) и прямолинейных участков (рис. 6), 1 пара магнитометров для проведения “теплых” и 2 пары

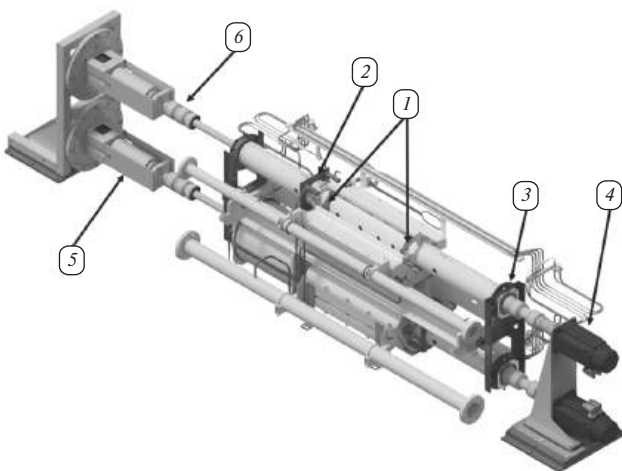


Рис. 5. Общий вид стенда ТМИ квадрупольных магнитов арок коллайдера NICA: 1 – внутренние опоры магнитометра, 2 – упорные планки, 3 – внешние опоры магнитометра, 4 – сервомотор, 5 – токосъемники, 6 – сильфонная муфта.

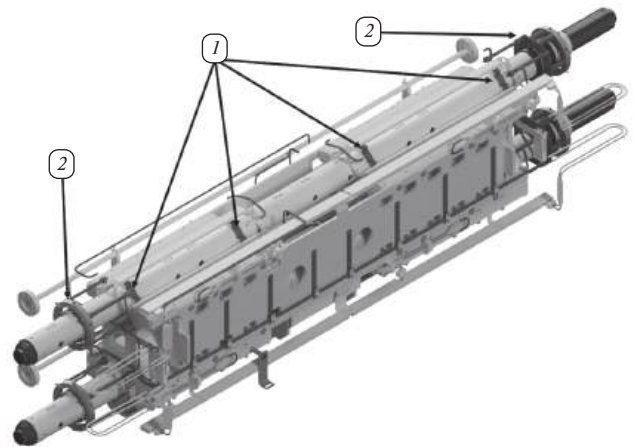


Рис. 6. Магнитометр БЛ коллайдера NICA: 1 – внутренние опоры магнитометра, 2 – упорные планки с подшипниками.

для “холодных” магнитных измерений (ТМИ и ХМИ соответственно) квадрупольных магнитов арок коллайдера и 1 пара магнитометров для всех измерений БЛ (каждый магнитометр БЛ включает в себя 2 магнитометра, собранные в один измерительный вал). Общее число магнитометров составляет 10 шт. Магнитометр базируется в ярме магнита на полюса во внутренних опорах скольжения 1 (см. рис. 5). Вкладыши подшипника изготовлены из политетрафторэтилена (PTFE [7]), отвечающего требованиям по эксплуатации магнитометров при криогенных температурах. Позиционирование магнитометра от продольного смещения (вдоль направления движения пучка) осуществляется с помощью планок 2, монтируемых на ярме магнита со специальными упорами. Для магнитометров квадрупольных магнитов арок на швеллер магнита монтируется специальная конструкция с внешними регулируемыми самоцентрирующимися опорами качения 3, которые также обеспечивают радиальную поддержку магнитометра в модуле магнита. Радиальную поддержку в магнитометрах БЛ выполняют внешние конструкции, оборудованные подшипниками скольжения 2 (см. рис. 6).

Для вращения и точного углового позиционирования магнитометров во время измерений используется сервоприводы 4 (см. рис. 5) производства KOLLMORGEN [8]. С помощью специальных токосъемников 5 MOFLON [9] осуществляется передача сигналов с разъема на магнитометре [10] на выходной стационарный разъем. Для компенсации несоосностей, возникающих при сборке модуля на испытательном

стенде, валы соединяются с токосъемниками и сервомоторами с помощью сильфонных муфт б.

Процедура ТМИ выполняется на специально созданном стенде. Общий вид стенда ТМИ квадрупольных магнитов арок коллайдера приведен на рис. 7. Из-за наличия ограниченного количества магнитометров БЛ коллайдера и производственной необходимости ТМИ магнитов прямолинейного участка выполнялись на стенде криогенных испытаний.

Параметры токового импульса для проведения ТМИ квадрупольных магнитов коллайдера приведены на рис. 8: скорость роста составляет 3 кА/с, время переходных участков 3 мс для ТМИ и скорость роста 10.44 кА/с, время переходного процесса 50 мс для ХМИ.

Для проведения ХМИ используется магнитометрическая система аналогичной конструкции, отличающаяся длиной приводных валов (используются более длинные валы с дополнительным облегчением) и наличием вакуумных кожухов у токосъемников в силу конструктивных особенностей криогенного стенда. Внешний вид стенда для проведения ХМИ представлен на рис. 9 (квадрупольных магнитов арок коллайдера) и на рис. 10 (БЛ коллайдера).

Магнитно-криостатная система БЛ коллайдера NICA имеет схожее строение и отличается габаритами вакуумного кожуха магнита. Передача сигналов с магнитометра на внешний разъем осуществляется также через токосъемники б на рис. 9.

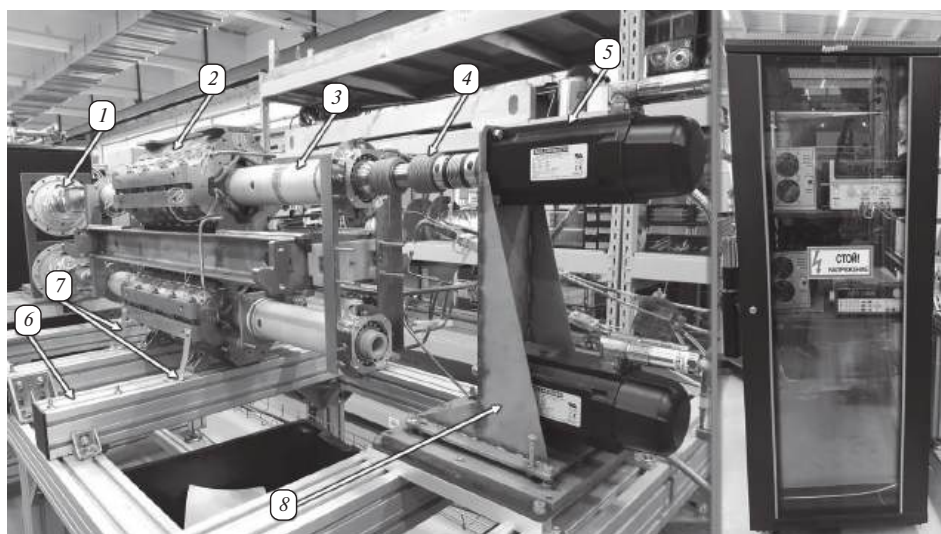


Рис. 7. Вид стенда ТМИ с квадрупольным магнитом арки коллайдера NICA (слева): 1 – токосъемник, 2 – магнит, 3 – магнитометр, 4 – сильфонная муфта, 5 – сервомотор, 6 – стол для установки магнита, 7 – элементы крепления магнита, 8 – кронштейн сервомоторов. Импульсный ИП для стенда ТМИ (справа).

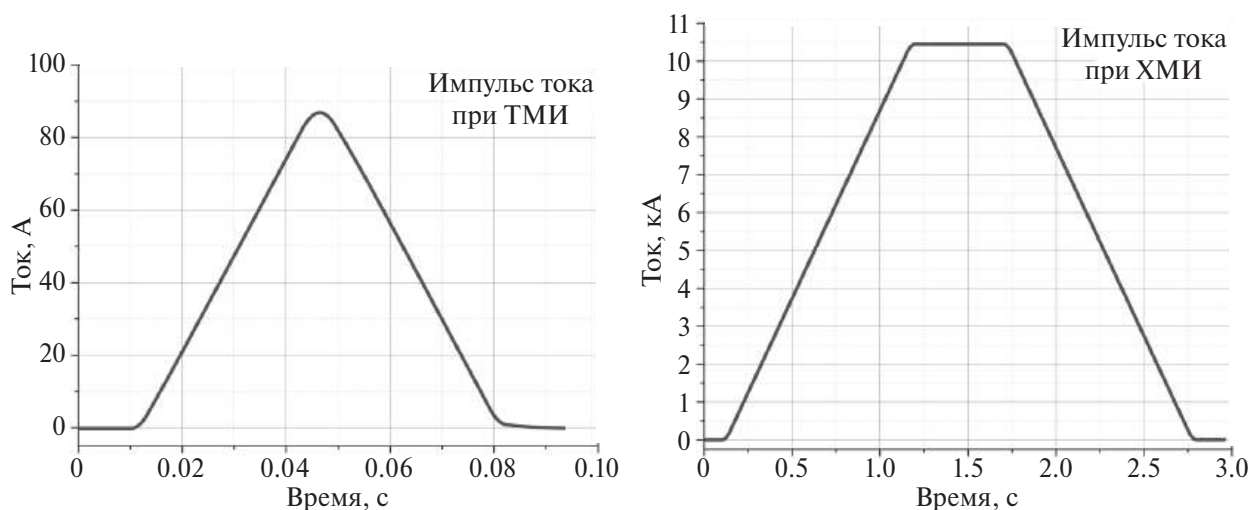


Рис. 8. Импульс тока при ТМИ (слева) и ХМИ (справа) магнитных измерениях.

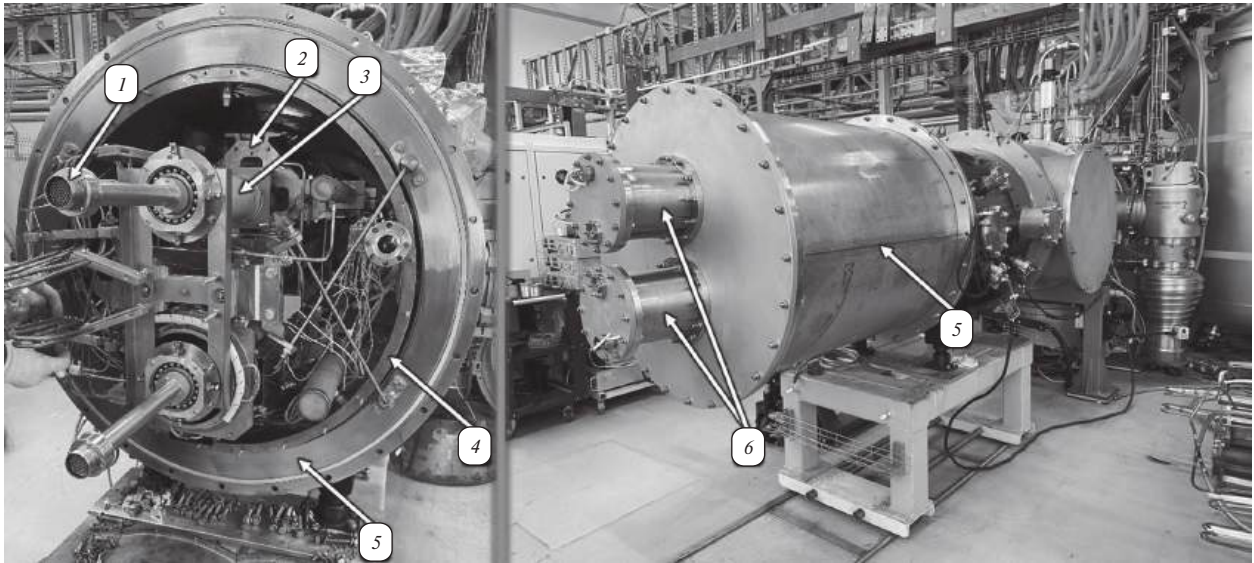


Рис. 9. Магнитно-криостатная система квадрупольного магнита арки коллайдера NICA с установленными магнитометрами: 1 – сигнальный разъем магнитометра, 2 – ярмо магнита, 3 – магнитометр, 4 – азотный экран, 5 – вакуумный кожух, 6 – токосъемники (в вакуумном кожухе).

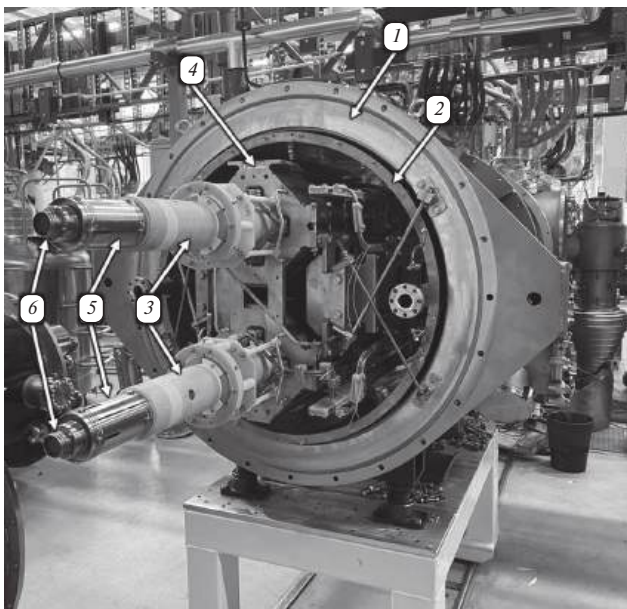


Рис. 10. Магнитно-криостатная система БЛ коллайдера: 1 – вакуумный кожух, 2 – азотный экран, 3 – магнитометры БЛ, 4 – БЛ коллайдера, 5 – связь разрезная (компенсатор), 6 – сигнальный разъем.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 11 приведен график выполнения ХМИ структурных магнитов коллайдера NICA. В рамках производства двух серий магнитов (без учета исследований) выполнено 58 ХМИ: 46 арочных магнитов и 12 БЛ коллайдера NICA.

В процессе измерений происходит одновременное измерение как основного (некомпенсированного), так и скомпенсированного сигналов. Измерения проводились в противоположные стороны вращения магнитометра в шаговом режиме с целью учета влияния скручивания магнитометра.

Для оценки параметров измеренных магнитов, полученных при проведении измерений с помощью 6 различных магнитометров для квадрупольных магнитов арки и 4 магнитометра для БЛ, проведена относительная калибровка

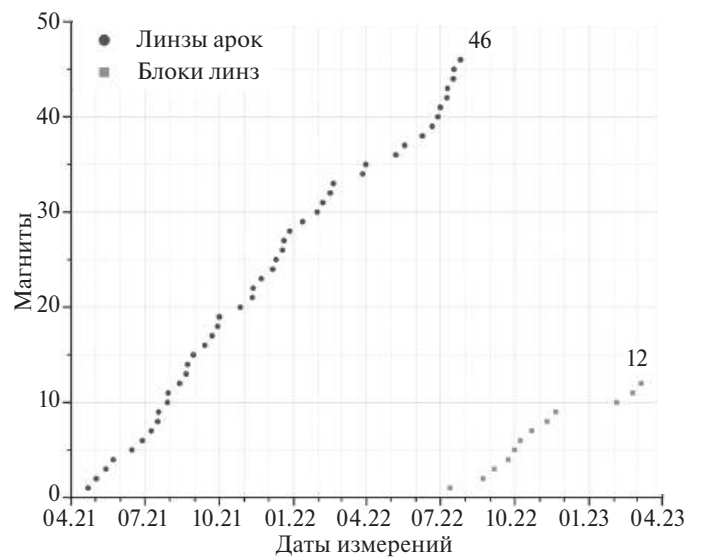


Рис. 11. Выполнение ХМИ структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA.

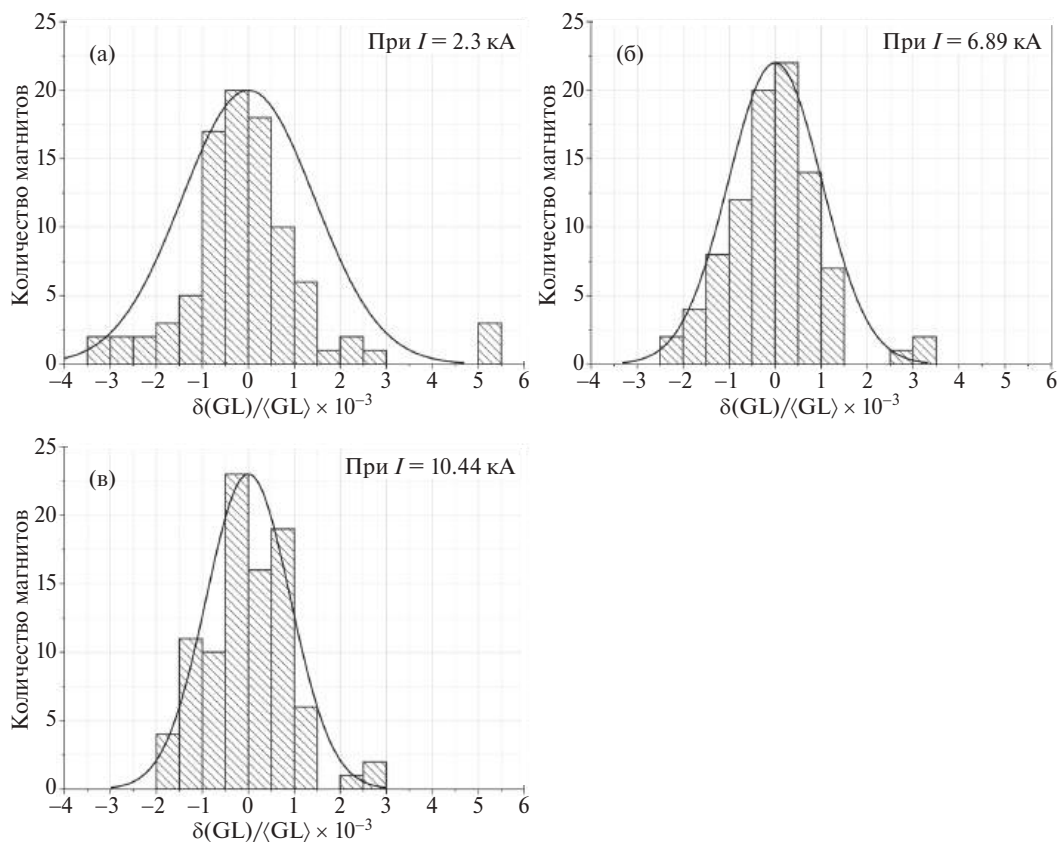


Рис. 12. Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля квадрупольных магнитов арки коллайдера при рабочих токах 2.3 кА (а), 6.89 кА (б) и 10.44 кА (в).

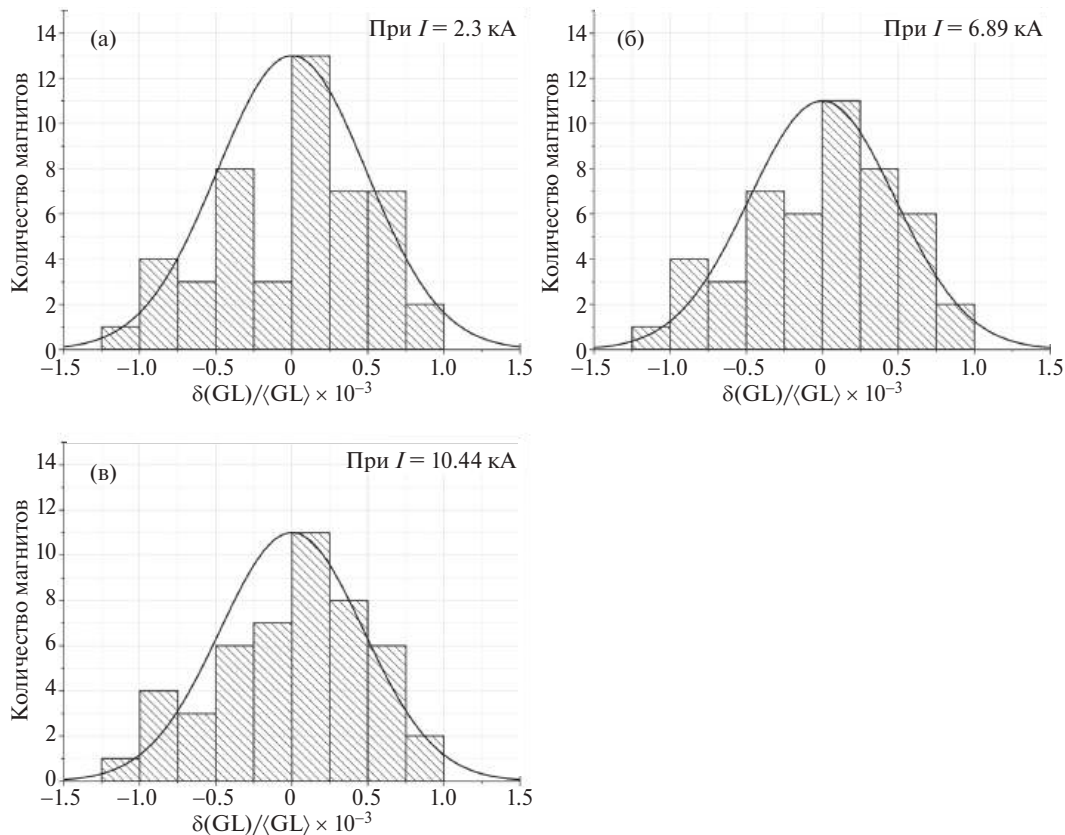


Рис. 13. Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля БЛ коллайдера при рабочих токах 2.3 кА (а), 6.89 кА (б) и 10.44 кА (в).

коэффициента геометрической чувствительности катушек на основании обобщенной статистики измеренных данных. Представленные далее результаты измерений являются приведенными по отношению к одному из шести магнитометров для квадрупольных магнитов арок и к одному из четырех для БЛ.

На рис. 12 приведены распределения отклонений относительных величин интегралов магнитного поля квадрупольных магнитов арок коллайдера, на рис. 13 — для БЛ коллайдера NICA. Величина разброса значений интегралов магнитного поля улучшилась по сравнению с дуплетами линз бустера. Для линз бустера величина относительного отклонения интеграла магнитного поля составляет примерно $2.28 \cdot 10^{-3}$ [2], для арочных линз коллайдера — $0.97 \cdot 10^{-3}$, для БЛ

коллайдера — $0.49 \cdot 10^{-3}$. Данный показатель свидетельствует об улучшении качества производства ярм для квадрупольных магнитов коллайдера в сравнении с квадрупольными магнитами бустера. При сравнении квадрупольных магнитов арок и прямолинейных участков коллайдера наблюдается разница данного отклонения почти в два раза. Для обоснования данного различия проводятся дополнительные исследования.

На рис. 14а, 15а приведены передаточные функции по току питания обмоток для различных групп квадрупольных магнитов арок и БЛ коллайдера NICA по 1 магниту из каждой группы. На рис. 14б, 14в, 14г и 15б, 15в, 15г более детальное представление результаты в масштабах каждой из групп. Различия интегралов магнитных полей у квадрупольных магнитов арок

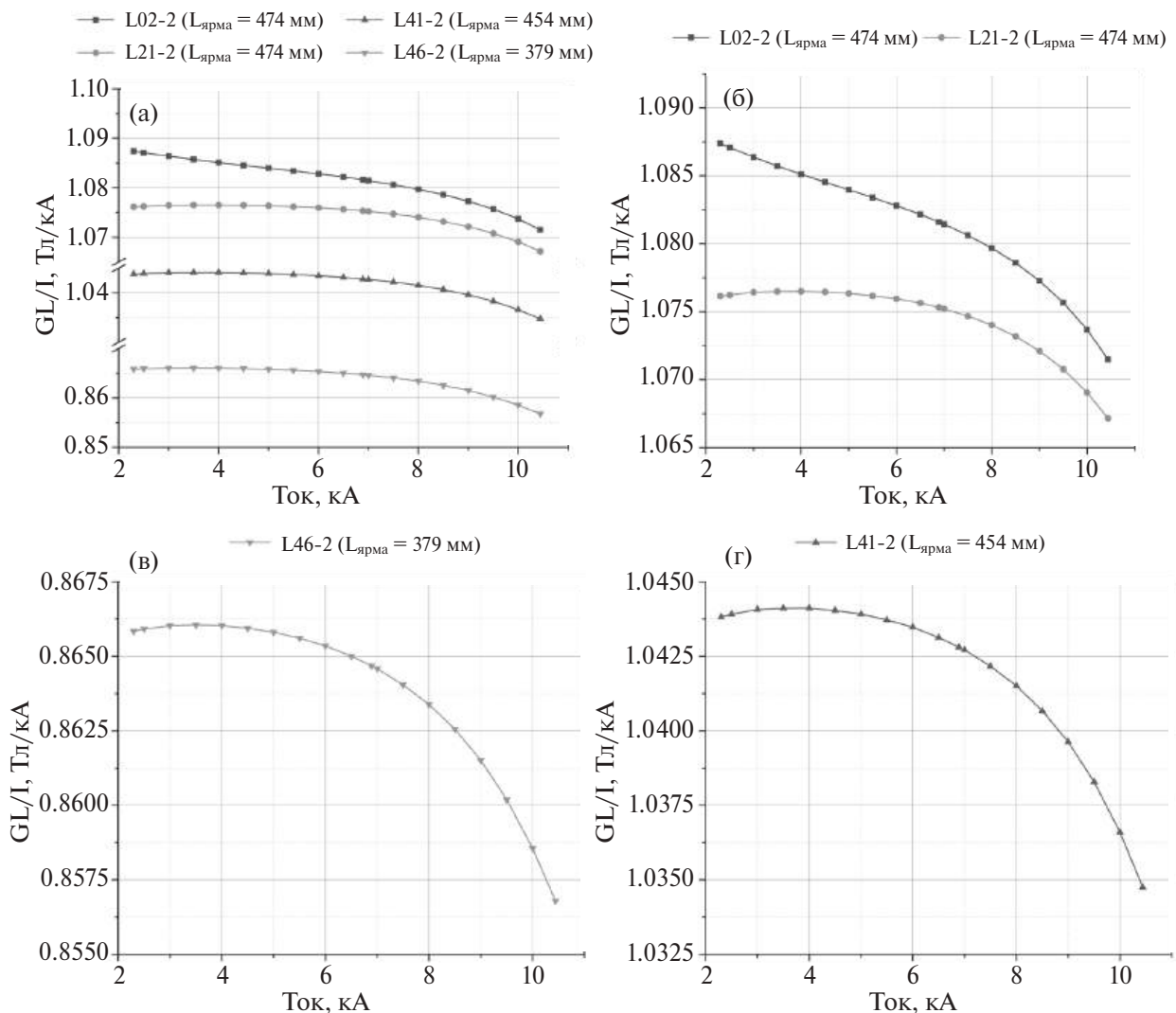


Рис. 14. Передаточные функции квадрупольных магнитов арок коллайдера для различных длин ярм: а — общий вид функций всех типов квадрупольных магнитов; б–г — детальное рассмотрение.

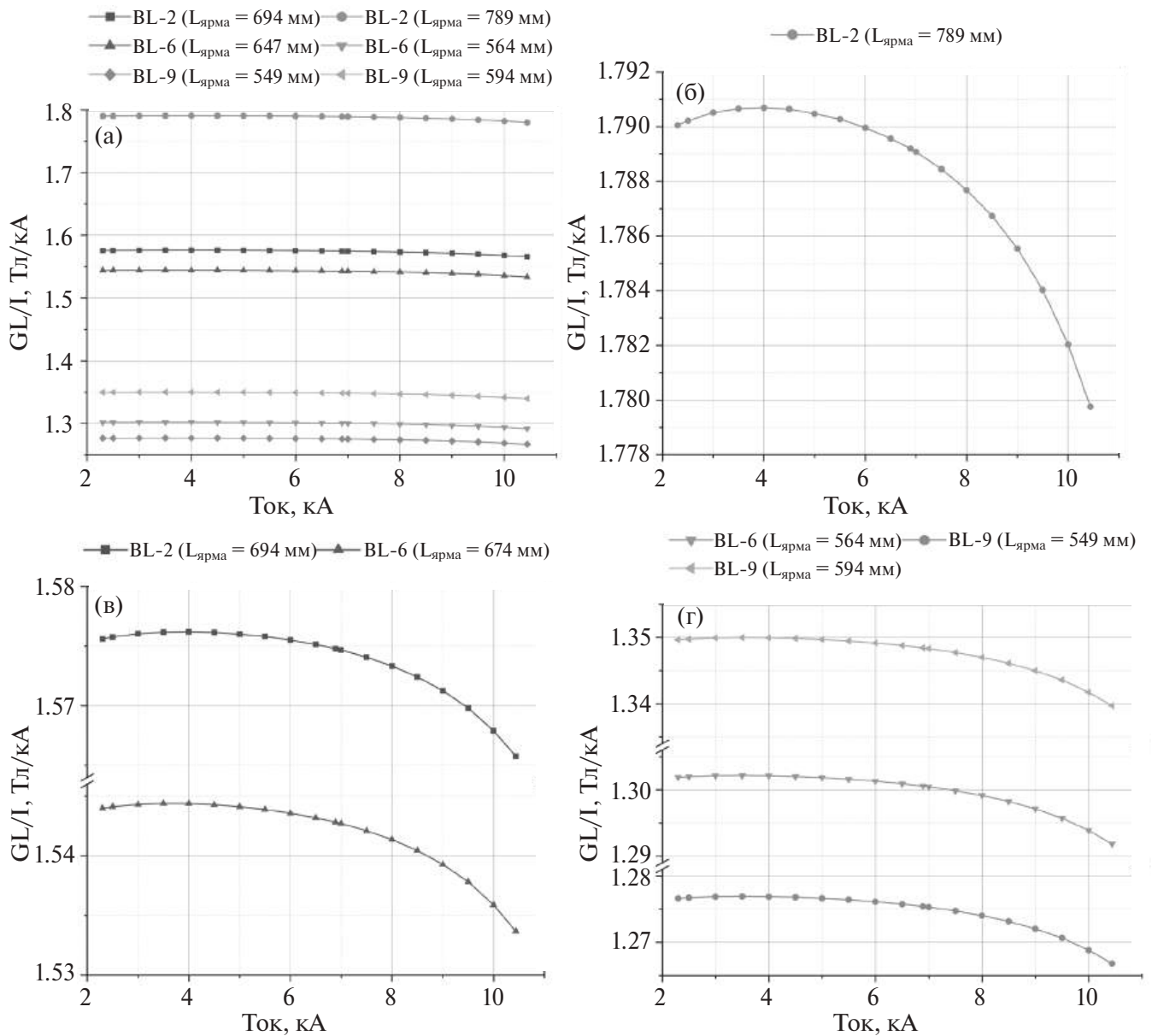


Рис. 15. Передаточные функции БЛ коллайдера для различных длин ярм: а – общий вид функций всех типов БЛ; б, в, г – детальное рассмотрение.

при одинаковой длине ярм (474 мм) вызвано отклонением в магнитных свойствах материалов лобовых пластин. С этим также связано значительное уменьшение передаточной функции в области малых токов. Для более детальной оценки данного эффекта проводятся дополнительные исследования.

На рис. 16 представлены относительные интегральные гармоники для структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA с указанием допуска (затемненные области) на качество магнитного поля элемента (остальные гармоники величиной менее 1 юнита ($1 \text{ юнит} = 10^{-4}$) не представлены). Величина относитель-

ной гармоники b_3 превышает допуск, что может быть вызвано большими отклонениями геометрии полюсов. Результаты исследований по определению причин большой величины данной гармоники приведены в работах [2, 11].

На рис. 17, 18 представлены зависимости величины разрешенной гармоники b_6 от величины тока для квадрупольных магнитов арок и БЛ коллайдера соответственно при различных длинах магнитов. Из указанных графиков зависимостей видно, что из представленных длин ярм магнитов, наилучший эффект от шиммирования ярма наблюдается при длине $L_{\text{yoke}} = 564 \text{ мм}$, где величина b_6 практически не зависит от тока

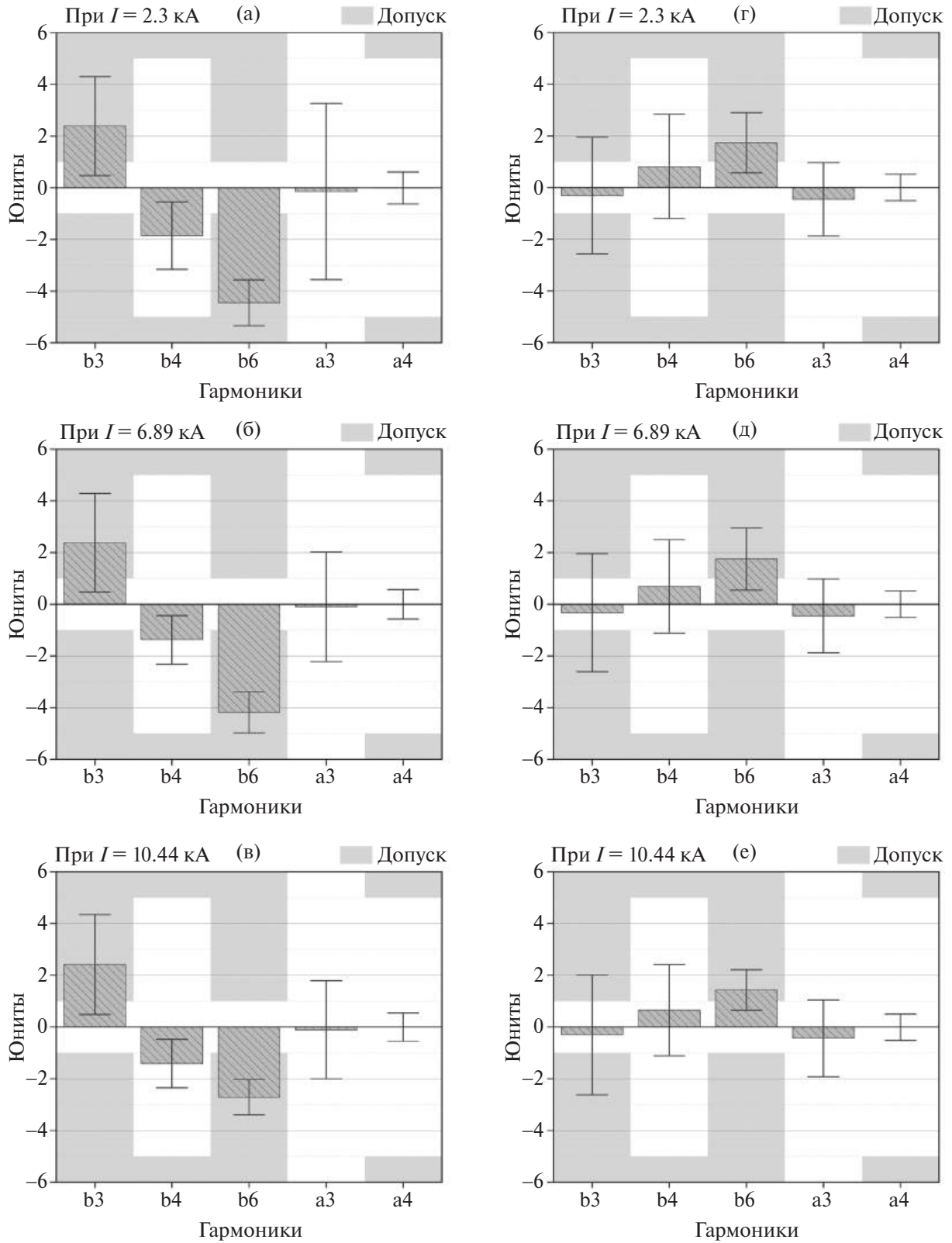


Рис. 16. Относительные гармоники квадрупольных магнитов арок коллайдера (а–в) и БЛ коллайдера (г–е) при рабочих токах 2.3, 6.89 и 10.44 кА.

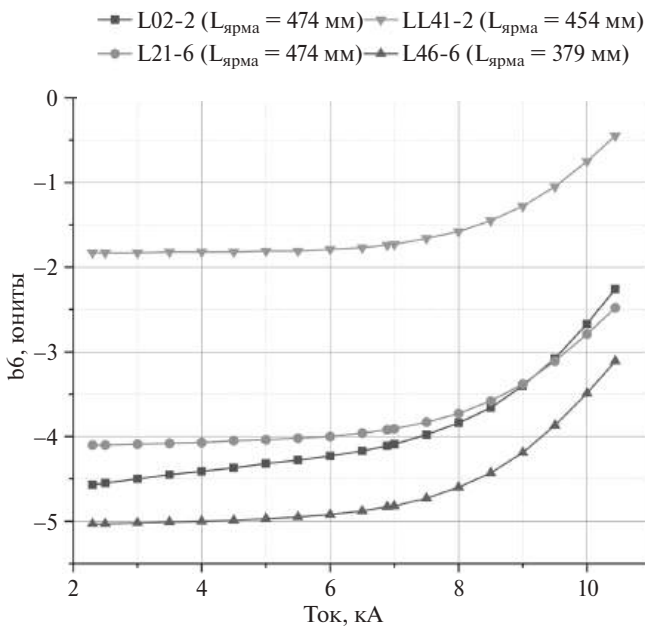


Рис. 17. Зависимость величины относительной интегральной гармоники b_6 от тока для различных групп квадрупольных магнитов арок коллайдера.

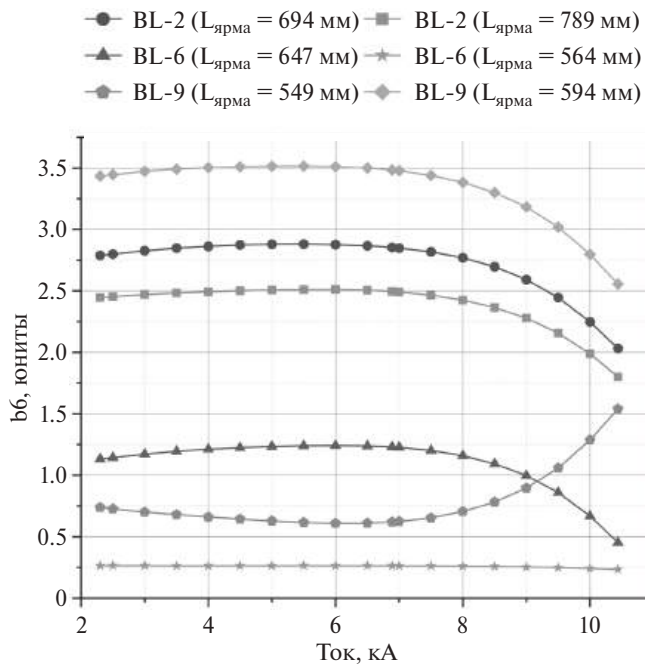


Рис. 18. Зависимость величины относительной интегральной гармоники b_6 от тока для различных групп БЛ коллайдера.

и находится в допуске на магнитные измерения. Для более детальной оценки данного эффекта требуются дополнительные исследования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершены серийная сборка и испытания структурных квадрупольных магнитов арок и БЛ коллайдера NICA. Результаты магнитных измерений будут в дальнейшем использованы при расчетах для определения расстановки модулей магнитов в кольце коллайдера, построении моделей, позволяющих повысить эффективность настройки ускорителя и расчета динамической апертуры. Для детальной оценки различных эффектов, таких как влияние материала лобовых пластин ярма на величину интегралов градиента магнитного поля и пр., проводятся дополнительные исследования. Исходя из полученных результатов магнитных измерений, заметно улучшено качество изготовления квадрупольных магнитов по сравнению с магнитами бустера [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex. Dubna, 2015.
2. *Shemchuk A.V., Donguzov I.I., Kashuninet M.A. et al.* // Proc. RuPAC-2018. Protvino, Russia. 2018. P. 353. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB33>
3. *Zolotykh D.A., Donguzov I.I., Kostromin S.A. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 383. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSB18>
4. *Беспалов Ю., Никифоров Д., Ходжибагиан Г. и др.* // Материалы RuPAC'23. Новосибирск, Россия. 2023. С. 264.
5. *Shandov M.M., Khodzhbagiyanet H.G., Kostromin S.A. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia. 2021. P. 41. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB02>
6. *Николайчук И.* // Материалы RuPAC'23. Новосибирск, Россия. 2023. С. 104.
7. <http://www.plastspb.ru>
8. <http://www.kollmorgen.com/>
9. <http://www.moflon.com/>
10. <http://www.eandc.ru/pdf/snc146.pdf>
11. *Cobb J.K., Muray J.J.* // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1965. V. 12. № 3. P. 395. <https://doi.org/10.1109/TNS.1965.4323660>
12. *Khodzhbagiyan H., Fischer E., Bepalov Yu. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2024. P. 1. <http://doi.org/10.1109/TASC.2024.3368993>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.384.66+621.318+539.1.076

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КВАДРУПОЛЯ FFS¹

© 2025 г. С. С. Козуб^а, * , Ю. В. Алтухов^а, И. В. Богданов^а, ** , А. В. Двойченков^а,
А. П. Лунев^а, А. А. Олюнин^а, В. М. Смирнов^а, Л. М. Ткаченко^а, В. И. Шувалов^а

^а Институт физики высоких энергий им. А.А. Логонова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

* e-mail: sergey.kozub@ihep.ru

** e-mail: bogdanov@ihep.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 30.04.2024 г.

Принята к публикации 04.06.2024 г.

Канал HED@FAIR ускорительного комплекса FAIR в Дармштадте (Германия) должен иметь фокусирующую систему (FFS), основными компонентами которой являются четыре сверхпроводящих (СП) квадрупольных магнита, обеспечивающие размер пучка около 1 мм. Эти магниты должны иметь уникальное сочетание внутреннего диаметра СП-обмотки – 260 мм и градиента магнитного поля – 37.5 Тл/м. НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ разработал конструкцию квадрупольного магнита, технологию изготовления его СП-обмотки и ее бандажирования, производства магнитопровода, их сборки в холодную массу квадрупольного магнита. Представлены результаты исследования частей холодной массы квадрупольного магнита FFS в процессе их изготовления и после сборки.

DOI: 10.7868/S3034564225080202

1. ВВЕДЕНИЕ

На создаваемом ускорительном комплексе ионов и антипротонов (FAIR, Германия) [1] планируются эксперименты по изучению фундаментальных свойств состояний с высокой плотностью энергии в веществе, генерируемых интенсивными пучками тяжелых ионов. Для этих экспериментов НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ создает четыре сверхпроводящих (СП) квадрупольных магнита для системы финальной фокусировки ионного пучка канала HED@FAIR [2]. Эти магниты должны обладать уникальным сочетанием большого внутреннего диаметра сверхпроводящей обмотки 260 мм и высокого градиента магнитного поля 37.5 Тл/м, а также неоднородностью магнитного поля не более $1 \cdot 10^{-3}$. Для выполнения этих требований необходимо разработать конструкцию и технологию производства с высокой точностью СП-обмотки, ее бандажа, магнитопровода,

их сборки в холодную массу. В статье представлены результаты изготовления и испытания холодной массы первого квадрупольного магнита.

2. КОНСТРУКЦИЯ КВАДРУПОЛЯ

Оптимизация геометрии квадрупольного магнита FFS [3–5], а также расчеты бандажа и усилий предварительного сжатия обмотки бандажом [6] позволили определить размеры СП-обмотки, бандажа и магнитопровода. Поперечное сечение квадрупольного магнита и его проектные параметры представлены на рис. 1 и в табл. 1. Сверхпроводящая обмотка квадрупольного магнита состоит из четырех двухслойных катушек. При вводе тока в обмотку возникают значительные поперечные силы, которые компенсируются бандажом, изготовленным из листов толщиной 1.6 мм нержавеющей стали АТІ 219 (UNS S21904), обладающей высокой прочностью и низкой магнитной проницаемостью. Точность изготовления обмотки

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

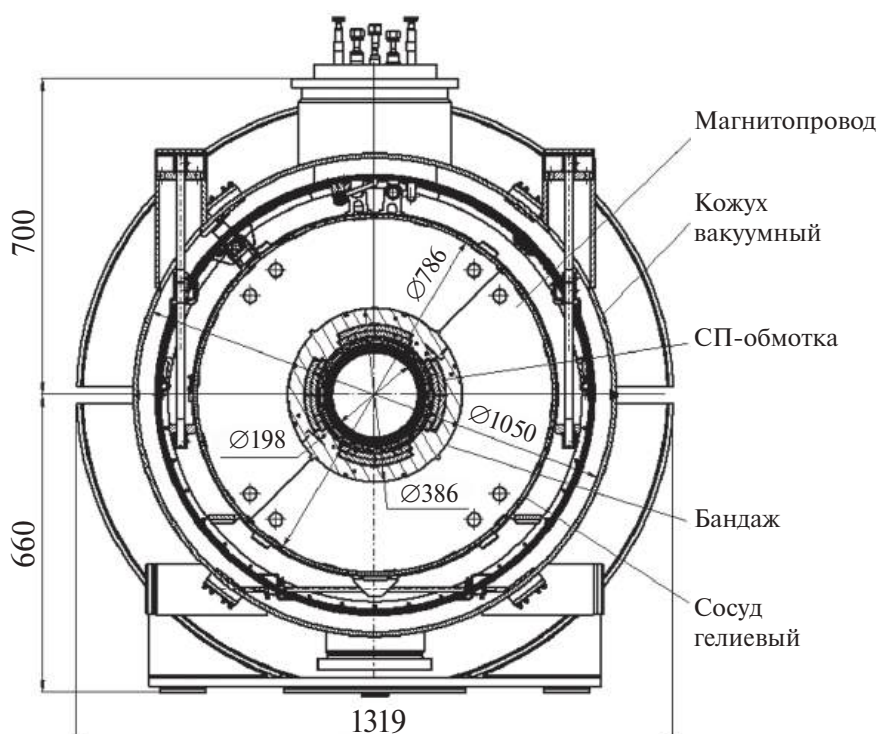


Рис. 1. Поперечное сечение квадруполь FFS.

определяется точностью производства СП-кабеля и бандажа, которые должны быть изготовлены с допуском на уровне десятков микрон, что при больших размерах бандажа является непростой задачей. Забандажированная обмотка (обмоточный блок) устанавливается в магнитопровод с зазором 0.2 мм.

Таблица 1. Проектные параметры квадруполь FFS

Параметр	Значение
Режим работы	Постоянный ток
Внутренний диаметр обмотки, мм	260
Длина обмотки, м	1.89
Эффективная длина обмотки, м	1.76
Градиент центрального поля, Тл/м	37.5
Номинальный ток, кА	5.73
Магнитное поле в обмотке, Тл	5.87
Критическая температура, К	5.8
Запасенная энергия, кДж	1079
Радиальная сила на октант (кН/м)	642
Азимутальная сила на октант (кН/м)	1211
Осевая сила, кН	480
Длина вакуумного сосуда, мм	2400
Вес холодной массы квадруполь, т	6.5
Общий вес квадруполь, т	10

Обмоточный блок с магнитопроводом (холодная масса) помещается в гелиевый сосуд. Холодная масса охлаждается жидким гелием при температуре 4.5 К и давлении 3 бара. Гелиевый сосуд на титановых тягах подвешивается в вакуумном сосуде. Между вакуумным и гелиевым сосудами находится тепловой экран, охлаждаемый гелием при температуре 50 К и давлении 13 бар.

3. КОНСТРУКЦИЯ ОБМОТОЧНОГО БЛОКА КВАДРУПОЛЯ

Для изготовления обмотки квадруполь использован композитный ниобий-титановый в медной матрице провод диаметром (0.85 ± 0.03) мм с критическим током (570 ± 50) А в поле 5 Тл при температуре 4.2 К.

Каждая из четырех двухслойных катушек квадруполь изготавливалась одним куском плоского транспонированного кабеля, параметры которого представлены в табл. 2. Голый кабель (без изоляции) имел трапециевидное поперечное сечение с основаниями 1.437 и 1.594 мм и при давлении 100 МПа его средняя толщина по длине кабеля колебалась в пределах ± 6 мкм. При диаметре СП-провода более 0.85 мм коэффициент упаковки кабеля превышал 0.87, качество кабеля ухудшалось, поэтому количество прово-

Таблица 2. Параметры СП-кабеля для квадруполя

Параметр	Величина			
	10	12	13	15
Номер катушки	10	12	13	15
Количество СП-проводов	28	27	27	27
Диаметр (количество в кабеле) СП-проводов, мм	0.86 (17) 0.87 (11)	0.86 (8) 0.87 (19)	0.865(17) 0.87 (10)	0.86 (12) 0.87 (7) 0.88 (8)
Угол/шаг транспонирования, градусы/мм	14/91	16/86	16/86	16/86
Плотность упаковки	0.887	0.868	0.868	0.87
Ширина голого кабеля, мм	12.49–0.06	12.52–0.08	12.49–0.04	12.52–0.08
Ширина кабеля в изоляции, мм	12.81–0.02	12.78–0.04	12.76–0.02	12.76–0.04
Средняя толщина голого кабеля при давлении 100 МПа, мм	1.508 ± 0.003	1.507 ± 0.005	1.509 ± 0.003	1.513 ± 0.006
Средняя толщина кабеля в изоляции при давлении 100 МПа, мм	1.699 ± 0.005	1.707 ± 0.004	1.705 ± 0.005	1.696 ± 0.010

лок в кабеле было уменьшено с 28 до 27. В этом случае расчетная величина критической температуры квадруполя уменьшается на 0.04 К.

Изоляция кабеля состояла из трех слоев полиимидной пленки толщиной 25 мкм и слоя стеклоленты толщиной примерно 70 мкм, пропитанной эпоксидным компаундом. Спекание катушек производилась при температуре 150 °С и давлении 100 МПа. Для изготовления внутреннего слоя катушки использовалось 140 м кабеля. Этот слой состоял из двух блоков 27+11 витков, разделенных латунной проставкой для получе-

ния необходимого качества поля. На наружный слой, состоящий из 47 витков, потребовалось 180 м кабеля. Проставка из стеклотекстолита G10 толщиной 0.5 мм находилась между внутренним и наружным слоями.

Выбор катушек для обмотки квадруполя осуществлялся по результатам измерения отклонения их азимутального размера от размера калибра при давлении 100 МПа, которое не превышало 200 мкм (табл. 3). Измерения зависимости деформации катушек в азимутальном направлении от усилия сжатия (рис. 2) были

Таблица 3. Результаты измерений СП-катушек квадруполя

Параметр	Величина			
	10	12	13	15
Номер катушки				
<i>Внутренний слой</i>				
Полная длина, мм	1905	1904	1905	1904
Длина прямой части, мм	1740	1739	1740	1739
Отклонение азимутального размера от калибра при давлении 100 МПа:				
– в середине слева, мкм	195	–12	25	22
– в середине справа, мкм	12	–90	–89	–106
<i>Внешний слой</i>				
Полная длина, мм	1910	1909	1908	1910
Длина прямой части, мм	1678	1677	1679	1678
Отклонение азимутального размера от калибра при давлении 100 МПа:				
– в середине слева, мкм	48	55	–5	–180
– в середине справа, мкм	39	10	33	20
Сопротивление катушки при $T = 22^{\circ}\text{C}$, Ом	0.6054	0.6303	0.6275	0.6186
Индуктивность, мГн	9.07	9.05	9.05	9.03

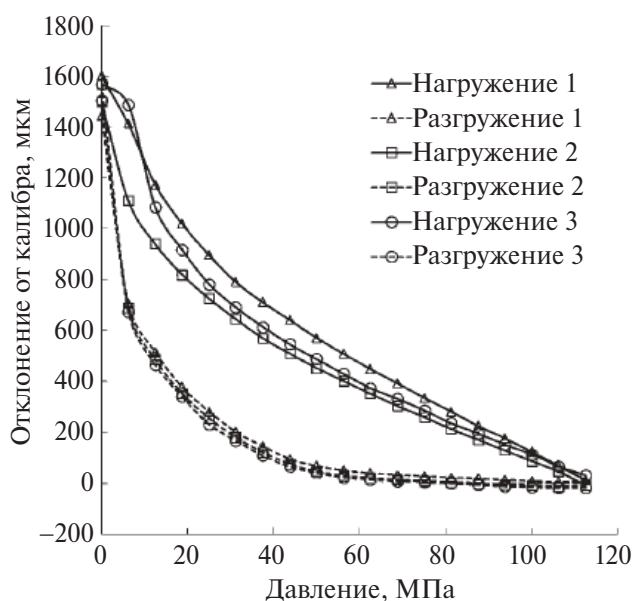


Рис. 2. Отклонение азимутального размера СП-катушки от калибра при различном давлении в цикле нагружение–разгружение.

использованы для расчета модуля упругости СП-катушек (рис. 3), который необходим для расчета давления сжатия СП-обмотки бандажом в азимутальном направлении (престресса) при сборке обмоточного блока.

Результаты расчета [6] показали, если после сжатия прессом обмоточного блока престресс в обмотке составит во внутреннем и в наружном слое 100 МПа, то после снятия прессовой нагрузки падение престресса составит 5 МПа во внутреннем слое и 10 МПа в наружном слое.

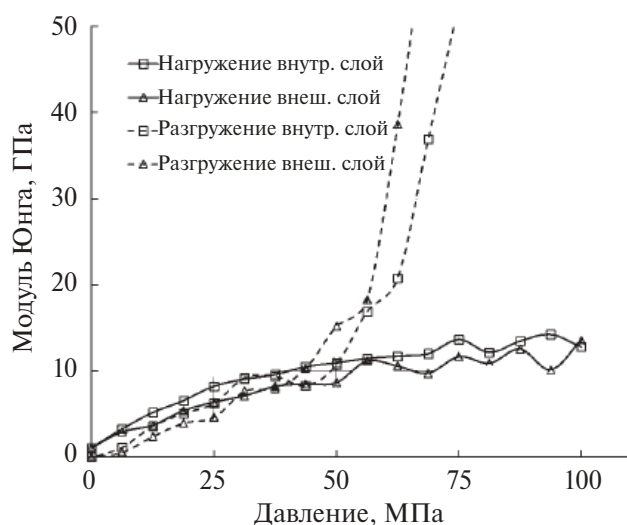


Рис. 3. Результаты расчета модуля упругости СП-катушки в азимутальном направлении при различном давлении в цикле нагружение–разгружение.

В течение нескольких лет ползучесть образца обмотки составила 0.1 % [7], что соответствует падению престресса 16 МПа. Расчеты установили, что после охлаждения до 4.5 К престресс уменьшится на 20 МПа во внутреннем слое и 16 МПа в наружном слое, а после введения тока до 5.73 кА падение престресса для первого витка от полюса (где максимальное магнитное поле) составит 30 МПа для внутреннего слоя и 28 МПа для наружного слоя. Таким образом, при номинальном токе 5.73 кА усилие сжатия составит 29 МПа в внутреннем слое и 30 МПа в наружном слое обмотки, что обеспечит ее механическую стабильность.

Точность изготовления СП-обмотки, особенно в азимутальном направлении, сильно влияет на магнитные характеристики квадруполь. Эта точность существенно зависит от точности изготовления бандажа, в первую очередь его внутренних размеров, поэтому допуски на эти размеры составляли несколько десятков микрон. Обеспечение таких допусков при наружном диаметре бандажа 386 мм достаточно сложная задача.

Для обеспечения нужной точности пластины бандажа изготавливались электроэрозионным способом. Непростой задачей оказался контроль размеров бандажа. Хотя заявленная точность измерительных машин составляла 1 мкм, они давали значительный разброс результатов измерений, особенно симметричных размеров. Поэтому была разработана методика и изготовлено приспособление, позволившие провести необходимые измерения, скорректировать процесс изготовления и обеспечить заданные допуски размеров пластин бандажа.

Четыре катушки собирались в обмотку на специально разработанной разжимной оправке, на которой бандажирование обмотки осуществлялось в горизонтальном положении. Пара воротников бандажа устанавливалась на обмотке в горизонтальном, затем в вертикальном положении и так поочередно на участке длиной 65 мм. Сжатие обмотки воротниками осуществлялось участками длиной 65 мм четырьмя гидроцилиндрами с усилием 27 т на каждом из них, чтобы обеспечить престресс в СП-обмотке 100 МПа. Фиксация воротников в сжатом состоянии осуществлялась шпонками из нержавеющей стали 1.4435.

В связи с трудностью изготовления штамповкой пластин магнитопровода большого размера из листов стали 2081 толщиной 2 мм

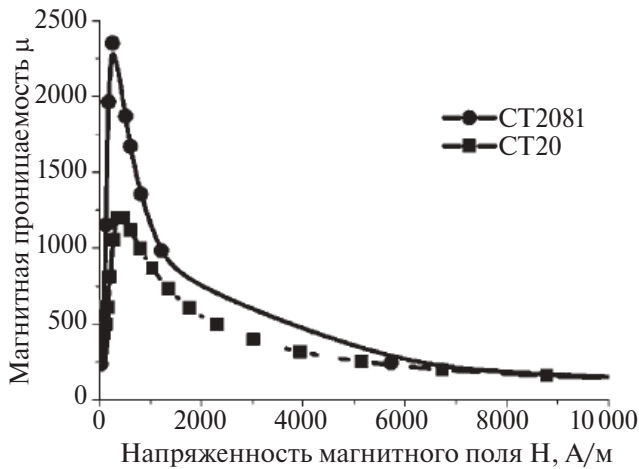


Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости сталей 2081 и 20 от магнитного поля при температуре 77 К.

он был собран из пластин стали 20 толщиной 22 мм, изготовленных механической обработкой. Сборка магнитопровода осуществлялась в прессе с усилием сжатия 20 т, что обеспечило заданный коэффициент его упаковки 0.98. На рис. 4 показаны результаты измерения зависимости магнитной проницаемости сталей 2081 и 20 от магнитного поля при температуре 77 К. Проведенный по результатам измерений расчет показал, что замена стали 2081 на сталь 20 практически не повлияла на характеристики квадруполь.

В процессе изготовления СП-катушек, обмоточного блока, магнитопровода, сборки холодной массы в обечайку гелиевого сосуда кон-

тролировались их геометрические размеры, отсутствие электрических замыканий между витками обмотки и обмотки на корпус. Результаты измерений подтвердили получение заданных параметров магнита.

На рис. 5 показан внешний вид СП-обмоточного блока квадруполь FFS с магнитопроводом, размещенных внутри обечайки гелиевого сосуда.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкция и технология изготовления квадруполь FFS с уникальным сочетанием внутреннего диаметра сверхпроводящей обмотки — 260 мм и высокого градиента магнитного поля — 37.5 Тл/м. Изготовление и сборка СП-обмотки и бандажа выполнено с заданной точностью для обеспечения проектных магнитных характеристик квадруполь. Сборка и бандажирование СП-обмотки магнита осуществлены по созданной оригинальной технологии с учетом результатов расчета напряженно-деформированного состояния обмоточного блока СП-квадруполь. Обмотка установлена в магнитопровод, изготовленный с высоким коэффициентом упаковки 0.98, и собрана в обечайку гелиевого сосуда. На всех этапах сборки квадруполь FFS проводились измерения его параметров, подтвердивших проектные характеристики магнита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stocker H., Sturm C.* // Nucl. Phys. 2011. V. A855. P. 506.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2011.02.117>
2. *Gutbrod H.H., Gross K.D., Henning W.F., Metag V.* An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons. Conceptual design report. GSI, 2001.
<https://inspirehep.net/literature/567994>
3. *Tkachenko L., Ageev A., Altuhov Y., Bogdanov I., Kashtanov E., Kozub S., Varentsov D., Zinchenko S.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 941. P. 162323.
<http://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.064>
4. *Агеев А.И., Алтухов Ю.В., Богданов И.В., Каштанов Е.М., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Ткаченко Л.М.* // Вопросы атомной науки и техники.



Рис. 5. Обмоточный СП-блок с магнитопроводом в обечайке гелиевого сосуда квадруполь FFS.

- Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 4 (105). С. 28.
5. Tkachenko L., Altukhov Y., Bogdanov I., Kozub S. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2022. V. 32. № 4. P. 4000105.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3141979>
 6. Altukhov Y., Ageev A., Bogdanov I., Kozub S., Ryabova T., Tkachenko L., Riabchikova A. // Proc. of “RuPAC’21” Conf., Alushta, 2021. P. 156.
<http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA13>
 7. Kozub S., Zubko V. // Proc. of Inter. Conf. on Magn. Technol. MT-15. 1997. Beijing, China. V. 2. P. 1186.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 538.945

СТАТУС ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНО-КРИОСТАТНОЙ
СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA. РЕЗУЛЬТАТЫ КРИОГЕННЫХ
ИСПЫТАНИЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ¹

© 2025 г. Д. Н. Никифоров^{а,*}, Ю. Г. Беспалов^а, **Г. Г. Ходжибагиян^а**, А. А. Котова^а,
Д. А. Золотых^а, В. В. Борисов^а, Ю. В. Гусаков^а, С. А. Коровкин^а, А. В. Кудашкин^а,
П. И. Кудряшов^а, Г. Л. Кузнецов^а, М. В. Петров^а, Е. В. Сергеева^а, Р. В. Талызин^а

^а Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

* e-mail: dmitnik@jinr.ru

Поступила в редакцию 18.12.2023 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принята к публикации 11.09.2024 г.

Ускорительный комплекс NICA состоит из трех сверхпроводящих колец: работающего с 1993 г. синхротрона Нуклотрон, введенного в эксплуатацию с 2021 г. синхротрона бустер и строящегося коллайдера. В статье представлены статус производства элементов магнитно-криостатной системы коллайдера проекта NICA и результаты криогенных испытаний сверхпроводящих магнитов, включающих в себя тренировку сверхпроводящих обмоток, измерение параметров магнитного поля, измерения статического теплопритока и динамических тепловыделений.

DOI: 10.7868/S3034564225080218

1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания коллайдера проекта NICA требуется произвести и испытать 290 сверхпроводящих (СП) магнитов. В научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий (НЭОСМТ) в лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) организовано уникальное производство СП-магнитов с высокотехнологичной линией сборки, испытаний и сертификации [1]. За время работы производства было выпущено 448 СП-магнитов для проектов NICA ОИЯИ и SIS100 FAIR. В обоих проектах применяются СП-магниты типа “оконная рама” с седловидной СП-обмоткой из сверхпроводника NbTi [2]. СП-кабель создается по уникальной технологии и называется кабель типа Нуклотрон. Было произведено более 14 км СП-кабеля.

2. ТИПЫ СП-МАГНИТОВ

Для кольца коллайдера были разработаны сверхпроводящие магниты пяти различных типов, основные характеристики которых приведены в табл. 1. В регулярную структуру коллайдера FODO входит два типа СП-магнитов (рис. 1) – дипольный магнит и квадрупольная линза. В СП-магниты нерегулярной структуры (рис. 2) входят линзы финального фокуса пучка (ЛФФ), которые делятся на три подтипа: ЛФФ1, ЛФФ2 и ЛФФ3; блок квадрупольных линз (БЛ), который делится на три подтипа по длинам ярм: БЛ1, БЛ2 и БЛ3, и дипольные магниты вертикального сведения/разведения пучков (BV) двух подтипов: BV1 и BV2.

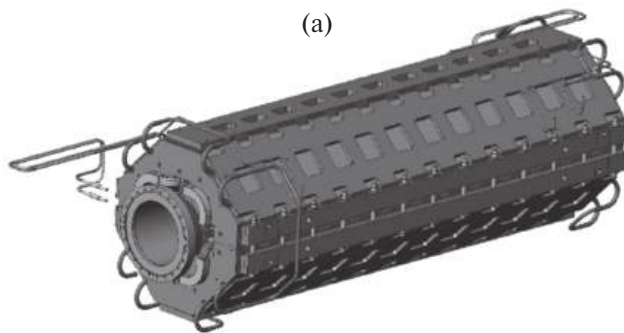
Каждый СП-магнит проходит две основные стадии производства: первая – криогенные испытания, вторая – окончательная сборка модуля с высоковакуумными камерами (ВВК)

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

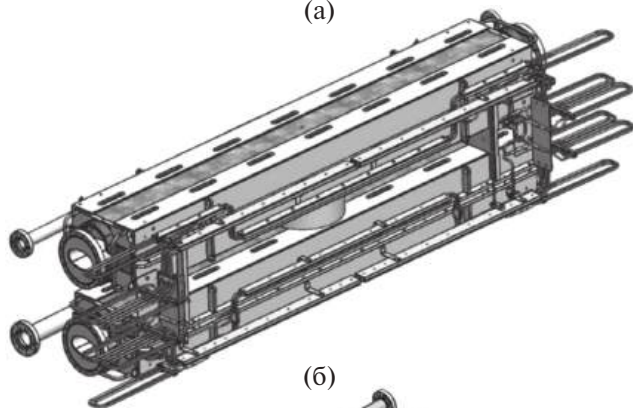
Таблица 1. Основные характеристики СП-магнитов коллайдера

Тип магнита	Количество	Максимальное магнитное поле/градиент, Тл/м	Эффективная длина магнитного поля, м	Масса, кг	Статический теплоприток, Вт	Общий теплоприток, Вт	Индуктивность, мкГн				
М	80	1.8	1.942	1779	5.9	7.7	450				
Л	46	23.1	0.477	501	16.1	19.7	47				
	0.462										
	0.382										
	0.707										
БЛ1	4	23.1	0.804	1264	40.5	74.1	143				
БЛ2			0.693	1078	35.97	68.35	122				
			0.584								
БЛ3			0.573	1015	36.44	65.96	113				
ЛФФ1	4	19.2	0.605	940	10.3	15.2	579				
ЛФФ2			1.415					1339	12.2	16.8	858
ЛФФ3			0.680					640	15.9	26.4	422
BV1	4	1.35 Тл	1.38	1046	19.7	21.7	209				
BV2				1450	—	115					

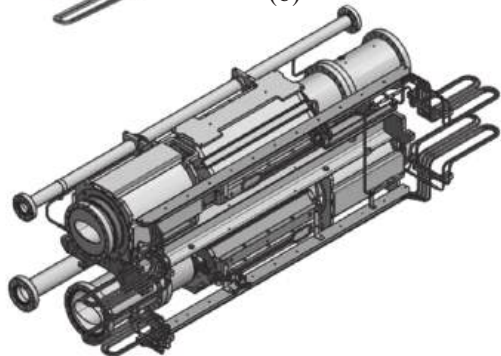
(a)



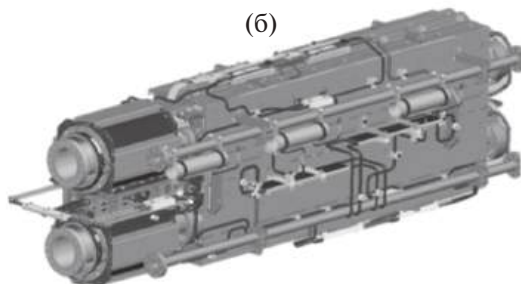
(a)



(б)



(б)



(в)

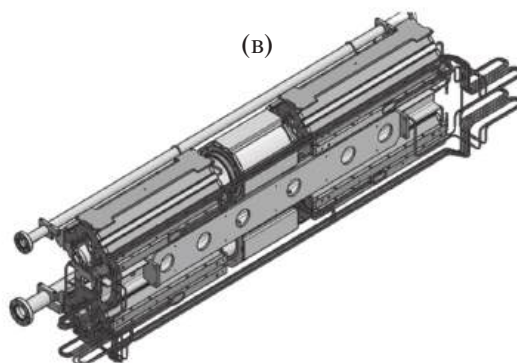


Рис. 1. СП-магниты регулярной структуры: а – дипольный магнит, б – квадрупольная линза.

Рис. 2. СП-магниты нерегулярной структуры: а – линза финальной фокусировки пучка ЛФФ2, б – дипольный магнит сведения/разведения пучка BV2, в – блок квадрупольных линз.

и выпуск технического паспорта. Криогенные испытания являются основными испытаниями СП-магнита, которые показывают стабильность его работы в рабочих условиях при температуре 4.5 К и максимальном магнитном поле/градиенте (см. табл. 1).

Криогенные испытания включают в себя следующие этапы: охлаждение СП-магнита до температуры 4.5 К, тренировка СП-обмоток, измерение параметров магнитного поля, замер тепловых нагрузок и гидравлического сопротивления СП-магнита во время работы в цикле, проверку герметичности коммуникаций магнита и отепление СП-магнита. Каждый этап дает важные экспериментальные данные, на основе анализа которых принимается решение о пригодности СП-магнита для эксплуатации в коллайдере (рис. 1, 2).

После успешного выполнения всех этапов криогенных испытаний наступает вторая стадия производства СП-магнита – окончательная сборка с ВВК и выпуск технического паспорта

модуля, включающего в себя около 30 отчетов и протоколов измерений и испытаний в зависимости от типа СП-магнита.

Производство магнитов для проекта NICA находится на завершающей стадии. Все магниты регулярной структуры, а также блоки линз нерегулярной структуры успешно прошли криогенные испытания и перевезены в туннель для дальнейшего монтажа и сборки в кольцо. Линзы финальной фокусировки пучка уже прошли этап криогенных испытаний и подготавливаются к окончательной сборке с ВВК.

3. СБОРКА НЕМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНО-КРИОСТАТНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА

Кроме 290 СП-магнитов в структуру магнитно-криостатной системы коллайдера входят более 40 элементов обводных участков общей длиной более 160 м (рис. 3а) и два участка ввода криогенных жидкостей и тока (рис. 3б). Эле-

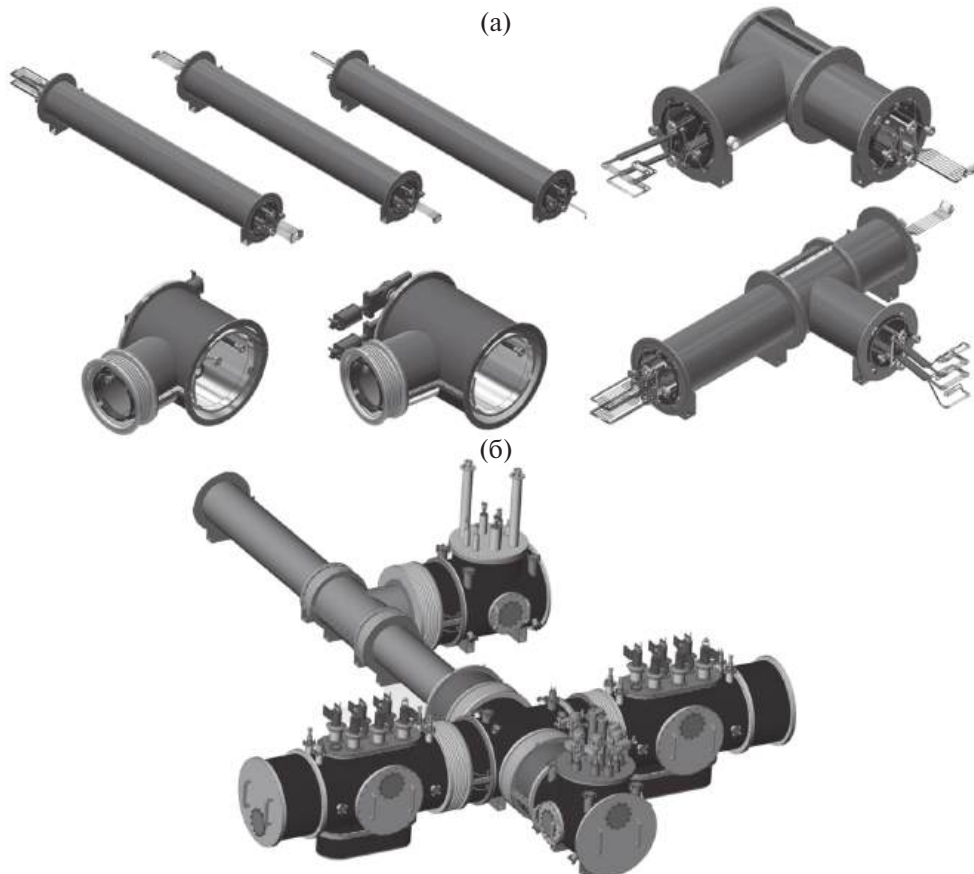


Рис. 3. Немагнитные элементы коллайдера: **а** – несколько типов элементов обводных участков, **б** – западный участок ввода криогенных жидкостей и тока коллайдера.

менты обводных участков необходимы для провода криогенных и токовых коммуникаций параллельно траектории пучка в местах установки теплых элементов коллайдера, таких как ВЧ-станции, электронное охлаждение и т.д. Внутри элементов находятся гелиевые и азотные коллекторы, а также токовые связи, соединяющие магнитные СП-элементы кольца. Разработано более 20 конфигураций элементов. Производство токовых связей завершено. Для сборки пятиметровых элементов обводных участков в туннели кольца организована специальная зона сборки.

Для обеспечения охлаждения, криостатирования и питания током кольца коллайдера применяются два участка ввода для западной и восточной арок коллайдера. Каждый участок включает в себя: два тоководных криостата по шесть ВТСП-тоководов и два криостата для ввода жидких азота и гелия, а также группы криогенной регулирующей арматуры и измерительной аппаратуры. Участок ввода является частью коллайдера, в котором повторяются все основные системы колец: криогенная, вакуумная, система потенциальной защиты, термометрия и измерения давлений в азотных и гелиевых коммуникациях, а также дополнительно система управления охлаждением ВТСП-тоководов. Все элементы участков ввода пройдут криогенные испытания для проверки гелиевых коммуникаций на герметичность и работоспособность всех подсистем.

Сборка элементов обводных участков должна была закончиться в декабре 2024 года, сборка участков ввода криогенных жидкостей и тока – в феврале 2025 года.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ КРИОГЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СП-МАГНИТОВ

После сборки СП-магнита на испытательном плече начинается первый этап криогенных испытаний. С помощью гелиевого сателлитного рефрижератора [3] производительностью 100 Вт при максимальном расходе 7 г/с магнит охлаждается до температуры 4.5 К. Охлаждение осуществляется в два этапа: с 297 К до 120 К и с 120 К до 4.5 К. Ввиду конструкционных особенностей ярм магнитов в режим охлаждения введено ограничение скорости 5 К/ч. После охлаждения СП-магнита до температуры 4.5 К криогенные испытания проходят в соответствии с ранее указанной последовательностью.

Общее время, затраченное на испытание дипольного магнита коллайдера, составляет 117 ч. На рис. 4 показано распределение времени одного криогенного испытания дипольного магнита коллайдера. Самые затратные этапы – это охлаждение и отепление магнита, примерно 87% времени, само же испытание занимает около 13% от общего времени. Для уменьшения длительности отепления магнита применяется принудительная циркуляция теплового потока азота внутри изоляционного объема испытательного плеча. Данное техническое решение позволило вдвое сократить время отепления магнитов.

На рис. 5а представлен график тренировок всех СП-обмоток дипольных магнитов коллайдера. Магниты, в процессе тренировки которых количество срывов сверхпроводимости находится выше штриховой линии, должны пройти повторные криогенные испытания для проверки свойства запоминания тренировочного

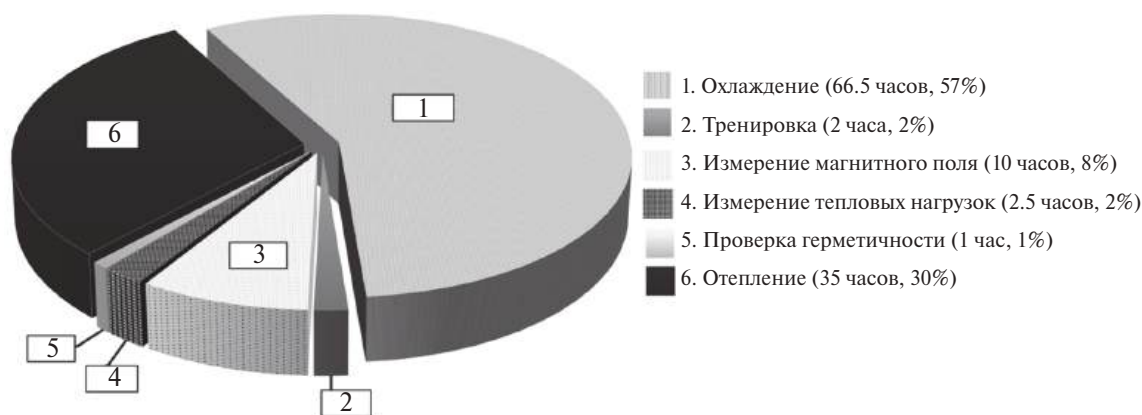


Рис. 4. Распределение времени этапов криогенных испытаний дипольного магнита коллайдера.

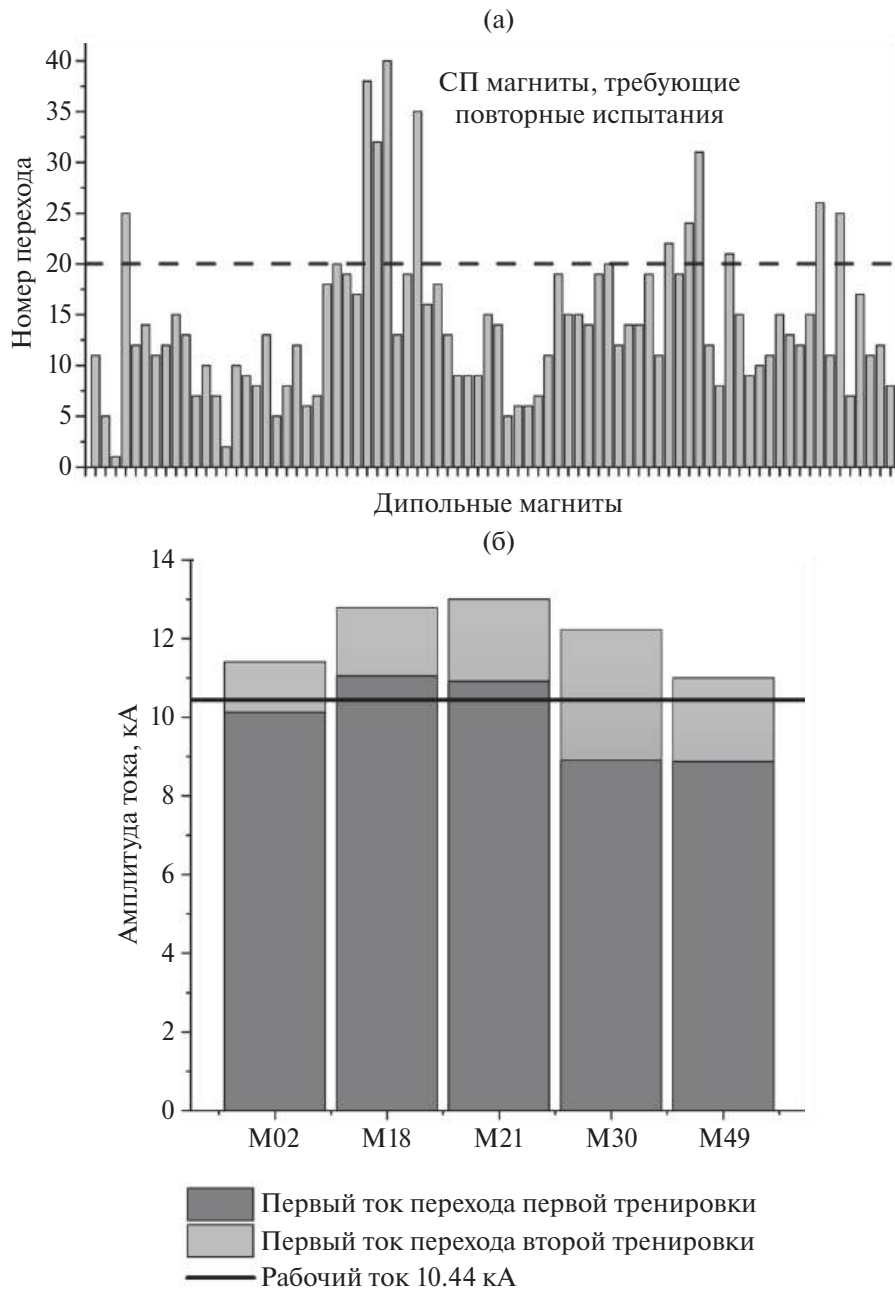


Рис. 5. Результаты тренировки СП-обмоток дипольных магнитов коллайдера: **а** – график тренировок всех СП-обмоток, **б** – первый ток перехода при повторных криогенных испытаниях.

тока СП-обмоткой. При повторной тренировке первый срыв сверхпроводимости должен быть выше рабочего тока, на рис. 5б показан результат повторных тренировок для пяти дипольных магнитов коллайдера.

Для проведения магнитных измерений разработаны специальные магнитометрические системы на базе метода вращающихся гармонических катушек [4]. Общее число магнитометров в данных системах составляет: шесть единиц для дипольных магнитов, шесть единиц для линз

арок и четыре магнитометра, укомплектованные в два измерительных вала, для БЛ-коллайдера. В рамках проведения магнитных измерений при температуре 4.5 К проводятся измерения интегралов магнитного поля и относительных интегральных гармоник. На основе результатов магнитных измерений в дальнейшем проводится расстановка магнитов в коллайдере NICA. На рис. 6 представлено распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля дипольных магнитов коллайдера NICA при мак-

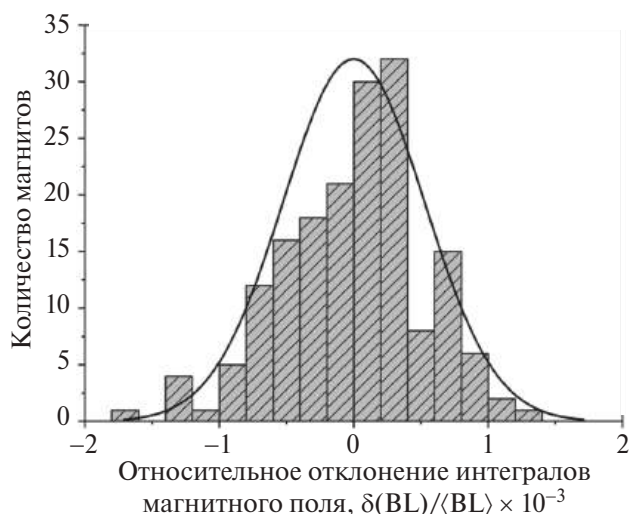


Рис. 6. Распределение относительных отклонений интегралов магнитного поля дипольных магнитов коллайдера NICA при максимальном рабочем токе 10.44 кА.

симальном рабочем токе. Подробная информация о результатах магнитных измерений дипольных магнитов коллайдера NICA приведена в работе [4].

Тепловая нагрузка на СП-магнит включает в себя статический теплоприток и теплоприток при работе с током. При подведении рабочего тока на магниты коллайдера источником тепла являются медные спаи между испытательным стендом и магнитом, которые отсутствуют при монтаже магнитов на кольцо. Типы магнитов, в состав которых входят корректирующие магниты, имеют дополнительный теплоприток от слаботочных тоководов, питающих обмотки корректоров. Измерение тепловых нагрузок осуществляется с помощью калориметрического метода [5].

Криогенные испытания можно разделить на два типа, такие как серийные испытания, которые проводятся по штатной программе испытаний, согласно с планом производства и исследовательские испытания, цель которых заключается в исследовании различных характеристик и режимов работы самого магнита и его систем. К исследовательским испытаниям относятся: определение гидравлического сопротивление охлаждающего канала магнитов и подбор его; проведение циклов магнитных измерений для калибровки системы измерения магнитного поля; проведение исследований с целью определения времени распространения нормальной зоны; определение тепловых нагрузок

различных элементов магнита; определение в пространстве положения магнита в процессе охлаждения и в режиме криостатирования для контроля работы системы подвеса и т. д.

В общей сложности для завершения производства магнитов регулярной и нерегулярной структуры потребовалось проведение 241 криогенного испытания (без учета магнитов серии BV). Из них 202 испытания были серийными, а 39 испытаний были направлены на исследование. Средний процент исследовательский испытаний на каждый новый тип магнитов составляет 23.5%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малый процент повторных серийных испытаний и успешные первые пуски бустерного синхротрона говорят о высокой надежности магнитов и качестве магнитного поля СП-магнитов, производимых в НЭОСМТ ЛФВЭ ОИЯИ на базе технологии изготовления СП кабеля типа Нуклотрон.

Все элементы магнитно-криостатной системы коллайдера было запланировано произвести, собрать, испытать и установить в кольцо до марта 2025 года для начала технического пуска систем комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikiforov D.N., Agapov N.N., Khodzhibagiyan H.G. et al.* // Journal of Physics Conference Series, 2014. V. 507. P. 032034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/507/3/032034>.
2. *Khodzhibagiyan H.G., Borisov V.V., Kekelidze V.D. et al.* // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2019. V. 29. № 5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2901591>.
3. *Никифоров Д.Н.* Разработка и оптимизация систем криообеспечения стенда для испытаний сверхпроводящих магнитов проекта NICA. Дис. ... канд. тех. наук. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 2020.
4. *Zolotikh D.A., Borisov V.V., Donguzov I.I. et al.* // Proc. of the XXVII Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC-2021). Alushta, 2021. P. 383. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC18>
5. *Bespalov Y.G., Nikiforov D.N., Khodzhibagiyan H.G. et al.* // Proc. of the 15th Cryogenics. Prague, 2019. <https://doi.org/10.18462/iir.cryo.2019.0016>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.626:538.945

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ВИГГЛЕР С ПОЛЕМ 2.7 Тл И ПЕРИОДОМ
27 мм ДЛЯ СТАНЦИИ “БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ”
НА ИСТОЧНИКЕ СКИФ¹

© 2025 г. А. А. Седов^{a, *}, А. В. Брагин^a, А. А. Волков^{a, b}, А. И. Ерохин^a,
А. В. Зорин^a, Ф. П. Казанцев^a, П. В. Каноник^a, Н. А. Мезенцев^{a, b}, А. Н. Сафронов^a,
О. А. Тарасенко^a, С. В. Хрущев^{a, b}, В. М. Цуканов^{a, b}, В. А. Шкаруба^{a, b}

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

* e-mail: A.A.Sedov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.01.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Для станции 1–3 “Быстропротекающие процессы” строящегося источника синхротронного излучения СКИФ необходимо вставное устройство, генерирующее фотоны с энергией вплоть до 70 кэВ и имеющее максимальный поток излучения с энергией 35 кэВ. Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм, полем 2.7 Тл при межполюсном зазоре 7 мм удовлетворяет данным требованиям. Представлены основные характеристики и особенности конструкции магнитной и криогенной систем этого вставного устройства. Описаны теоретические расчеты параметров магнитной системы, а также параметры излучения из вставного устройства. Проведены оценки влияния вигглера на динамику пучка электронов в накопительном кольце. Представлены результаты измерений магнитного поля прототипа вигглера.

DOI: 10.7868/S3034564225080229

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент в наукограде Кольцово ведется строительство нового центра коллективного пользования (ЦКП) Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ). Планируется, что СКИФ будет работать на энергии 3 ГэВ и с горизонтальным натуральным эмиттансом 75 пм·рад, генерируя синхротронное излучение с предельной яркостью в диапазоне от 100 эВ до 100 кэВ для 30 различных экспериментальных станций [1]. Основными устройствами генерации фотонов будут сверхпроводящие многополюсные вставные устройства со знакопеременным магнитным полем – вигглеры и ондуляторы. Из 30 планируемых станций в первой очереди

строительства источника предполагается ввести в эксплуатацию 6 станций, среди которых станция 1–3 “Быстропротекающие процессы”. На данной станции предполагается реализовывать методики малоуглового рентгеновского рассеяния, абсорбционного и фазового контраста, поэтому в качестве источника синхротронного излучения (СИ) будет использоваться сверхпроводящий вигглер, параметры которого были оптимизированы для получения максимального потока фотонов с энергией 35 кэВ [2].

Сверхпроводящий вигглер представляет собой многополюсный электромагнит со знакопеременным магнитным полем, состоящий из двух половинок, размещенных выше и ниже вакуумной камеры электронного пучка. Магнит

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



Рис. 1. Общий вид магнитной системы сверхпроводящего вигглера с полем 2.7 Тл для станции 1–3.

помещен в специальный криостат с косвенным охлаждением на основе криокулеров, работающих без испарения жидкого гелия. Общий вид сверхпроводящего вигглера представлен на рис. 1. Основные параметры описываемого вигглера представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сверхпроводящего вигглера для станции 1–3

Параметр	Значение
Номинальное магнитное поле, Тл	2.7
Период вигглера, мм	27
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	56
Число основных полюсов	144
Число полюсов 3/4	2
Число полюсов 1/4	2
Критическая энергия, кэВ	16.2
Коэффициент ондуляторности	6.8
Магнитная длина, мм	~ 2000

2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Основные параметры вигглера после оптимизации были следующие: магнитное поле 2.7 Тл, период 27 мм и количество основных полюсов 144. Конфигурация магнитной системы вигглера – горизонтальный рейстрек [3]. Параметры изготовленных магнитных полюсов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры сверхпроводящих полюсов

Параметры катушек	Главный полюс	Полюс 3/4	Полюс 1/4
Число слоев	4	5	1
Количество витков в слое	14	14	14
Высота, мм	21	21	21
Длина сердечника, мм	6.6	6.6	6.6
Ширина сердечника, мм	65	65	65
Ток, А	772	406	366

Магнитная система вигглера была собрана из сверхпроводящих катушек и корпуса, который был изготовлен из алюминиевого сплава 6063 с высокой теплопроводностью при низких температурах. Корпус, во-первых, выполнял функцию механической рамы, поддерживающей все катушки магнита, и, во-вторых, обеспечивал отвод тепла от катушек для их охлаждения. Данный корпус был собран из двух половинок, расположенных выше и ниже оси вигглера и специальных проставок, обеспечивающих необходимый зазор. Удаленные от срединной плоскости части сердечников катушек прижимались винтами к внутренней поверхности алюминиевого корпуса, что обеспечивало тепловой контакт и правильное геометрическое положение катушек в пространстве. Катушки на каждой половине магнита были сжаты между собой вдоль продольной координаты плитами из нержавеющей стали с помощью шпилек из бериллиевой бронзы для предотвращения перемещения витков обмотки под действием сил магнитного поля.

Катушка была изготовлена в виде горизонтального рейстрека. Такая форма позволяет обеспечить требуемую поперечную однородность поля. При выборе ширины магнитного ядра учитывалось, что в зазоре будет размещена вакуумная камера с поперечными размерами не менее 60 мм. Материал ядра – сталь АРМКО. В качестве обмотки был выбран сверхпроводящий провод Nb–Ti диаметром 0.9 мм с критическим током 520 А в поле 7 Тл при температуре 4.2 К. Расчетное положение рабочей точки, характеризующей состояние сверхпроводящего провода в обмотках катушек с данными параметрами, относительно нагрузочной кривой сверхпроводящего провода представлено на рис. 2.

Магнитное поле вигглера при установке его на действующий накопитель не должно влиять

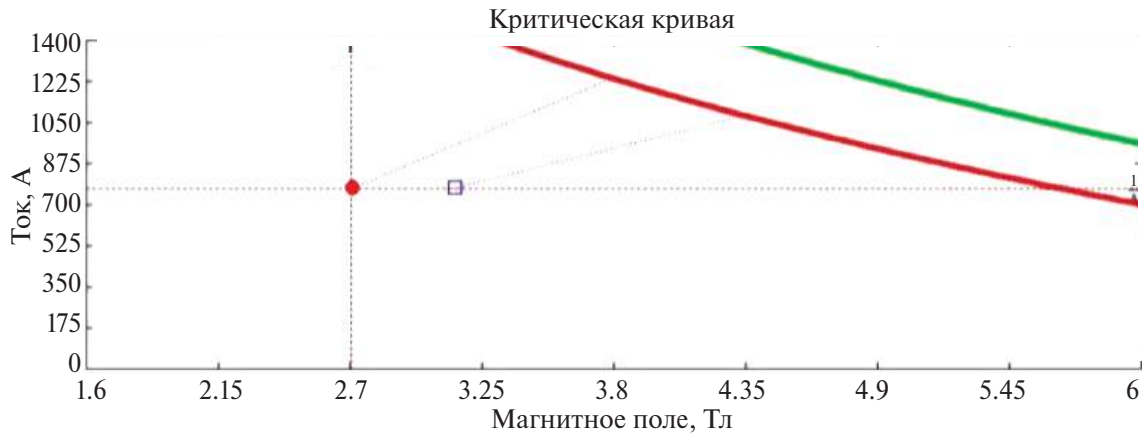


Рис. 2. Расположение рабочей точки, характеризующей состояние сверхпроводящего провода в обмотках, относительно критической кривой сверхпроводящего провода.

на орбиту электронов вне вставного устройства, поэтому для замыкания орбиты на концах магнитной системы вигглера были установлены корректирующие полюсы. В данной магнитной структуре была выбрана схема с боковыми полюсами 3/4 и 1/4, которые запитываются двумя независимыми токами. Для упрощения изготовления боковых катушек они имеют такие же железные сердечники, как у основного полюса, и одинаковое число витков в слое.

Все катушки магнитов соединены последовательно с использованием технологии холодной сварки, которая снижает сопротивление соединений более чем в 1000 раз по сравнению с обычной пайкой. Это позволяет радикально снизить джоулев нагрев контактов между катушками, учитывая, что на полноразмерном магните имеется более 300 межполюсных соединений.

На верхней части магнита была расположена пассивная часть системы защиты катушек, представляющая собой набор резисторов и диодов, соединенных параллельно с группами катушек для ограничения максимального напряжения, возникающего на них во время срыва (рис. 3). Активная часть системы защиты представляла собой специальный детектор срыва сверхпроводимости, отключающий источники питания при появлении напряжения на защитных резисторах.

3. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА

Криогенная система вигглера основана на принципе косвенного охлаждения с помощью криокулеров [4] (рис. 4).

Криостат был собран из внешнего корпуса, экранов с температурами 60 и 20 К для уменьше-

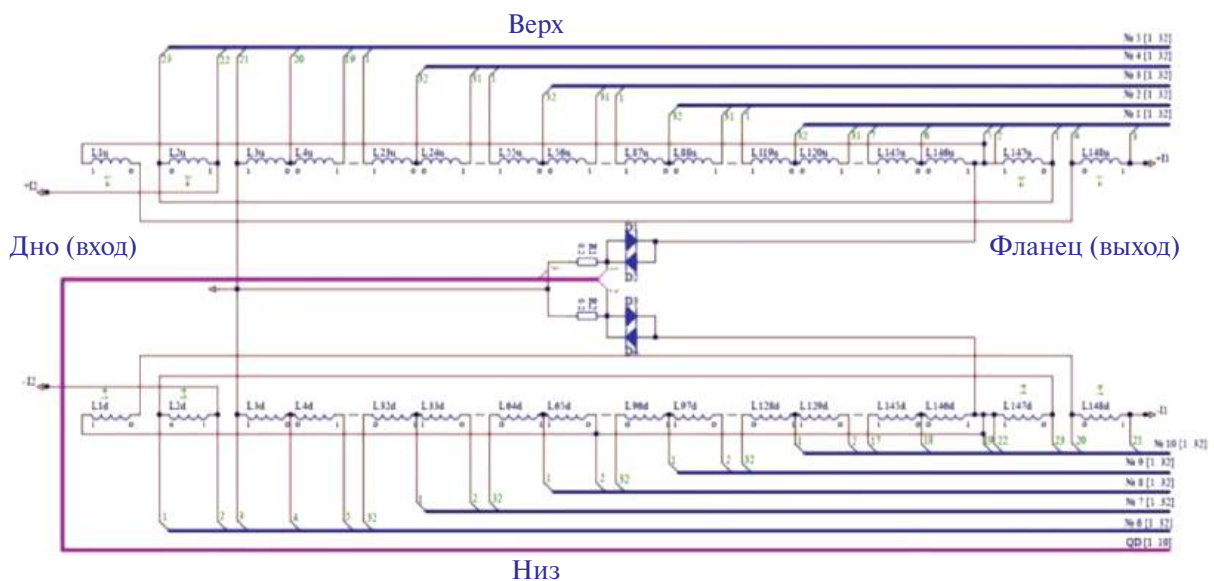


Рис. 3. Схема подключения обмоток и система защиты вигглера.

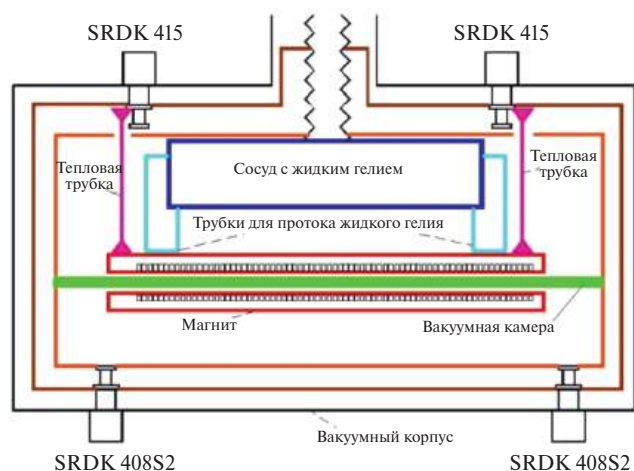


Рис. 4. Схема криостата с косвенным охлаждением [4].

ния внешнего теплового потока, сосуда с жидким гелием, теплопроводов, специальных токоподводов и четырех криоохладителей, два из которых – SUMITOMO SRDK-415D и два – SUMITOMO SRDK-408S2.

Внешний корпус криостата был изготовлен из нержавеющей стали в форме цилиндра диаметром 70 см. С каждого конца на цилиндр были установлены торцевые фланцы. Все стыки были уплотнены с помощью специальных резиновых прокладок.

Сосуд с жидким гелием был изготовлен в форме цилиндра с объемом около 40 л и толщиной стенок 3 мм. Гелиевый бак был установлен на корпусе вигглера и соединен с двумя продольными отверстиями круглой формы, просверленными как в верхней, так и в нижней половине корпуса магнитной системы вигглера.

Магнит был окружен двумя медными экранами с температурами 20 и 60 К, которые охлаждались соответствующими ступенями криокулеров. Для дополнительной задержки потоков теплового излучения извне медные экраны были покрыты несколькими слоями криогенной суперизоляции.

Магнитная система вместе с гелиевым сосудом были подвешены с помощью кевларовых ремней, закрепленных на корпусе криостата. Внутри корпуса поддерживался вакуум на уровне порядка 10^{-6} – 10^{-8} мбар для снижения теплового потока, передающегося через молекулы остаточного газа.

Для охлаждения всех элементов криостата была использована система медных теплопроводов, которые перехватывают потоки тепла и отводят его на головки четырёх криокулеров: двух SRDK-415D с температурами 4 и 60 К и двух SRDK-408S2 с температурами 20 и 60 К [5].

4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИГГЛЕРА НА ПАРАМЕТРЫ И ДИНАМИКУ ПУЧКА

В данной работе были проведены аналитические оценки влияния сверхпроводящего вигглера на пучок. Расчеты фокусирующих свойств магнитного поля были сделаны в приближении бесконечных плоскопараллельных по горизонтали полюсов. Данное приближение оправдано высокой однородностью поля данного вигглера:

$$\Delta v = \frac{KL\beta}{4\pi} \left(1 + \frac{L^2}{12\beta^2} \right), \quad \frac{\Delta\beta}{\beta} = -\frac{KL\beta}{2\sin\mu} \left(1 - \frac{L^2}{12\beta^2} \right). \quad (1)$$

Параметры оптических функций базовой структуры с прямолинейным промежутком, которые были использованы при расчетах, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры оптических функций

Параметр, м	Значение
β_x в центре промежутка	15.4
β_y в центре промежутка	2.4
Дисперсия в пустом промежутке	0

Используя формулы (1) в соответствии с данным приближением, мы рассчитали сдвиг бетатронных частот и величину бетатронных биений. При рабочем поле 2.7 Тл

$$\Delta v_y \approx 24 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{\Delta\beta_y}{\beta_y} \approx 63 \cdot 10^{-3}.$$

Для оценки влияния вигглера на радиационные свойства электронного пучка был использован формализм структурных интегралов [6]. Результаты расчетов изменения интегралов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры сверхпроводящих полюсов

Параметр	Параметр структуры без вигглера	Параметр структуры после включения вигглера
Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-3}$	$0.97 \cdot 10^{-3}$
Эмиттанс, пм	73.2	66.76
Потери за оборот, кэВ	536	619
Коэффициент уплотнения орбит	$7.64 \cdot 10^{-5}$	$7.6397 \cdot 10^{-5}$
Радиационные числа, x/s	1.94/1.06	1.81/1.19
Время затухания, t_x/t_s	9.2/16.7	8.5/12.9

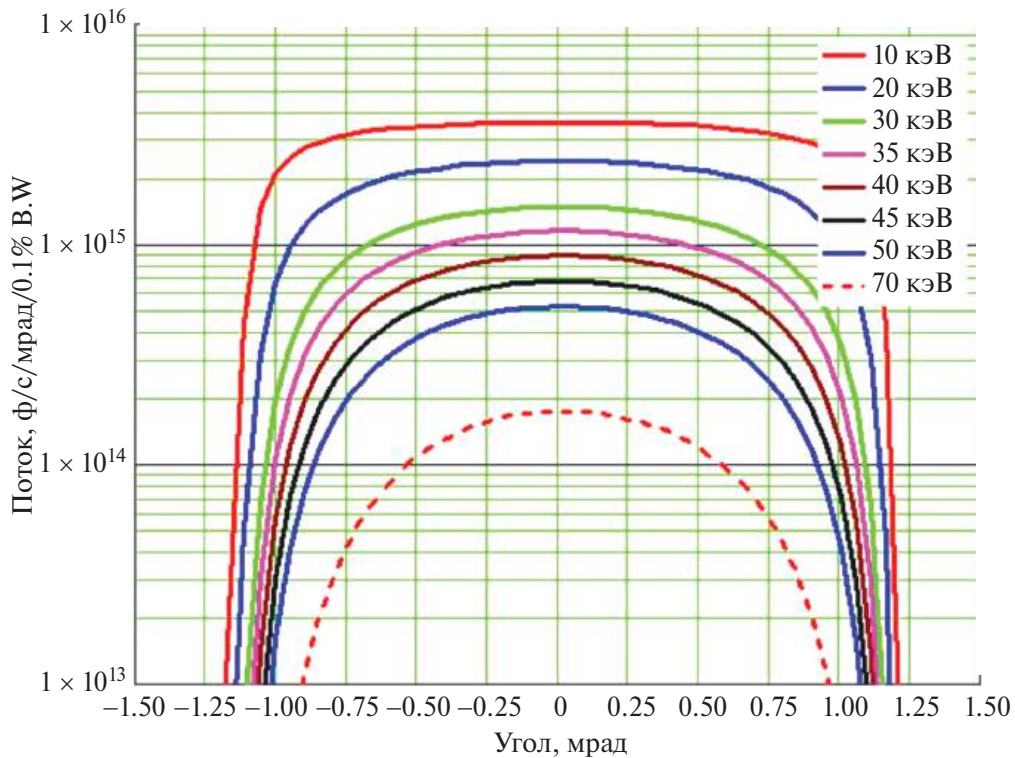


Рис. 5. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из вигглера.

Из полученных результатов следует, что вигглер оказывает заметное влияние на оптику пучка электронов. Для компенсации рассмотренных выше явлений необходима корректирующая магнитная структура, поэтому на концах прямолинейного промежутка будут установлены квадрупольные линзы с независимыми источниками питания [7].

5. СВОЙСТВА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ВСТАВНОГО УСТРОЙСТВА

Расчеты параметров излучения были проведены с помощью программ Mathcad и SPECTRA [8]. Из расчетов было установлено, что суммарная мощность синхротронного излучения составляет примерно 29.8 кВт, а критическая энергия излучения 16.2 кэВ. Результат расчета углового спектрального распределения потока фотонов от вигглера показан на рис. 5. Спектр вигглера для станции станции 1–3 СКИФ в сравнении со станцией 8 ВЭПП-4 представлен на рис. 6. Все расчеты проводились для рабочего поля $B = 2.7$ Тл, энергии электронного пучка $E = 3$ ГэВ и тока пучка $I = 400$ А.

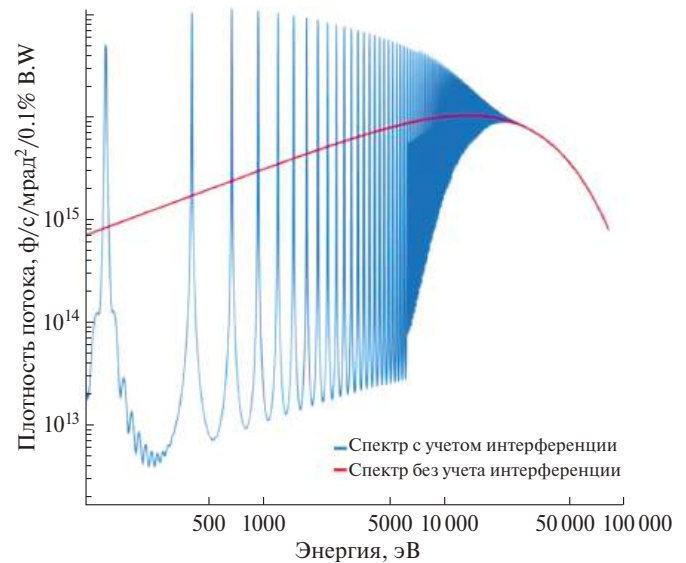


Рис. 6. Спектральная плотность потока на оси.

6. ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ВИГГЛЕРА И ПОЛНОРАЗМЕРНОГО МАГНИТА

Оба испытания были проведены в погружном криостате при гелиевых температурах с помощью поперечной линейки из 5 датчиков Холла. В первом испытании проводились измерения короткого прототипа, который был изготовлен

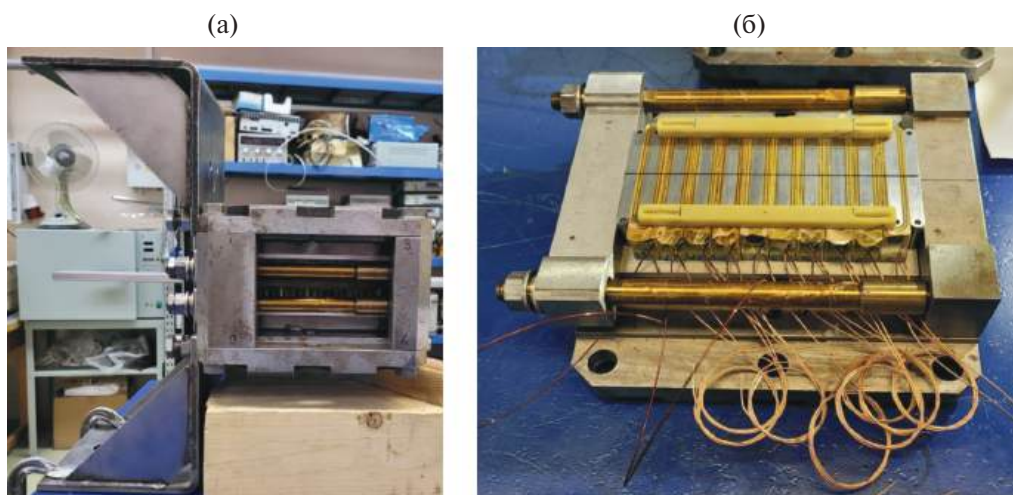


Рис. 7. Внешний вид прототипа: а – собранный прототип вигглера, б – нижняя половина с пластиковыми про-ставками.

для проверки правильности расчетов. Данный прототип был собран из железного корпуса и 20 основных сверхпроводящих полюсов. Фиксация витков обмотки от перемещений под действием сил магнитного поля осуществлялась при помощи специальной бандажирующей системы, которая включает в себя железные плиты и шпильки из бериллиевой бронзы. Для дистанцирования верхних и нижних полюсов при включении поля между двумя половинами были установлены вставки из немагнитного материала. Внешний вид прототипа в процессе сборки представлен на рис. 7.

В процессе тренировок полюсов было 22 перехода сверхпроводящего провода в нормальное состояние, а максимальное магнитное поле, которого удалось достичь, 3.24 Тл. Процесс тренировок прототипа представлен на рис. 8.

Успешное испытание прототипа позволило принять решение об изготовлении полного вигглера, состоящего из 144 основных полюсов и 4 дополнительных. Испытания сверхпроводящего вигглера проводились двое суток. На рис. 9 при-

ведена история тренировки сверхпроводящих катушек. Максимальное поле при испытаниях составило 2.7 Тл.

Подбор токов для приравнивания к нулю первого и второго интегралов поля проводился для поля 2.64 Тл при суммарном токе 760 А. Варьируя величины токов питания, мы получили минимальное значение первого интеграла поля

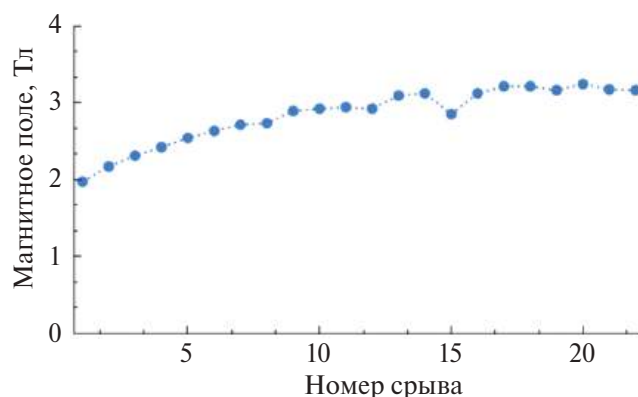


Рис. 8. История тренировки прототипа.

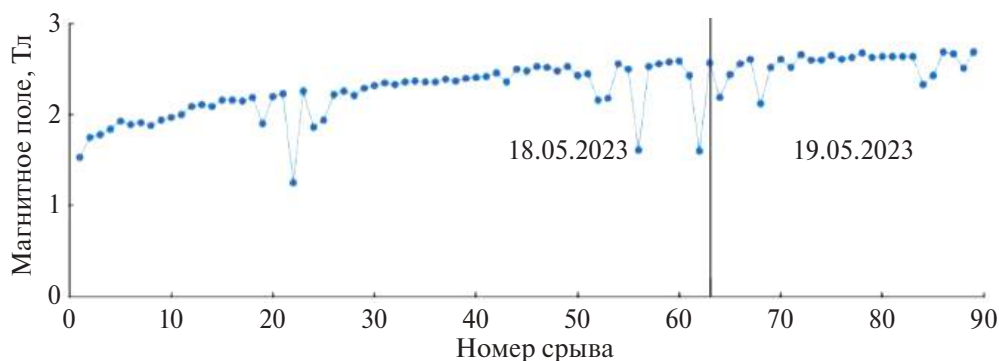


Рис. 9. История тренировки сверхпроводящего вигглера.

$I_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ Тл·м, которое удовлетворяет заданным требованиям.

В дальнейшем планируются второе испытание вигглера в погружном криостате для полной тренировки полюсов, а также сборка и испытание прототипа в собственном криостате для определения токов коррекции в краевых полюсах при подъеме поля.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был собран и успешно испытан 144-полюсный сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и уровнем магнитного поля 2.7 Тл для станции 1–3 “Быстропротекающие процессы”. Результаты измерений достаточно хорошо совпадают с модельным распределением поля вигглера.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке этого министерства в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левичев Е.Б., Журавлев А.Н., Золотарев К.В., Зубавичус Я.В., Шефер К.И.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов СКИФ. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 1. С. 4.
2. *Рубцов И.А., Прууэл Э.Р., Тен К.А. и др.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов СКИФ. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 1. С. 116.
3. *Волков А.А., Брагин А.В., Ерохин А.И. и др.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов СКИФ. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 3. С. 6.
4. *Хрущев С.В., Цуканов В.М., Шкаруба В.А., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н.* // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 5. С. 656.
5. *Tsukanov V.M., Khrushchev S.V., Mezentsev N.A., Safronov A.N., Shkaruba V.A.* // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. P. 020018.
<http://doi.org/10.1063/5.0030402>
6. *Helm R.H., Lee M.J., Morton P.L., Sands M.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. № 3. P. 900.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1973.4327284>
7. *Акимов А.В., Актершев Ю.С., Анашин В.В. и др.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов СКИФ. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 2. С. 98.
8. *Tanaka T., Kitamura H.* // J. Synchrotron Radiat. 2001. V. 8. № 6. P. 1221.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.039.83

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЙ СТЕНД НА ВЫВЕДЕННОМ ПУЧКЕ ЯДЕР
УГЛЕРОДА ИЗ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА У-70¹

© 2025 г. Ю. М. Антипов^а, А. Г. Васильева^{а, *}, Д. А. Васильев^а, В. А. Калинин^а,
А. В. Кошелев^а, С. В. Маконин^а, А. В. Максимов^а, Е. В. Парменова^а, В. А. Пикалов^а,
М. К. Полковников^а, А. П. Солдатов^а, Е. В. Корякина^б, С. Н. Корякин^б, В. О. Сабуров^б,
А. Н. Соловьёв^б, М. В. Трошина^б, А. А. Перевезенцев^с, А. С. Штемберг^с, Н. П. Сирота^д,
Е. Н. Смирнова^д, О. М. Розанова^д, Т. А. Белякова^е

^а Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

^б Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии”
Россия, 249036, Обнинск Калужской обл., ул. Королёва, 4

^с Институт медико-биологических проблем Российской академии наук
Россия, 123007, Москва, Хорошевское шоссе, 76А

^д Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук
Россия, 142290, Пущино Московской обл., ул. Институтская, 3

^е Физико-технический центр Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 142280, Протвино Московской обл., ул. Мира, 1Н

* e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.

После доработки 12.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлена информация о текущем состоянии установки радиобиологический стенд (РБС) на выведенном пучке ионов углерода из ускорительного комплекса У-70. Освоен медленный вывод (до 900 мс) пучка ядер углерода из ускорителя У-70 на установку РБС с энергиями 200–450 МэВ/нуклон для радиобиологических и доклинических исследований, направленных на разработку отечественных методик лечения онкологических заболеваний ускоренными ионами углерода. Кратко описаны средства транспортировки пучка в зону РБС, а также средства пассивной и активной модификации пучка. Приведены характеристики пучка, итоги последней модернизации РБС. Представлены результаты радиобиологических исследований, полученных с помощью установки РБС.

DOI: 10.7868/S3034564225080233

1. ВВЕДЕНИЕ

Для проведения радиобиологических и доклинических исследований, направленных на разработку отечественных методик лечения онкологических заболеваний ускоренными ионами углерода, в ИФВЭ была создана экспериментальная установка радиобиологический стенд (РБС). Она работает с 2013 года на выведе-

нном из ускорителя У-70 пучке ионов углерода. В 2017 году установка была оформлена как Центр коллективного пользования, и на данный момент РБС функционирует в каждом сеансе работы ускорителя У-70 на выведенном пучке ионов углерода [1].

Ускоренные ионы углерода с энергиями 200–450 МэВ/нуклон выводятся из ускорителя У-70 в экспериментальный зал методом медленного

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

вывода. Медленный вывод углеродного пучка из ускорителя в медицинский канал осуществляется по схеме, предложенной Пиччони и Райтом в 1954–1955 годах [2–4]. В настоящее время реализован вывод шести фиксированных значений энергии пучка углерода: 450, 400, 350, 300, 250 и 200 МэВ/нуклон. Энергия пучка ионов углерода, его интенсивность и другие параметры соответствуют необходимым требованиям для медицинского применения. Технические характеристики пучка ионов углерода приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики пучка ионов углерода

Параметр	Значение
Тип ионов	$^{12}\text{C}^{6+}$
Способ получения ионов	Медленный вывод из ускорителя У-70
Диапазон выводимых энергий ионов углерода, МэВ/нуклон	От 200 до 450 (6 ступеней)
Диапазон пробегов ионов в воде, мм	От 5 до 300
Количество частиц в одном цикле вывода	До 3.0×10^9
Погрешность накопленной дозы в мишени, %	Не более 5

Средства транспортировки пучка в зону РБС, а также некоторые средства пассивной и активной модификации пучка, в том числе изготовленная электромагнитная система формирования равномерного дозового поля на объекте или система сканирования, были представлены ранее [4]. Зона установки РБС имеет биологическую защиту и состоит из двух зон с единой системой контроля доступа: радиобиологической и медицинской. Эти зоны отделены друг от друга бетонной стеной с промежуточным сменным металлическим коллиматором для регулировки размеров пучка. В медицинской зоне установлен 6-координатный стол с системой автоматизированного управления, а также лазерный центратор. В радиобиологической зоне располагается водный фантом с 3D-системой перемещения. Фантом и система управления им полностью разработаны и изготовлены в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ. Основные характеристики водного фантома приведены в табл. 2.

Внешний вид водного фантома показан на рис. 1.

Таблица 2. Основные характеристики водного фантома изготовления НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ

Параметр	Значение
Внешние размеры, мм ³	590 × 360 × 375
Материал стенок	Поликарбонат
Толщина передней и задней стенок (относительно направления пучка), мм	30
Толщина боковых стенок, мм	15
Внешние размеры кессона, мм ³	130 × 240 × 265
Толщина передней стенки кессона, мм	5
Материал передней стенки кессона	Полиметилметакрилат (ПММА)
Толщина задней и боковых стенок кессона, мм	15
Материал задней и боковых стенок кессона	Поликарбонат



Рис. 1. Внешний вид водного фантома с 3D-системой перемещения.

Для дозиметрического сопровождения радиобиологических исследований на установке РБС используются термолюминесцентные дозиметры (ТЛД) (типа ДТГ-4, Ангарский филиал ООО “УралПрибор”, Россия и МТТ-7, RADCARD, Польша), клинический дозиметр PTW UNIDOS webline с комплектом ионизационных камер (PTW Freiburg, Германия) и клинический дозиметр ДКС АТ5350 (АТОМТЕХ, Белоруссия),

сертифицированные в России в качестве средств измерения (номера по госреестру 37971-08 и 26433-09 соответственно). Для оценки равномерности поля облучения в месте эксперимента используются радиохромные дозиметрические пленки Gafchromic EBT3 (Ashland, США).

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ РБС

С 2021 года была проведена значительная модернизация установки РБС.

Модифицирована система медленного вывода пучка ядер углерода из ускорителя У-70 на установку РБС. Теперь облучение может проводиться импульсами длительностью до 900 мс по сравнению с режимом медленного вывода длительностью 600 мс, реализованным ранее [3].

Модифицирована электромагнитная система формирования равномерного дозового поля (вобблер-система). Изменены источники питания магнитов: увеличена частота преобразования, за счет чего увеличена скорость изменения тока в обмотках до 75 А/мс. Ведется работа над улучшением стабильности.

Разработан и изготовлен контроллер быстрой остановки вывода пучка по окончанию набора дозы в объекте: теперь остановить вывод можно в любой момент цикла вывода, ранее набор дозы происходил с точностью до цикла вывода.

Для точной подстройки энергии пучка до необходимой величины в работу на постоянной основе внедрен пластинчатый дегрейдер, состоящий из шести автоматически вводимых в пучок пластин из полиметилметакрилата (ПММА) разной толщины: 1, 2, 4, 8, 16 и 32 мм. Во время сеанса работы ускорителя в апреле 2023 года впервые было отработано облучение одной дозой заданного объема в воде, согласно разработанному медицинскими физиками плану облучения.

Физический принцип углеродной терапии основан на специфических свойствах тяжелых заряженных частиц (т.е. ядер углерода) образовывать пик Брэгга. Пик Брэгга – это ярко выраженный пик на кривой Брэгга, которая отображает потерю энергии ионизирующего излучения во время его прохождения через вещество.

На рис. 2 показаны обычный (а) и модифицированный (б) пики Брэгга при энергии 400 МэВ/нуклон, полученные в весеннем сеансе 2022 года. Для модификации пика Брэгга по глубине используются специально разработанные

совместными усилиями сотрудников ИФВЭ и МРНЦ им. А.Ф. Цыба гребенчатые фильтры [5]. Ранее реализованный алюминиевый гребенчатый фильтр с высотой гребня 16 мм для энергии 400 МэВ/нуклон представлен в работе [2]. В дополнение к нему на 3D-принтере из промышленного фотополимера Industrial Blend (FunToDo, Нидерланды) сотрудниками МРНЦ им. А.Ф. Цыба были изготовлены два дополнительных гребенчатых фильтра с толщиной гребня 5 мм различной конфигурации для энергий 400 МэВ/нуклон и 200 МэВ/нуклон. Успешное использование данных фильтров в ходе последнего сеанса на практике подтвердило возможность применения средств трехмерной печати для пассивной модификации кривой Брэгга в пучках ионов углерода.

Для исследований на установке РБС ведется разработка оригинальной методики калибровки ионизационных камер и датчиков обратной

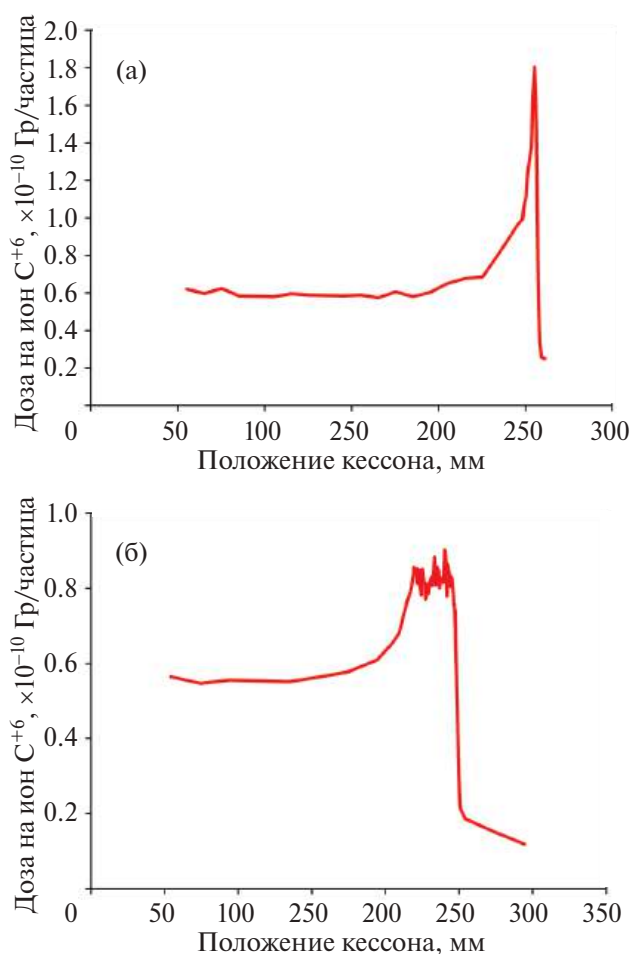


Рис. 2. Пик Брэгга на энергии 400 МэВ/нуклон: без фильтра (а), с алюминиевым гребенчатым фильтром с высотой гребня 16 мм (б).

связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами. Для этого конструируется прототип уникальной экспериментальной радиометрической установки. На работающем прототипе данной радиометрической установки уже в течение нескольких сеансов проводится регулярная калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры, разработанной и изготовленной ИФВЭ, на энергии 400 МэВ/нуклон. Создание подобной методики и установки для абсолютной калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи в перспективе позволит уменьшить неопределенность в измерении величины поглощенной объемом облучаемой опухоли дозы до не более 5%, что необходимо для медицинского применения.

В настоящее время сотрудниками НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ разрабатывается физический модуль системы планирования ионной лучевой терапии. Специалисты МРНЦ им. А.Ф. Цыба работают над биологическим модулем данной системы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совместно со специалистами МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск) в медицинской зоне РБС проводятся доклинические исследования. Коллективно со специалистами ИТЭБ РАН (Пушино), ГНЦ РФ – ИМБП РАН (Москва), а также другими институтами ведутся радиобиологические исследования в радиобиологической зоне. Предварительные результаты подобных исследований были представлены в работах [1, 4, 6, 7].

3.1. МРНЦ им. А.Ф. Цыба

В рамках физико-дозиметрических исследований проводилась верификация модифицированной микродозиметрической модели *in vitro* (МКМ, Microdosimetric Kinetic Model). Для этого был сконструирован и изготовлен гребенчатый фильтр, позволяющий создать равномерную с учетом относительной биологической эффективности (ОБЭ) дозу в расширенном пике Брэгга. Микроцентрифужные пробирки типа Эппендорф ($V = 2$ мл) с суспензией опухолевых (фибросаркома) клеток китайского хомячка В14-150 были установлены на разной глубине области, соответствующей расширенному пику Брэгга, и облучены пучком ионов углерода дозой 2 Гр. В результате различия между значениями выживаемости

клеток, полученными экспериментально и спрогнозированными с помощью используемой модели, находились в пределах 3σ [8], что может быть вызвано неопределенностями физического моделирования. Однако в целом результаты авторами признаны положительными, и работа в данном направлении продолжается.

Радиобиологические исследования были проведены как в моноэнергетическом пучке ионов углерода (450 МэВ/нуклон), так и в модифицированном. Для моноэнергетического пучка были получены зависимости доза–эффект в “простреле” (проксимальная область кривой Брэгга) и в пике Брэгга на трех линиях клеток китайского хомячка: нормальных [СНО-К1 (яичник) и V-79 (легкое)] и опухолевых (В14-150). При уровне выживаемости клеток 10% коэффициенты ОБЭ составили 1.3–1.4 в проксимальной области и 4.1–4.2 – в пике Брэгга [9]. В центре модифицированного (расширенного до 30 мм) пика Брэгга (400 МэВ/нуклон) коэффициент ОБЭ для клеток В14-150 оказался существенно ниже: 1.7 [10].

Еще одним направлением являлось исследование эффектов комбинированного воздействия ионами углерода и протонами. Эксперимент проводился также на клетках линии В14-150, которые подвергались облучению в области, соответствующей расширенному пику Брэгга, протонного пучка и пучка ионов углерода в разной последовательности, с различным соотношением доз и временным интервалом. Результаты показали увеличение эффекта при сокращении временного интервала между фракциями, повышении вклада ионов углерода в суммарную дозу и воздействии ионами углерода первой фракцией [10].

3.2. ИТЭБ РАН

Сотрудниками ИТЭБ РАН по тесту 30-суточной выживаемости определены коэффициенты относительной биологической эффективности (ОБЭ) пучка ионов углерода с энергией 450 МэВ/нуклон при облучении мышей пучком ионов углерода дозой 6.5 Гр для разных областей кривой Брэгга. Величина ОБЭ ионов углерода при облучении областей до пика Брэгга составила 0.8, в пике Брэгга шириной 10 и 30 мм – 1.5, после пика Брэгга – 0.7 [11]. При отработке условий облучения и позиционирования животных на РБС было выявлено, что применение ксилазин-золетиловой анестезии сни-

жает гибель животных после воздействия ионов углерода, а величина модификации дозы значительно зависит от линейной передачи энергии излучения [12].

При исследовании действия наночерия ($n\text{CeO}_2$) при тотальном облучении мышей ионами углерода в средних и летальных дозах с помощью цитогенетического метода и теста 30-дневной выживаемости были обнаружены радиопротекторные и радиомитигаторные свойства $n\text{CeO}_2$. Величина эффектов зависела от доз облучения, времени и способов введения вещества [13].

3.3. ГНЦ РФ – ИМБП РАН

Отделом космической радиобиологии ГНЦ РФ – ИМБП РАН проведено моделирование факторов дальнего космического полета: микрогравитации и галактических космических лучей. В качестве модели последних использован пучок ^{12}C с дозой 0.8 Гр. Благодаря проведенным исследованиям на приматах установлено, что характер нарушения когнитивных функций главным образом зависит от типологических характеристик нервной системы. В частности, животные сангвинического типа наиболее устойчивы к воздействию тяжелых ионов [14]. Исследования на грызунах позволили изучить механизм таких нарушений, опирающийся на сдвиги в метаболизме дофамина [15]. Результаты этих работ имеют ключевое значение при планировании межпланетных полетов.

4. ПЛАНЫ

В настоящее время в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ в г. Протвино ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического центра ионной лучевой терапии (ЭКЦ ИЛТ) на базе действующего ускорительного комплекса У-70. В рамках этого проекта в экспериментальном зале 1БВ будут построены три лучевых кабины для терапии ускоренными ионами углерода онкологических заболеваний.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке РБС было проведено и продолжает проводиться большое количество доклинических и радиобиологических исследований. Разрабатывается методика использования ионов углерода в медицинских целях в ЭКЦ ИЛТ.

Модернизация установки РБС дает возможность создавать и отлаживать новое оборудование для управления и диагностики ускоренного пучка ионов углерода с целью улучшения качества и точности облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pikalov V.A., Antipov Y.M., Zaichkina S.I., Sorokina S.S., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Romanchenko S.P., Dyukina O.R., Beketov E.E., Isaeva E.V., Troshina M.V., Lychagin A.A., Solovev A.N., Koryakin S.N., Ulyanenko S.E.* // Proc. RuPAC'18. Protvino: JACoW Publishing. 2018. P. 253. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50>
2. *Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P.* // Proc. RuPAC'21. Alushta: JACoW Publishing. 2021. P. 124. <https://doi.org/10.18429/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06>
3. *Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Калинин В.И., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Минченко А.В., Солдатов А.П., Хитев Г.В.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020117>
4. *Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Костин М.Ю., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Пикалов В.А., Солдатов А.П., Хитев Г.В., Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Исаева Е.В., Бекетов Е.Е., Трошина М.В.* // ПТЭ. 2015. № 4. С. 107. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040011>
5. *Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Трошина М.В., Лычагин А.А., Пикалов В.А., Харлов В.И., Ульяненко С.Е.* // Медицинская физика. 2016. № 4. С. 47.
6. *Бекетов Е.Е., Исаева Е.В., Трошина М.В., Лычагин А.А., Соловьев А.Н., Корякин С.Н., Ульяненко С.Е., Малахов Е.П., Ульяненко Л.Н., Костин М.Ю., Пикалов В.А., Антипов Ю.М., Солдатов А.П.* // Радиационная биология. Радиозеология. 2017. № 5. С. 462. <https://doi.org/10.7868/S0869803117050022>
7. *Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Корякин С.Н., Солдатов А.П., Антипов Ю.М., Костылев Д.В.* // Медицинская физика. 2016. № 1. С. 29.
8. *Solovev A., Troshina M., Saburov V., Chernukha A., Moiseev A., Koryakina E., Potetnya V., Koryakin S., Pikalov V., Soldatov A., Kaprin A.* // Biomedical Physics and Engineering Express. 2022. V. 8. P. 035030. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac414f>
9. *Корякина Е.В., Потетня В.И., Трошина М.В., Ефимова М.Н., Байкузина Р.М., Корякин С.Н., Лыча-*

- гин А.А., Пикалов В.А., Ульяненко С.Е. // Радиация и риск. 2019. № 3. С. 96.
<https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-3-96-106>
10. Трошина М.В., Корякина Е.В., Потетня В.И., Соловьев А.Н., Сабуров В.О., Лычагин А.А., Иванов С.А., Каприн А.Д., Корякин С.Н. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2023. № 7. С. 49.
<https://doi.org/10.47056/0365-9615-2023-176-7-49-52>
11. Заичкина С.И., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Дюкина А.Р., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С., Сорокина С.С., Пикалов В.А. // Биофизика. 2019. № 6. С. 1208.
<https://doi.org/10.1134/S0006302919060206>
12. Балакин В.Е., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С. // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни. 2022. № 1. С. 343.
<https://doi.org/10.31857/S2686738922050043>
13. Балакин В.Е., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С., Смирнов А.В., Васильева А.Г. // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни. 2022. № 1. С. 504.
<https://doi.org/10.31857/S2686738922060038>
14. Belyaeva A.G., Kudrin V.S., Nosovsky A.N., Perevezentsev A.A., Shtemberg A.S., Koshlan I.V., Koshlan N.A., Isakova M.D., Bogdanova Y.V., Timoshenko G.N., Krasavin E.A., Blokhina T.M., Yashkina E.I., Osipov A.N. // Life Sciences in Space Research. 2021. V. 30. P. 45.
<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.05.004>
15. Перевезенцев А.А., Лебедева-Георгиевская К.Б., Кузнецова О.С., Кудрин В.С., Пикалов В.А., Штемберг А.С. // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2023. № 3. С. 348.
<https://doi.org/10.31857/S086981392303007X>

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.65

УСКОРИТЕЛЬ-ТАНДЕМ С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ VITA
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ¹

© 2025 г. М. И. Бикчурин^{a, b}, Т. А. Быков^a, Г. Д. Верховод^a, И. С. Ибрагим^{a, b, c},
А. И. Касатова^a, Д. А. Касатов^a, Я. А. Колесников^a, В. Д. Коновалова^{a, b},
А. М. Кошкарев^{a, b}, А. С. Кузнецов^{a, b}, Г. М. Остреинов^a, В. В. Поросев^a, С. С. Савинов^a,
Н. Ш. Сингатулина^{a, d}, Е. О. Соколова^a, И. Н. Сорокин^a, Т. В. Сычева^{a, b},
Ю. С. Таскаева^a, А. А. Шуклина^{a, b}, И. М. Щудло^a, С. Ю. Таскаев^{a, b, *}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

^c Университет Тартуса
Сирийская Арабская Республика, Тартус, VWG5+X3G, M1

^d Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

* e-mail: taskaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 22.03.2024 г.

Одним из ускорителей заряженных частиц с относительно малой энергией и относительно большим током является ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. В работе отмечена оригинальность конструкции ускорителя и представлены результаты проведенных исследований. Показано, что замена керамических изоляторов с гладкой боковой поверхностью на изоляторы с гофрированной наружной поверхностью обеспечила получение требуемого напряжения 1.15 МВ без пробоев. Требуемый ток 10 мА получен за счет модернизации установки, последовавшей после экспериментального определения влияния пространственного заряда на транспортировку ионов, и существенного подавления потока вторичных заряженных частиц. Приведены измеренные фазовые портреты инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода и пучка протонов. Отмечено, что установка преимущественно используется для развития методики бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей, а также для радиационных испытаний и модификации перспективных материалов потоком нейтронов, для измерения сечения и выхода ядерных реакций и для других приложений.

DOI: 10.7868/S3034564225080245

1. ВВЕДЕНИЕ

Для внедрения в клиническую практику перспективной методики лечения злокачественных опухолей – бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1] – требуются ускорительные источники эпитепловых нейтронов. Одним из таких источников рассматривается ускорительный

источник нейтронов VITA [2], состоящий из ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией для получения пучка протонов или дейтронов, тонкой литиевой мишени для генерации нейтронов и системы формирования терапевтического пучка нейтронов. По мере совершенствования установки ее стали активно использовать и для ряда других приложений из-за возможности

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

получения стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией до 2.3 МэВ, током до 10 мА, генерации потока нейтронов в реакциях ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}(d, n)$, α -частиц в реакциях ${}^7\text{Li}(p, \alpha)\alpha$ и ${}^{11}\text{B}(p, \alpha)\alpha$, фотонов с энергией 478 кэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ и позитронов в реакции ${}^{19}\text{F}(p, e^+e^-){}^{16}\text{O}$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Ускорительный источник нейтронов ВИТА – современная физическая установка, включающая в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией, для получения стационарного пучка протонов или дейтронов, оригинальную тонкую литиевую мишень для генерации нейтронов и ряд систем формирования пучка нейтронов с замедлителем из фторида магния, оргстекла или тяжелой воды. Установка постоянно модернизировалась по мере получения знаний и к настоящему времени выглядит так, как показано на рис. 1.

Установка в основном размещена в одном радиационно-защищенном бункере, в соседнем бункере размещают литиевую мишень с системой формирования пучка нейтронов, пригодной для терапии пациентов, либо нейтронный или гамма-спектрометр для проведения научных исследований. Установка оснащена современными средствами вакуумной откачки, питания, диагностики, управления, сбора и хранения данных.

Установка обеспечивает:

- получение мощного стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией, изменяемой в диапазоне от 0.3 до 2.3 МэВ, с током от 0.5 до 10 мА. Пучок ионов отличается высокой монохроматичностью и стабильностью энергии (0.1 %) и высокой стабильностью тока (до 0.4 %). На выходе из ускорителя пучок ионов имеет диаметр 10 ± 1 мм, угловую расходимость ± 1.5 мрад, нормализованный геометрический эмиттанс $\epsilon_{\text{норм}} = 0.2$ мм · мрад;
- генерацию мощного потока нейтронов (до $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$) и формирование пучка нейтронов различного энергетического диапазона: холодных, тепловых, эпитепловых, исключительно

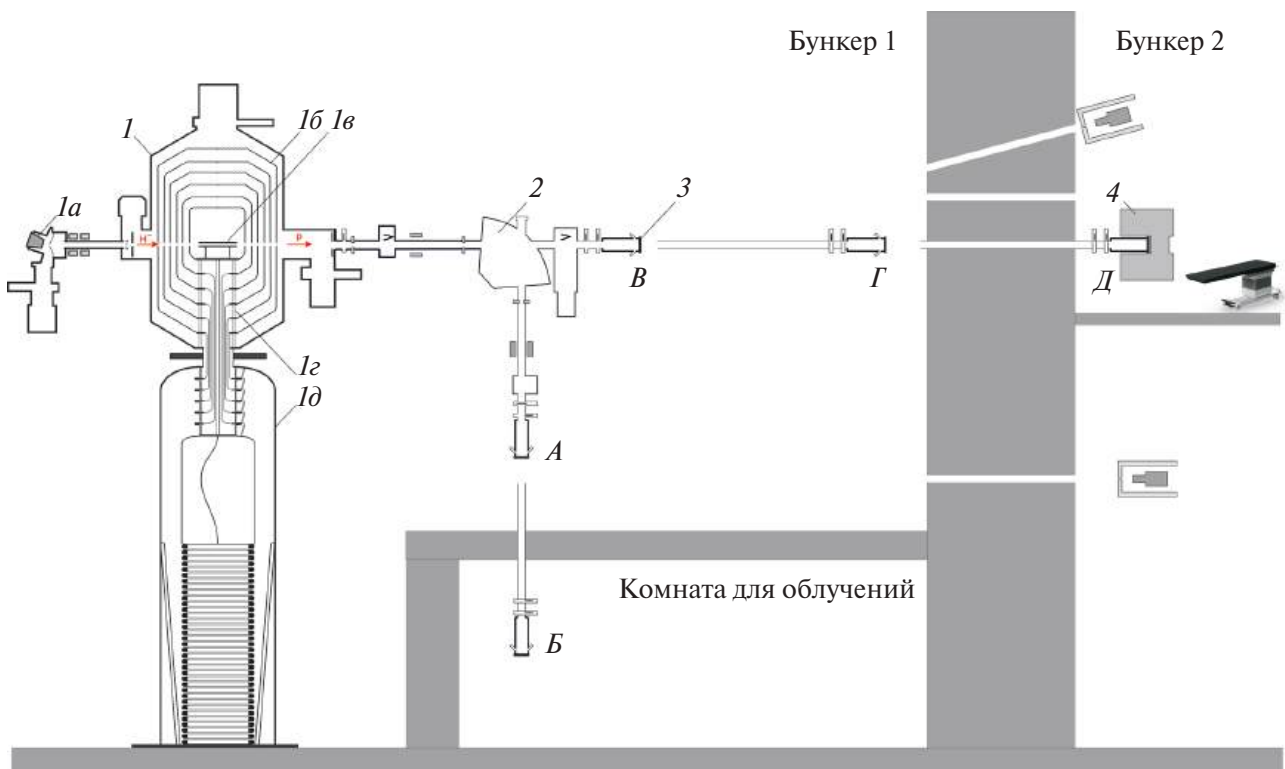


Рис. 1. Схема ускорительного источника нейтронов ВИТА: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией (а – источник отрицательных ионов, б – высоковольтный и промежуточные электроды, в – газовая обдирочная мишень, г – проходной изолятор, д – высоковольтный источник питания), 2 – поворотный магнит, 3 – литиевая мишень для генерации нейтронов, 4 – система формирования пучка нейтронов. Литиевую мишень размещают в положениях А, Б, В, Г или Д.

эпитепловых, моноэнергетичных, надэпитепловых или быстрых;

– генерацию моноэнергетических фотонов с энергией 478 кэВ, 511 кэВ или 9.17 МэВ;

– получение α -частиц и позитронов.

Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией – это линейный электростатический ускоритель заряженных частиц тандемного типа оригинальной конструкции. В характеристике ускорителя термин “линейный” означает, что пучок ионов однократно проходит ускоряющие промежутки. Термин “электростатический” означает, что ускорение заряженных частиц происходит неизменным электрическим полем. Термин “тандемный” означает, что высоковольтный потенциал используется дважды: сначала для ускорения отрицательных ионов, а затем после смены полярности их заряда в высоковольтном терминале – для ускорения положительных ионов.

Ключевым преимуществом концепции тандемного ускорения является снижение необходимого ускоряющего напряжения наполовину, что значительно упрощает электростатическую изоляцию и, следовательно, уменьшает размер и стоимость ускорителя. Оригинальность конструкции заключается в использовании не традиционных ускорительных трубок, а электродов в виде вложенных друг в друга соосных цилиндров, которые крепят на единственном проходном изоляторе, как показано на рис. 1. Основная идея состояла в том, чтобы отнести межэлектродные изоляторы подальше от пучка заряженных частиц для улучшения высоковольтной прочности и обеспечить высокий темп ускорения ионов в ускорительном зазоре за счет близкого размещения электродов для увеличения тока пучка ионов.

Ускоритель в ИЯФ СО РАН состоит из:

– вакуумного бака цилиндрической формы диаметром 1.4 м, высотой 2.3 м с отверстиями для ввода и вывода пучка ионов для вакуумной откачки и подключения к высоковольтному источнику питания;

– высоковольтного и пяти промежуточных электродов цилиндрической формы, в которые с двух сторон вварены рамки для крепления диафрагм и вставлены диафрагмы, формирующие ускорительный канал;

– проходного изолятора, предназначенного для подачи потенциала на высоковольтный и промежуточные электроды от высоковольтного источника питания;

– газовой обдирочной мишени;

– источника отрицательных ионов водорода или дейтерия;

– высоковольтного источника питания – секционированного выпрямителя промышленного ускорителя электронов серии ЭЛВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA – новый тип ускорителя заряженных частиц, достигнутые параметры получены в результате модернизации всех элементов ускорителя и проведения множества научных исследований, зачастую изменивших первоначальные представления.

Напряжение 1.15 МВ получено после изменений вакуумной части проходного изолятора: замены индиевого уплотнения на резиновое; исключения размещенного внутри резистивного делителя за счет увеличения в два раза высоты изоляторных колец; замены стеклянных изоляторов на керамические; замены керамических изоляторов с гладкой боковой поверхностью на изоляторы с гофрированной наружной поверхностью [3]. Установлено, что высоковольтная прочность ускорителя ограничена прочностью ускоряющего зазора, а не эффектом полного напряжения.

Ток пучка протонов 10 мА получен после проведения следующих исследований и изменений. При проектировании ускорителя предполагалось, что пространственный заряд не влияет на транспортировку пучка отрицательных ионов из-за большого напуска газа и влияет на транспортировку пучка протонов. В действительности все получилось противоположным образом.

Обнаруженное влияние пространственного заряда на транспортировку пучка отрицательных ионов водорода [4] потребовало разработки и внедрения в эксплуатацию ряда диагностических средств, обеспечивающих контролируемый ввод пучка ионов в ускоритель при изменении тока и энергии ионов. Это видеокamеры и телескоп, регистрирующие свечение пучка ионов при его взаимодействии с остаточным и обдирочным газом, проволочный сканер, измеритель эмиттанса.

Обнаруженное отсутствие влияния пространственного заряда на транспортировку пучка протонов [5] позволило заменить две пары квадрупольных линз на охлаждаемые диафрагмы

с равномерно разнесенными по азимуту термосопротивлениями, что обеспечило предотвращение прожигания вакуумной камеры пучком ионов и контроль его положения.

Значительный прогресс в увеличении тока пучка протонов достигнут в результате существенного подавления потока вторичных заряженных частиц за счет улучшения вакуумной откачки и размещения охлаждаемой диафрагмы на входе в ускоритель, а также частичного покрытия стенок вакуумной камеры металлической сеткой под отрицательным потенциалом [6].

Особая конструкция диафрагм высоковольтного электрода ускорителя кардинально подавляет нежелательный поток ионов аргона из газовой обдирочной мишени в ускорительные каналы [7].

Ионно-оптическая система ускорителя обеспечивает возможность реализации оперативного контроля эффективности газовой обдирочной мишени [8].

Замена водорода на дейтерий в источнике ионов обеспечивает получение пучка дейтронов [9].

Полученные знания и оснащение ускорителя большим набором диагностических средств позволяют в течение длительного времени стабильно получать пучок протонов или дейтронов в широком диапазоне энергий и тока. Характерный фазовый портрет инжектируемого в уско-

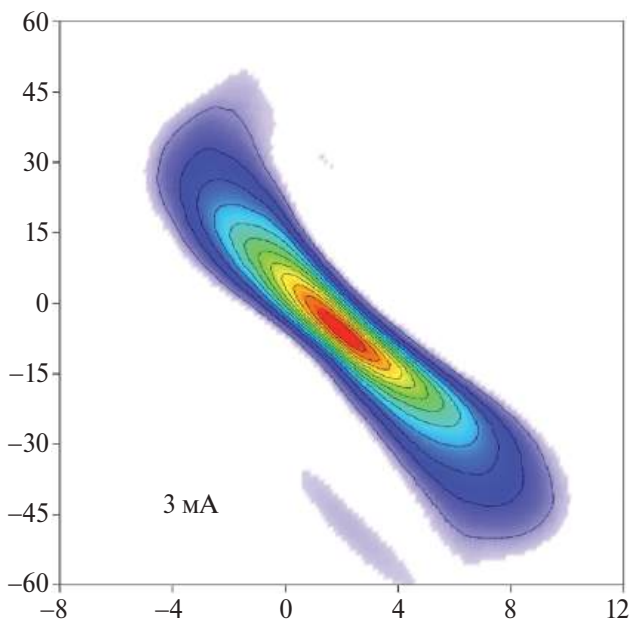


Рис. 2. Фазовый портрет инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода.

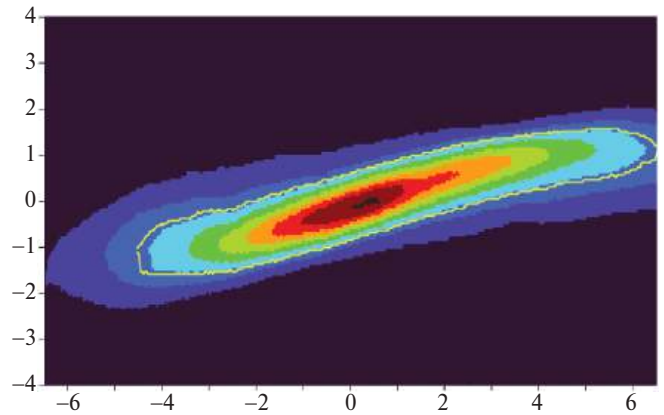


Рис. 3. Фазовый портрет пучка протонов.

ритель пучка отрицательных ионов водорода представлен на рис. 2, фазовый портрет пучка протонов – на рис. 3 [10].

4. ПРИМЕНЕНИЕ

Основное предназначение предлагаемого ускорителя – использование для бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. На установке в ИЯФ СО РАН получены следующие важные результаты: 1) облучение нейтронами опухолевых клеток, предварительно инкубированных в среде с бором, ведет к значительному подавлению их жизнеспособности, облучение мышей с привитой опухолью приводит к их излечению [11, 12]; 2) позитивный эффект достигнут при облучении крупных домашних животных со спонтанными опухолями [13, 14]; 3) разработаны средства и методы дозиметрии [15–18]; 4) протестированы новые препараты адресной доставки бора [19–25]; 5) измерены выход нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ [26], выход фотонов с энергией 478 кэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ [27], сечение реакций ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ [27] и ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ [28].

Разработанный ускорительный источник нейтронов ВИТА используется в клинике г. Сямынь (Китай) [29] для лечения онкологических больных (вторыми в мире) и изготавливается для Центра адронной терапии в области онкологии в Павии (Италия) и для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н.Н. Блохина в Москве.

На ускорителе в деталях изучен процесс образования блистеров на поверхности металлов при имплантации протонов [30]. Изучено влияние радиационного блистеринга на выход нейтронов из мишени, выполненной в виде тонкого слоя

лития, напыленного на эффективно охлаждаемую медную подложку [31].

Предложен и реализован неразрушающий метод измерения *in situ* толщины слоя лития путем измерения интенсивности излучения фотонов с энергией 478 кэВ в реакции ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^7\text{Li}$ [32].

Установка используется для радиационного тестирования образцов карбида бора и стали для Международного термоядерного реактора ИТЭР [33], оптических кабелей для Большого адронного коллайдера (ЦЕРН), неодимовых магнитов для мощного линака, газовых сенсоров на основе фталоцианинов титанила [34], полупроводниковых фотоумножителей, электронных компонент и устройств.

На установке ведутся работы по получению пучка холодных нейтронов для нейтронографии и БНЗТ; реализации метода мгновенной γ -спектроскопии для измерения борной дозы при проведении БНЗТ; реализации литий-нейтронозахватной терапии, обеспечивающей 100-процентное выделение энергии ядерной реакции в клетках опухоли [35]; модификации перспективных материалов; разработке метода стерилизации эндопротезов *in situ*; разработке мощного компактного источника быстрых нейтронов и для других приложений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе электростатический ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией VITA характеризуется широким диапазоном изменения энергии и тока пучка протонов или дейтронов, что позволяет его использовать для генерации потоков нейтронов, фотонов, α -частиц и позитронов, востребованных различными приложениями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. ISBN: 978-92-0-132723-9
2. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A.,*

- Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G.* // *Biology*. 2021. V. 10. № 5. P. 350. <https://doi.org/10.3390/biology10050350>
3. *Колесников Я.А., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю.* // *ПТЭ*. 2020. № 6. С. 17. <https://doi.org/10.31857/S0032816220060105>
4. *Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Сорокин И.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2018. № 5. С. 90. <https://doi.org/10.1134/S003281621805018X>
5. *Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. № 1. С. 105. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.01.50280.86-20>
6. *Касатов Д.А., Макаров А.Н., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. С. 74. <https://doi.org/10.1134/S1063785015020078>
7. *Колесников Я.А., Остреинов Ю.М., Пономарев П.Д., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2021. № 4. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040194>
8. *Колесников Я.А., Кошкарёв А.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2020. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040060>
9. *Касатов Д.А., Кошкарёв А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2020. № 5. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816220050158>
10. *Бикчурина М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А., М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Щудло И.М.* // *ПТЭ*. 2022. № 4. С. 18. <https://doi.org/10.31857/S0032816222040164>
11. *Sato E., Zaboronok A., Yamamoto T., Nakai K., Taskaev S., Volkova O., Mechetina L., Taranin A., Kanygin V., Isobe T., Mathis B., Matsumura A.* // *J. Rad. Research*. 2018. V. 59. P. 101. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx071>
12. *Zavjalov E., Zaboronok A., Kanygin V., Kasatova A., Kichigin A., Mukhamadiyarov R., Razumov I., Sycheva T., Mathis B., Maezono S., Matsumura A., Taskaev S.* // *Int. J. Rad. Biol.* 2020. V. 96. № 7. P. 868. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1761039>
13. *Kanygin V., Kichigin A., Zaboronok A., Kasatova A., Petrova E., Tsygankova A., Zavjalov E., Mathis B., Taskaev S.* // *Biology*. 2022. V. 11. P. 138. <https://doi.org/10.3390/biology11010138>
14. *Kanygin V., Zaboronok A., Kichigin A., Petrova E., Guselnikova T., Kozlov A., Lukichev D., Mathis B., Taskaev S.* // *Veterinary Sciences*. 2023. V. 10. P. 274. <https://doi.org/10.3390/vetsci10040274>
15. *Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A., Makarov A., Porosev V., Savinov G., Shchudlo I., Taskaev S., Verkhovod G.* // *JINST*. 2021. V. 16. P. 01024. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/P01024>

16. *Dymova M., Dmitrieva M., Kuligina E., Richter V., Savinov S., Shchudlo I., Sycheva T., Taskaeva I., Taskaev S.* // Radiat. Res. 2021. V. 196. P. 192.
<https://doi.org/10.1667/RADE-21-00015.1>
17. *Zaboronok A., Taskaev S., Volkova O., Mechetina L., Kasatova A., Sycheva T., Nakai K., Kasatov D., Makarov A., Kolesnikov Ia., Shchudlo I., Bykov T., Sokolova E., Koshkarev A., Kanygin V., Kichigin A., Mathis B., Ishikawa E., Matsumura A.* // Pharmaceutics. 2021. V. 13. P. 1490.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091490>
18. *Byambatseren E., Burdakov A., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Savinov S., Sycheva T., Taskaev S.* // JINST. 2023. V. 18. P. 02020.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02020>
19. *Успенский С.А., Хантаханова П.А., Заборонок А.А., Куркин Т.С., Волкова О.Ю., Мечетина Л.В., Таранин А.Н., Каныгин В.В., Мацумура А., Таскаев С.Ю.* // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 491. С. 1.
<https://doi.org/10.31857/S2686953520020119>
20. *Vorobyeva M., Dymova M., Novopashina D., Kuligina E., Timoshenko V., Kolesnikov Ia., Taskaev S., Richter V., Venyaminova A.* // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 7326.
<https://doi.org/10.3390/ijms22147326>
21. *Popova T., Dymova M., Koroleva L., Zakharova O., Lisitskiy V., Raskolupova V., Sycheva T., Taskaev S., Silnikov V., Godovikova T.* // Molecules. 2021. V. 26. P. 6537.
<https://doi.org/10.3390/molecules26216537>
22. *Kanygin V., Razumov I., Zaboronok A., Zavjalov E., Kichigin A., Solovieva O., Tsygankova A., Guselnikova T., Kasatov D., Sycheva T., Mathis B., Taskaev S.* // Biology. 2021. V. 10. P. 1124.
<https://doi.org/10.3390/biology10111124>
23. *Zaboronok A., Khaptakhanova P., Uspenskii S., Bekarevich R., Mechetina L., Volkova O., Mathis B., Kanygin V., Ishikawa E., Kasatova A., Kasatov D., Shchudlo I., Sycheva T., Taskaev S., Matsumura A.* // Pharmaceutics. 2022. V. 14. P. 761.
<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14040761>
24. *Aiyzyzhy K., Barmina E., Zavestovskaya I., Kasatova A., Petrunya D., Uvarov O., Saraykin V., Zhilnikova M., Voronov V., Shafeev G., Taskaev S., Zelepukin I., Deyev S.* // Laser Phys. Lett. 2022. V. 19. P. 066002.
<https://doi.org/10.1088/1612-202X/ac642c>
25. *Novopashina D., A. Dymova M., Davydova A., Meschaninova M., Malysheva D., Kuligina E., Richter V., Kolesnikov Ia., Taskaev S.* // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. P. 306.
<https://doi.org/10.3390/ijms24010306>
26. *Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Makarov A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S.* // Biology. 2021. V. 10. P. 824.
<https://doi.org/10.3390/biology10090824>
27. *Taskaev S., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. B. 2021. V. 502. P. 85.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>
28. *Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Makarov A., Ostreinov G., Savinov S., Sokolova E.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. B. 2022. V. 525. P. 55.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.06.010>
29. *Going down in History: China Reaches a New Milestone to Develop an Advanced In-Hospital BNCT Solution for Clinical Use.*
<https://isnct.net/blog/2023/03/08/newsletter-19/>
30. *Badrutdinov A., Bykov T., Gromilov S., Higashi Y., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Miyazawa T., Shchudlo I., Sokolova E., Sugawara H., Taskaev S.* // Metals. 2017. V. 7. № 12. P. 558.
<https://doi.org/10.3390/met7120558>
31. *Bykov T., Goloshevskii N., Gromilov S., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Ruktuev A., Shchudlo I., Sokolova E., Taskaev S.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research B. 2020. V. 481. P. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.08.010>
32. *Kasatov D., Kolesnikov Ia., Koshkarev A., Makarov A., Sokolova E., Shchudlo I., Taskaev S.* // JINST. 2020. V. 15. P. 10006.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/10/P10006>
33. *Shoshin A., Burdakov A., Ivantsivskiy M., Polosatkin S., Semenov A., Sulyaev Yu., Zaitsev E., Polozova P., Taskaev S., Kasatov D., Shchudlo I., Bikchurina M.* // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 168. P. 112426.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112426>
34. *Дюсенова С.Е., Клямер Д.Д., Сухих А.С., Щудло И.М., Таскаев С.Ю., Басова Т.В., Громилов С.А.* // Журнал структурной химии. 2023. Т. 64. № 3. P. 106824.
https://doi.org/10.26902/JSC_id106824
35. *Taskaeva I., Kasatova A., Surodin D., Bgatova N., Taskaev S.* // Life. 2023. V. 13. P. 518.
<https://doi.org/10.3390/life13020518>

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.1.074.8

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОТОКА
НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ
ТЕРАПИИ¹

© 2025 г. В. В. Леонов^a, В. В. Поросев^{a, b, *}, Г. А. Савинов^a, С. Ю. Таскаев^{a, b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

* e-mail: porosev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 27.12.2023 г.

После доработки 29.02.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

С появлением новых источников нейтронов на базе ускорителей для бор-нейтронозахватной терапии возникла необходимость создания независимой системы мониторинга потока частиц во время облучения пациентов. Представленные в данной работе результаты показали, что предлагаемая система на базе сцинтиллятор – оптоволоконно – кремниевый микропиксельный фотоумножитель, использующая три различных датчика, позволяет измерять поток нейтронов, а также оценивать дозу, наведенную гамма-излучением. Применение двух типов полистирольных сцинтилляторов – СЦ-301 и обогащенного бором СЦ-331 производства ИФВЭ, Протвино – позволяет оценить вклад нейтронов, а использование дополнительного датчика, не имеющего сцинтиллятора, дает возможность оценить вклад в сигнал от черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне. Реализованная система детектирования оптических сигналов на основе кремниевых фотоумножителей обладает высокой квантовой эффективностью, а применение счетного режима регистрации событий, реализованного в считывающей электронике, позволило достичь уровня собственных шумов порядка нескольких десятков герц.

DOI: 10.7868/S3034564225080259

1. ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) представляет собой облучение тепловыми и эпитепловыми нейтронами, при котором в опухолевые клетки избирательно вводится соединение бора ¹⁰B. Тепловые нейтроны взаимодействуют с ¹⁰B в опухолевых клетках и приводят к их гибели за счет большой величины линейной передачи энергии образующихся α-частиц и ядер лития-7 при минимальном повреждении соседних нормальных клеток вследствие малого пробега образующихся частиц.

В настоящее время для измерения параметров терапевтических нейтронных пучков исполь-

зуются различные методы. Во-первых, измеряются интегральные сформированные дозовые профили в фантоме с помощью радиочувствительных гелей [1]. В то же время активно ведутся исследования по поиску более удобных методов диагностики, позволяющих непосредственно измерять параметры нейтронного потока в процессе облучения. В частности, применяются импульсные газовые камеры деления для измерения потока нейтронов и одновременно используются ионизационные камеры в токовом режиме для измерения сопутствующей дозы гамма-излучения [2]. Существенно возросшая интенсивность нейтронных источников привела также к необходимости создания нового поко-

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

ления диагностического оборудования. В частности, ожидаемый поток нейтронов составляет около 10^9 н/(см²·с) [3]. Примером таких разрабатываемых диагностических систем являются сдвоенные тканеэквивалентные пропорциональные счетчики [4]. По сравнению с газовыми детекторами детекторы на основе сцинтилляторов позволяют достичь существенно более высокого быстродействия. Кроме того, они значительно более компактны. Так, в Японии был разработан сцинтилляционный детектор на основе полимеризуемого сцинтиллятора Vicron BC490, обогащенного порошком LiF, с волоконно-оптическим считыванием информации [5]. Аналогичная конструкция, но на основе сцинтиллятора с бором Vicron BC454 ранее испытывалась этой же группой [6].

В нашей стране в ИФВЭ изготавливается бор-содержащий полистирольный сцинтиллятор СЦ-331, который имеет световыход 56–60 % от антрацена, максимум люминесценции света около 420 нм, время высвечивания около 2 нс, и содержит в себе 6 % ортокарборана, в составе которого присутствует природный бор [7]. Таким образом, для детектора с чувствительным объемом 1 мм³ ожидаемый поток событий будет составлять примерно 2 МГц, что позволяет регистрировать их с минимальными просчетами. Кроме того, использование бор-содержащих сцинтилляторов позволяет напрямую моделировать ситуацию с использованием бор-содержащих препаратов при облучении.

2. ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Датчики детектора имеют одинаковую конструкцию, при которой каждый из них содержит три независимых оптических канала регистрации. Первый канал регистрации основан на сцинтилляторе СЦ-331 с бором, второй на СЦ-301 без бора и третий – оптоволокну без сцинтиллятора. Сцинтилляторы выполнены в виде цилиндров диаметром 1 мм и длиной 1 мм. Боковые стороны сцинтиллятора, а также торец третьего оптоволокну покрываются белой светоотражающей краской. Сцинтилляторы монтируются на торцы оптоволокну с помощью оптического кремнийорганического каучука СКТН-МЕД марки Д (ООО “СУРЭЛ”) и защищены пластиковым светонепроницаемым корпусом. Регистрация оптических импульсов осуществляется с помощью микропиксельных

лавинных фотодиодов MPPC S13360-3050CS (HAMAMATSU).

Электроника регистрации реализована на базе специализированной 32-канальной микросхемы EASIROC (CITIROC в более поздней модификации) [8]. Каждый канал включает в себя восьмиразрядный цифро-аналоговый преобразователь, предусилитель с программируемым коэффициентом усиления, биполярный формирователь импульса, а также дискриминатор. Тот факт, что сцинтилляторы, обогащенные бором и сцинтилляторы, не содержащие бора, имеют несколько разный световой выход [9, 10] приводит к необходимости использования различных порогов детектирования в считывающей электронике.

В данном случае две микросхемы были подключены параллельно, чтобы иметь возможность регистрировать одни и те же события с двумя разными порогами. Число зарегистрированных событий в каждом канале электроники регистрации непрерывно накапливаются и с интервалом 10 мс передаются в компьютер для дальнейшей обработки. В процессе работы программа управления контролирует температуру платы, где смонтированы фотодиоды, и регулирует при необходимости напряжение их смещения для поддержания постоянного коэффициента усиления. Кроме того, для уменьшения величины собственных шумов микропиксельных лавинных диодов все фотоприемники охлаждаются до температуры 0 °С с помощью элемента Пельтье. Разница в отсчетах двух датчиков с бором и без бора позволяет оценить вклад нейтронной компоненты, регистрируемой детектором. Разность же отсчетов в канале детектора без бора и числа событий, зарегистрированных в канале без сцинтиллятора, дает сигнал, пропорциональный дозе гамма-излучения в точке измерения. На рис. 1 показана упрощенная блок-схема электроники регистрации (слева) и фотография экспериментальной установки (справа).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первоначальной версии детектора для передачи света к фотоприемникам мы использовали пластиковый оптоволоконный кабель ASANI SC-1000 (Япония) диаметром 1 мм. Несмотря на большое значение числовой апертуры $NA = 0.6$, данный тип кабеля имеет существенное погло-

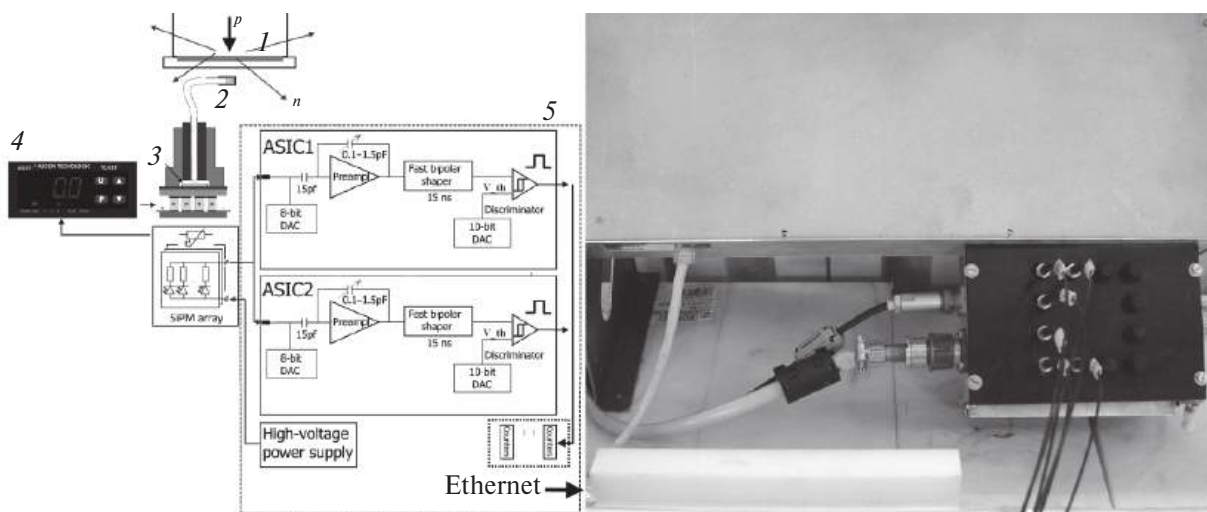


Рис. 1. Блок-схема электроники регистрации и фотография детектора: 1 – нейтрон-генерирующая мишень, 2 – датчик, 3 – микропиксельный лавинный фотодиод, 4 – контроллер элементов Пельтье, 5 – считывающая электроника.

шение около 40% на длине 8.5 м в области максимума эмиссии сцинтиллятора, и пластиковые оптоволоконные кабели продемонстрировали ограниченную радиационную стойкость [11]. Поэтому в новой версии детектора мы применили кварцевое волокно также диаметром 1 мм

CeramOptec HUV (Германия) с числовой апертурой $NA = 0.5$. Меньший угол захвата света у данного волокна компенсируется существенно возросшим светопропусканием.

Рисунок 2 демонстрирует результат измерения на стенде на базе монохроматора МДР-12У

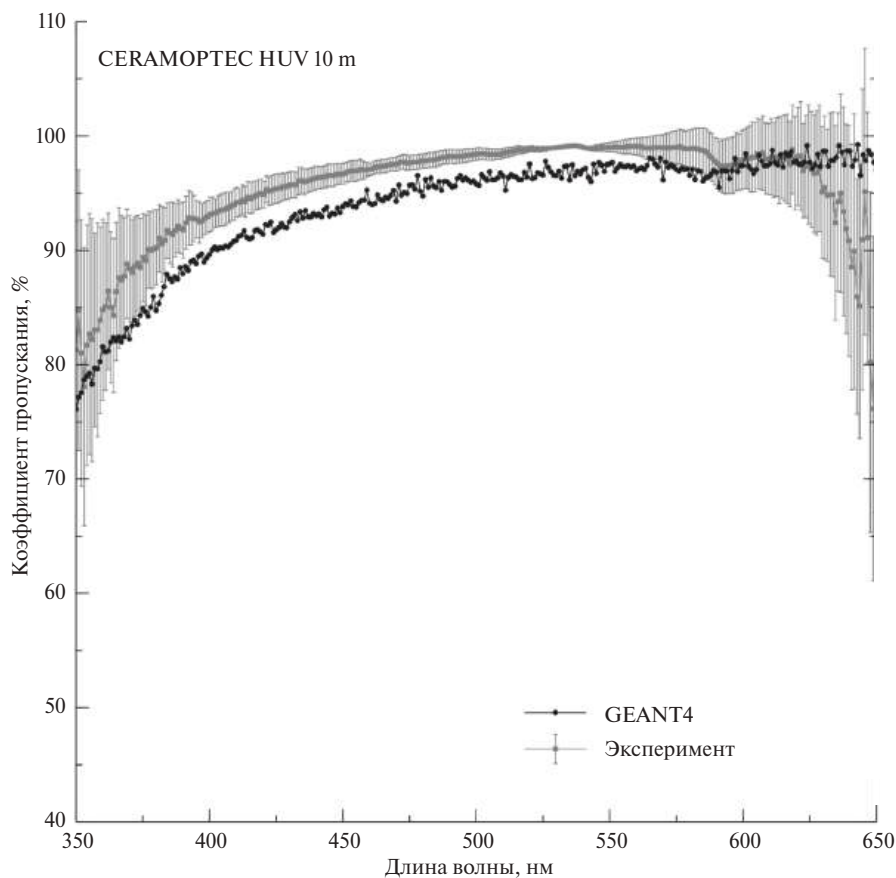


Рис. 2. Спектр пропускания оптоволоконна CeramOptec HUV.

(ЛОМО) оптической прозрачности волокна. Для сравнения представлены результаты моделирования в пакете GEANT4. Видно, что использованные параметры материалов в моделировании позволяют получить результаты, которые совпадают с результатами эксперимента в пределах 2% и, соответственно, могут быть использованы в дальнейших расчетах по оптимизации конструкции детектора.

На рис. 3 показана величина счета в каналах детектора в зависимости от порога регистрации для двух подключенных датчиков при облучении их потоком нейтронов на установке БНЗТ в ИЯФ СО РАН. Представленные зависимости однозначно демонстрируют избыток счета в каналах с сцинтиллятором, обогащенным бором. Кроме того, в каналах SiPM7 и SiPM8 показаны собственные шумы микропиксельных лавинных фотодиодов без каких-либо подключенных к ним датчиков. Видно, что в области

малых порогов (малых сигналов) собственные шумы существенно меньше, чем вклад от черенковского излучения, генерируемого в кварцевом волокне.

Для сравнения на рис. 4 показан уровень шумов в тех же каналах в лабораторных условиях. В процессе измерения характеристик детектора интегральный заряд протонов на нейтрон генерирующей мишени составил около 70 Кл (10 мА·ч). На таком масштабе датчики не показали заметной деградации параметров и поэтому требуют дальнейшего исследования их радиационной стойкости. Наблюдаемый разброс сигналов между датчиками объясняется технологическим разбросом их параметров при изготовлении, что компенсируется путем предварительной калибровки датчиков на источнике рентгеновского излучения.

К сожалению, кварцевое волокно CeramOptec имеет недостаточную защиту от окружающего

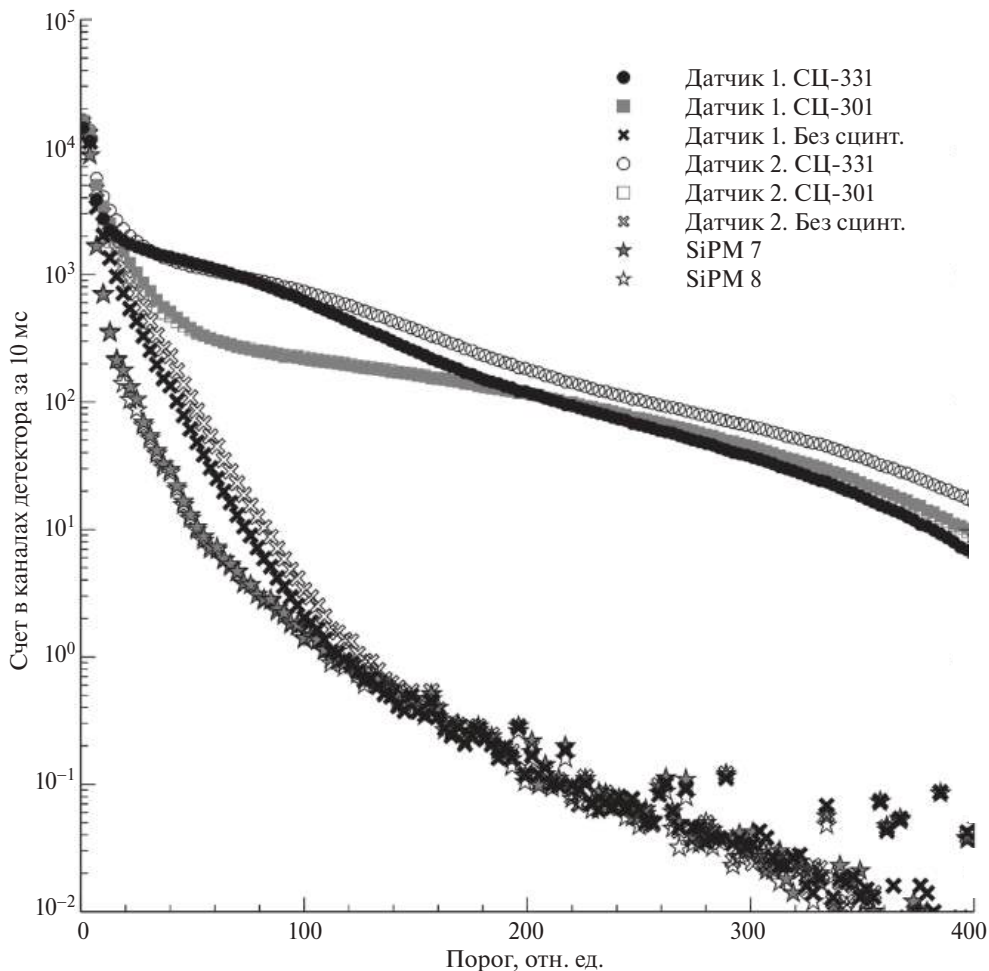


Рис. 3. Зависимость счета в каналах регистрации от величины порога для двух датчиков и двух отдельно стоящих микропиксельных лавинных фотодиодов при облучении нейтронами.

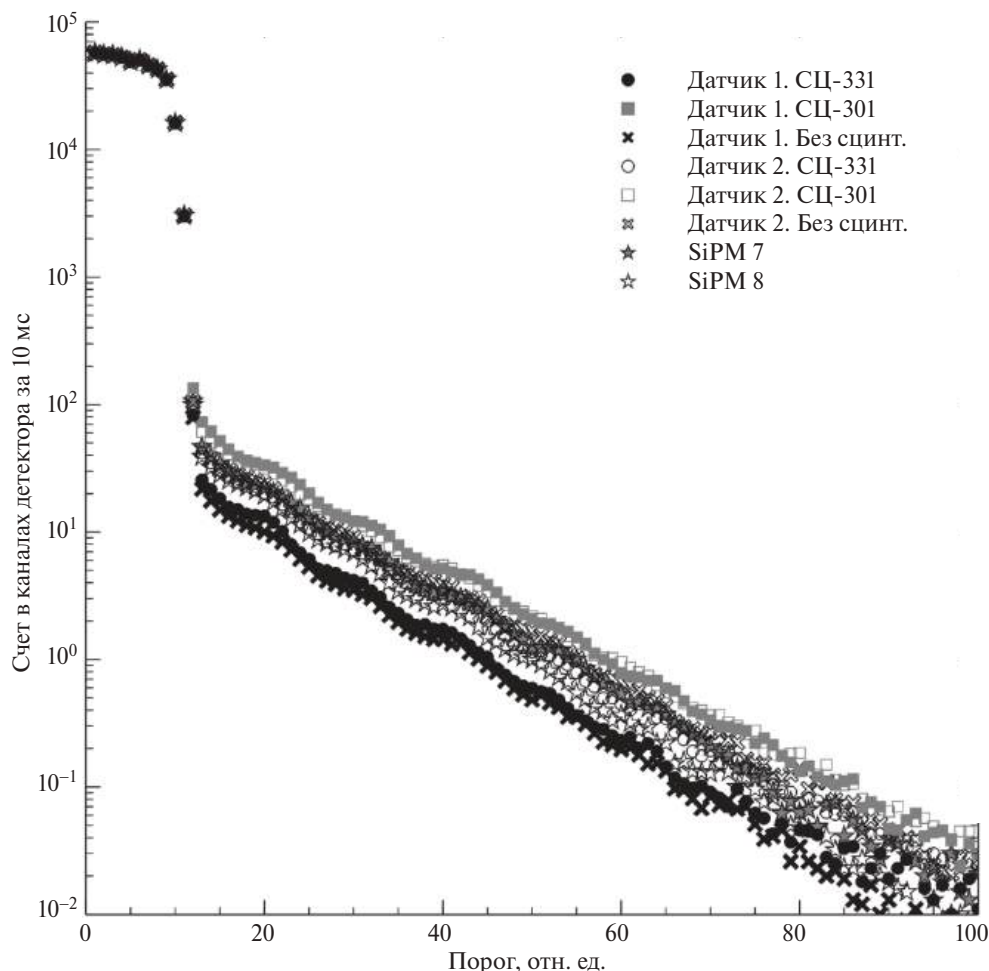


Рис. 4. Зависимость счета шумовых импульсов в каналах регистрации от величины порога в лабораторных условиях.

освещения ввиду меньшей толщины защитного полиэтиленового покрытия (200 мкм) на нем по сравнению со стандартной толщиной оболочки (500 мкм) на пластиковых волокнах и требует установки дополнительных экранов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН разработана система мониторинга потока нейтронов на установке для БНЗТ на основе оптоволоконного датчика и микропиксельных лавинных фотодиодов. Повышенная прозрачность кварцевого волокна в новой модификации детектора позволила компенсировать уменьшение светосбора из-за меньшей, чем у пластикового волокна, числовой апертуры, и на масштабе нескольких сеансов облучения данный тип волокна продемонстрировал стабильность своих параметров. Тем не менее необходимо проведение дальнейших исследований радиационной стойкости датчиков и определения их ресурса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uusi-Simola J., Heikkinen S., Kotiluoto P., Seren T., Seppala T., Auterinen I., Savolainen S.* // J. Applied Clinical Medical Phys. 2007. V. 8. P. 114. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v8i2.2409>
2. *Tanner V., Auterinen I., Helin J., Kosunen A., Savolainen S.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1999. V. 422. P. 101. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01071-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01071-7)
3. International Atomic Energy Agency, Current Status of Neutron Capture Therapy. IAEA-TECDOC-1223, IAEA, Vienna, 2001.

4. Moro D., Colautti P., Lollo M., Esposito J., Conte V., De Nardo L., Ferretti A., Ceballos C. // *Appl. Radiat. Isot.* 2009. V. 67. P. 171.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.03.042>
5. Ishikawa M., Yamamoto T., Matsumura A., Hiratsuka J., Miyatake S.-I., Kato I., Sakurai Y., Kumada H., Shrestha S.J., Ono K. // *Radiat. Oncol.* 2016. V. 11. P. 105.
<https://doi.org/10.1186/s13014-016-0680-0>
6. Ishikawa M., Ono K., Sakurai Y., Unesaki H., Uritani A., Bengua G., Kobayashi T., Tanaka K., Kosako T. // *Appl. Radiat. Isot.* 2004. V. 61 (5). P. 775.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.053>
7. Брутвич Г.И., Бреховских В.В., Семенов В.К., Холоденко С.А. Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2013-23. Протвино, 2013.
8. Callier S., Taille C.D., Martin-Chassard G., Raux L. // *Physics Proced.* 2012. V. 37. P. 1569.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.486>
9. Porosev V.V., Savinov G.A. // *JINST.* 2019. V. 14 P. 06003.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/06/P06003>
10. Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Makarov A.N., Porosev V.V., Savinov G.A., Shchudlo I.M., Taskaev S.Yu. // *JINST.* 2019. V. 14. P. 12002.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/12/P12002>
11. Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Makarov A.N., Porosev V.V., Savinov G.A., Shchudlo I.M., Taskaev S.Yu., Verkhovod G.D. // *JINST.* 2021. V. 16. P. 01024.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/P01024>