

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 7 (Специальный выпуск № 1), 2025

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Состояние работ на инжекционном комплексе ВЭПП-5

В.В. Балакин, Ф.А. Еманов, Д.Е. Беркаев, К.В. Астрелина, О.В. Беликов, Ю.М. Боймельштейн, Д.Ю. Болховитянов, А.Р. Фролов, Г.В. Карпов, А.С. Касаев, Н.Н. Лебедев, А.Е. Левичев, С.Л. Самойлов, А.В. Топчиенко, Ю.А. Роговский

4

Изготовление и тестирование элементов высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA

М.И. Брызгунов, А.В. Бублей, А.Д. Гончаров, А.П. Денисов, В.И. Кремнев, В.В. Пархомчук, В.М. Панасюк, А.В. Петрожицкий, В.Б. Рева, Н.С. Кремнев, С.В. Шиянков, А.А. Путьмаков, В.М. Константинов, П.Е. Мураткозиев, В.Г. Ческидов, В.Я. Корчагин, С.П. Посполита, Л.С. Посполита, В.А. Полухин, Г.И. Эрг, С.И. Рувинский, О.В. Беликов, В.А. Чекавинский, Л.М. Щеголев, Д.Н. Скоробогатов, И.А. Гусев, Д.В. Сеньков, Д.Н. Пурескин, К.М. Горчаков, Р.В. Вахрушев, А.М. Батраков, К.С. Штро, А.В. Павленко, М.Н. Кондауров, Г.В. Карпов, М.Г. Федотов, Е.А. Бехтенов, А.В. Иванов, А.А. Жариков

13

Проект компактного источника нейтронов DARIA

Т.В. Кулевой, Г.Н. Кропачев, А.Л. Ситников, А.И. Семенников, Вл.С. Скачков, И.В. Кильметова, Р.П. Куйбида, А.В. Козлов, Е.Р. Хабибуллина, А.А. Мальшев, С.Н. Андреев, А.О. Гребешков, С.В. Григорьев, Н.А. Коваленко, М.В. Булавин, К.А. Мухин, Е.В. Москвин, К.А. Павлов, Н.А. Григорьева, В.А. Скалыга, И.В. Изотов, А.Ю. Гойхман, Е.А. Кравцов, С.А. Гаврилов

21

Развитие методов контроля стабильности пучка электронов на источниках синхротронного излучения

О.И. Мешков, В.Л. Дорохов, Д.Ф. Решетов, А.И. Стирин

33

Модернизация ионно-оптической системы ускорителя VITA

Г.М. Остреинов, С.С. Савинов, И.М. Щудло, С.Ю. Таскаев

39

Повышение производительности коллайдера ВЭПП-2000 за последние два года

С.А. Растигеев, Ю.С. Актершев, Е.В. Бедарев, О.В. Беликов, Д.Е. Беркаев, В.С. Денисов, Э.А. Эминов, Л.Б. Фомин, К.М. Горчаков, Г.В. Карпов, А.С. Касаев, А.Н. Кирпотин, З.Э. Коншин, И.А. Кооп, А.А. Краснов, А.В. Купуржанов, Г.Я. Куркин, А.П. Лысенко, С.В. Мотыгин, А.А. Мурасев, А.В. Отбоев, Е.А. Переведенцев, В.П. Просветов, Ю.А. Роговский, А.М. Семенов, А.И. Сенченко, Ю.М. Шатунов, Д.Б. Шварц, М.В. Тимошенко, В.Д. Юдин, И.М. Землянский, Ю.М. Жаринов

46

Запрещенные полосы бетатронных частот в коллайдере ВЭПП-2000

Д.Э. Чистяков, Е.А. Переведенцев

52

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Система управления ускорительным масс-спектрометром ИЯФ СО РАН

Л.А. Кутнякова, Е.С. Константинов, А.В. Петрожицкий, С.А. Растигеев, В.Б. Рева 59

Разработка программного обеспечения для автоматизации настройки магнитооптической структуры ускорителей заряженных частиц

Р.З. Мамутов, Г.Н. Баранов 65

Вспомогательная автоматика атомарного инжектора с энергией 15 кэВ

В.В. Орешонок 72

Многофункциональное программное обеспечение для захвата и обработки оптических сигналов с датчиков профиля пучка линейного ускорителя ИЯИ РАН

А.И. Титов, С.А. Гаврилов, И.И. Полоник 77

Обновление программного обеспечения ВЧ-системы ВЭПП-2000

Э.А. Эминов, А.И. Сенченко, Ю.А. Роговский, А.П. Лысенко 84

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Коаксиальный резонатор в круглом запердельном волноводе для исследования влияния модификации поверхности меди на ее проводимость

З.Н. Нуриахметов, Ю.Д. Черноусов, Д.В. Смовж 90

Прецизионный модульный сильноточный источник тока для стенда магнитных измерений ИЯФ

Д.В. Сеньков, Д.Н. Пурескин, А.А. Старостенко, В.А. Докутович, К.В. Жилев, А.Ю. Пахомов 95

Коммерческий СВ-магнетрон в импульсном режиме для ускорительной технологии

Ю.Д. Черноусов, И.В. Шеболаев 100

Генераторы питания ударного магнита для выпуска ионов из бустера в транспортный канал нуклотрона ускорительного комплекса NICA

Д.А. Шведов, О.В. Анчуггов, Д.И. Бажутов, А.А. Фатеев, А.В. Тузиков 105

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Инжектор стационарного пучка отрицательных ионов для тандемного ускорителя

А.А. Гмыря, Ю.И. Бельченко, А.Л. Санин, С.С. Савинов, С.Ю. Таскаев, И.М. Шудло 111

Метод импульсных измерений магнитного поля многополюсных ондуляторов	
<i>Ф.П. Казанцев, А.В. Брагин, А.А. Волков, А.И. Ерохин, А.В. Зорин, П.В. Каноник, Н.А. Мезенцев, А.Н. Сафронов, А.А. Седов, О.А. Тарасенко, С.В. Хрущев, В.М. Цуканов, В.А. Шкаруба</i>	116
Магнитные элементы низкоэнергетического канала для ускорителя тяжелых ионов	
<i>И.В. Кильметова, Г.Н. Кропачев, Т.В. Кулевой, А.И. Семенников, О.С. Сергеева, В.С. Скачков, Е.Р. Хабибуллина, А.С. Борисков, А.М. Опекунов</i>	121
Диполи на постоянных магнитах для источника синхротронного излучения	
<i>И.В. Кильметова, Т.В. Кулевой, О.С. Сергеева, В.С. Скачков</i>	126
Система контроля и управления стенда для исследования сверхпроводящих магнитов финальной фокусирующей системы	
<i>С.С. Козуб, А.И. Агеев, Р.В. Антонец, А.П. Орлов, М.Н. Столяров, А.С. Власов</i>	131
Прототип сверхпроводящего ондулятора с периодом 12 мм и полем 0.7 Тл	
<i>С.В. Хрущев, Н.А. Мезенцев, А.Н. Сафронов, В.А. Шкаруба, В.М. Цуканов</i>	136
Состояние работ по сверхпроводящим вигглерам и ондуляторам для источника синхротронного излучения СКИФ	
<i>В.А. Шкаруба, А.В. Брагин, А.А. Волков, Е.А. Гусев, А.И. Ерохин, А.В. Зорин, Ф.П. Казанцев, П.В. Каноник, Н.А. Мезенцев, А.Н. Сафронов, А.А. Седов, О.А. Тарасенко, С.В. Хрущев, В.М. Цуканов</i>	141

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

Исследование возможности применения линейного ускорителя И-2 для получения медицинских радиоизотопов	
<i>Н.В. Марков, А.А. Артюхов, В.А. Загрядский, А.В. Козлов, К.О. Королев, Т.В. Кулевой, К.А. Сергунова, И.И. Скобелин, В.С. Столбунов</i>	148
Промышленные импульсные линейные ускорители для радиационной обработки продукции	
<i>В.В. Безуглов, А.А. Брызгин, Л.А. Воронин, М.В. Коробейников, С.А. Максимов, А.В. Пак, В.М. Радченко, А.В. Сидоров, В.О. Ткаченко, Е.А. Штарклев</i>	154

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

Современные комбинированные сверхвысоковакуумные насосы для ЦКП СКИФ	
<i>А.М. Семенов, А.А. Краснов</i>	159

СОСТОЯНИЕ РАБОТ НА ИНЖЕКЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-5¹

© 2025 г. В. В. Балакин^{а,*}, Ф. А. Еманов^а, Д. Е. Беркаев^а, К. В. Астрелина^а,
О. В. Беликов^а, Ю. М. Боймельштейн^а, Д. Ю. Болховитянов^а, А. Р. Фролов^а,
Г. В. Карпов^а, А. С. Касаев^а, Н. Н. Лебедев^а, А. Е. Левичев^а, С. Л. Самойлов^а,
А. В. Топчиенко^а, Ю. А. Роговский^а

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

* e-mail: Vit.V.Balakin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 19.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 снабжает коллайдеры ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 ИЯФ СО РАН пучками электронов и позитронов. Ранее было показано, что инжекционный комплекс в полной мере покрывает потребности действующих коллайдеров в пучках частиц. Тем не менее продолжают дальнейшие модернизации подсистем комплекса (термостабилизации, оптической диагностики, программного обеспечения), направленные на улучшение взаимодействия с потребителями и повышение стабильности работы комплекса. В статье представлены последние достижения производительности инжекционного комплекса и возможности его улучшения.

DOI: 10.31857/S0032816225070011

1. ВВЕДЕНИЕ

Инжекционный комплекс (ИК) ВЭПП-5 [1, 2] служит источником электронных и позитронных пучков для двух действующих ускорительных

комплексов ВЭПП-2000 [3] и ВЭПП-4 [4, 5], с которыми он соединен транспортным каналом К-500 (см. рис. 1).

Инжекционный комплекс состоит из электронной пушки, двух линейных ускорителей

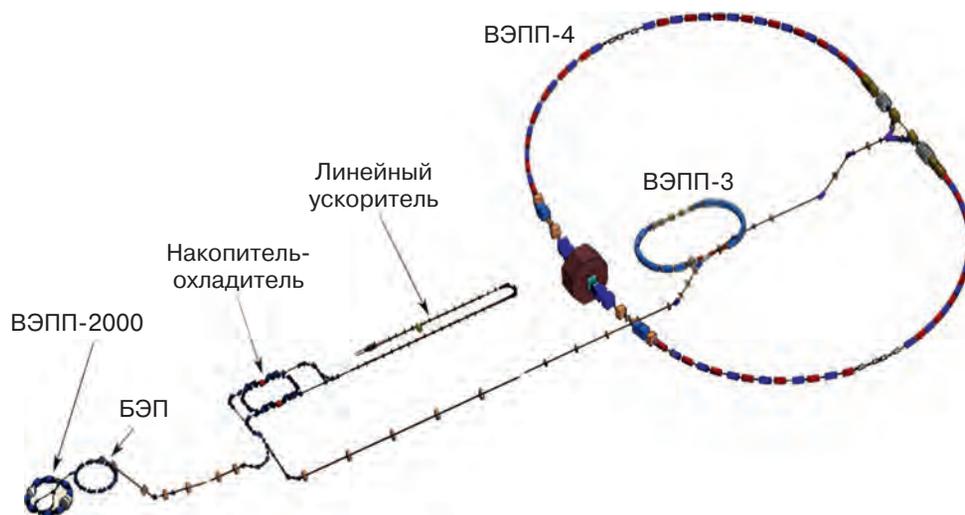


Рис. 1. Схема инжекционного комплекса и ВЭПП-4М/ВЭПП-2000.

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

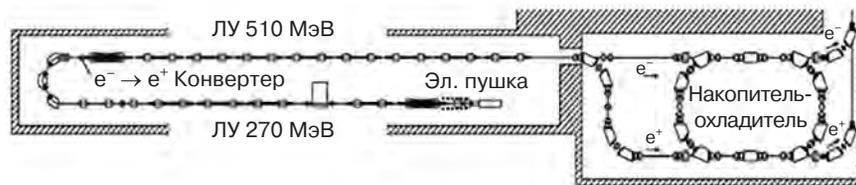


Рис. 2. Схема инжекционного комплекса.

(ЛУ), конверсионной системы, накопителя-охладителя (НО) и транспортных каналов К-500, которые соединяют накопитель с бустерами потребителей пучка. Схема инжекционного комплекса представлена на рис. 2.

Линейные ускорители инжекционного комплекса состоят из четырех модулей, в которых суммарно 14 ускоряющих структур с постоянным импедансом на основе круглого диафрагмированного волновода, работающие на частоте 2855.5 МГц [6]. Каждый ускоряющий модуль питается от клистрона 5045 производства SLAC через умножитель мощности SLED. Накопитель-охладитель рассчитан на максимальную энергию 510 МэВ, имеет периметр 27.4 м, времена радиационного затухания на максимальной энергии составляют 18/11/12 мс (v, h, s). В настоящий момент на НО работает резонатор первой гармоники 10.94 МГц. Инжекция из линейных ускорителей в НО осуществляется с частотой до 12.5 Гц, перепуск к потребителям возможен с частотой до 2 Гц. В настоящее время он происходит один раз в 3 с из-за ограничений впускных систем со стороны бустера комплекса ВЭПП-2000, достигнутые скорости накопления электронов и позитронов $1.1 \cdot 10^{11} e^-/с$ и $1.2 \cdot 10^{10} e^+/с$.

Выпущенный пучок транспортируется к потребителям по общему каналу К-500, длина которого составляет величину около 250 м до бустера электронов и позитронов (БЭП) и 120 м до ВЭПП-3. Проектная энергия пучка в транспортных каналах 510 МэВ. К-500 состоит из пяти секций: спуск от накопителя-охладителя в туннель, регулярные знакопеременные структуры на квадрупольных линзах с равными промежутками в каждую сторону и подъемные части к каждому из потребителей пучка. К настоящему моменту достигнута эффективность перепуска около 50% по обоим направлениям, ведутся работы по улучшению эффективности и стабильности перепуска [7].

2. УЛУЧШЕНИЯ НА ИНЖЕКЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ

2.1. Модернизация оптической диагностики накопителя-охладителя

Было решено заменить схему вывода синхротронного излучения из вакуумной камеры ускорителя и расположение диагностических элементов. Вместо вакуумного зеркала и вывода света вверх было решено поставить сразу вакуумное окно и к общему с ним фланцу прикрепить снаружи зеркало, отражающее пучок света вправо, оставляя его в плоскости накопителя (рис. 3).

В плоскости кольца располагаются по три зеркала и 2 линзы с каждого из направлений (позитронного и электронного), общий диссектор, а 2 ПЗС-камеры подняты над плоскостью накопителя-охладителя. Разработка и расчет оптической системы для установки диагностики пучков заряженных частиц на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 были выполнены в программе Zemax [8].

Для измерения поперечных параметров пучка заряженных частиц используется ПЗС-матрица размером $6.784 \times 5.427 \text{ мм}^2$. Из-за особенностей расположения магнитных элементов накопи-

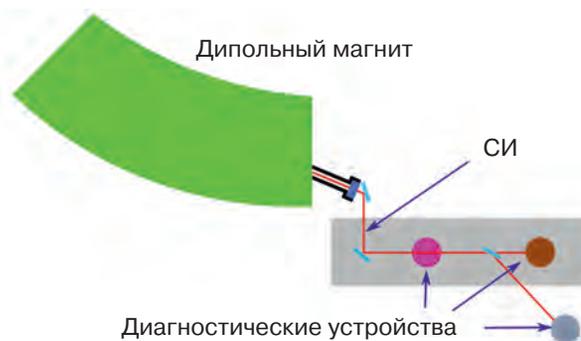


Рис. 3. Схема позитронной оптической системы после модификации. Вид сверху.

теля-охлаждителя присутствуют фиксированные расстояния от точки излучения СИ до первого зеркала 500 мм и от первого зеркала до расположения второго зеркала 550 мм.

Для оптимизации параметров системы (фокусного расстояния линз, дистанции между ними) были выбраны операторы, которые контролируют:

- EFL – эффективное фокусное расстояние системы;
- EFLY – эффективное фокусное расстояние в локальной y -плоскости;
- AXCL – хроматизм положения в линейных единицах для фокальных оптических систем и в диоптриях для афокальных систем.

В качестве критерия качества изображения системы использовался диаметр пятна рассеяния, размер которого (21 мкм) оказался во много раз меньше, чем радиус Эйри (318 мкм). Расчет показал размер изображения пучка заряженных частиц, равный 5.3 мм, что меньше минимального размера ПЗС-матрицы, что полностью соответствует поставленным требованиям [9].

Для контроля положения диафрагмы одного из объективов было решено использовать контроллер Arduino UNO [10]. Из-за того, что он не имеет полноценного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а только выходы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) была необходимость создания электронной схемы для конвертации ШИМ-сигнала в постоянное напряжение.

Arduino UNO включен в сеть контроллеров инжекционного комплекса, получая свой IP-адрес у DHCP-сервера ИК по его MAC-адресу. В то же время пользовательское приложение для управления состоянием диафрагмы получает IP-адрес Arduino у DNS-сервера по персональному имени и передает ему команды управления через протокол UDP. Прошивка Arduino UNO рассчитана на прием команд по UDP от пользовательской программы для управления диафрагмой, отсылкой подтверждений выполненных команд и отслеживания текущего состояния диафрагмы путем измерения, поданного на него напряжения встроенным АЦП. Также применяется механизм keepalive для подтверждения наличия связи с платой Arduino Uno.

Ранее изображение пучка заряженных частиц не оцифровывалось. В связи с возникшей необходимостью такой оцифровки установленный ранее аналоговый видеоглазок был заменен на

цифровую ПЗС-камеру IDS UI-5240SE-M-GL Rev. 2. Она управляется протоколом GigE Vision через интерфейс Ethernet.

Пользовательское приложение реализовано на языке Python 3, оно отображает зарегистрированное ПЗС-матрицей изображение и выводит измеренные размера пучка, а также позволяет задавать пользователю необходимые параметры ПЗС-камеры (время экспозиции, вариант запуска камеры и т.д.). Приложение передает команды службе через фреймворк CXv4 [11], используя библиотеку русx4 [12], а служба использует обертку ruueue [13] для передачи команд ПЗС-камере и получения от нее данных.

2.2. Модернизация системы термостабилизации

Сверхвысокочастотные структуры (СВЧ) линейного ускорителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 крайне чувствительны к температуре охлаждающей дистиллированной воды. Рабочие температуры для разных структур находятся в диапазоне от 28 °С до 34 °С. Стабильность воды требуется ± 0.1 °С. Рабочая температура и стабильность достигается подогревом воды с начальной температурой 27–28 °С. Дистиллированная вода для каждой структуры нагревается индивидуальной теплостанцией (№ 1–19).

В летнее время года при высокой влажности и температуре наружного воздуха температура охлаждающего контура поднимается выше 28 °С. Работа магнитной системы при такой температуре охлаждающего дистиллята не нарушается, а вот для термостабилизации СВЧ-структур такая ситуация является критичной. Теплостанции отключаются, температура СВЧ-структур растет выше установленных значений, приводя к значительным изменениям геометрии этих структур и, как следствие, к падению ускоряющего напряжения и энергии пучка на выходе из линейного ускорителя. В этом случае предусмотрено охлаждение воды внутреннего контура чиллером (рис. 4а).

Однако при режиме работы системы термостабилизации с чиллером возникает другая проблема: постоянное включение и отключение чиллеров (а их в системе охлаждения два) приводило к значительным колебаниям температуры охлаждающей воды. Полная амплитуда колебаний достигла 6 °С и выше. При работе только одного чиллера амплитуда меньше (2.5 °С), но все равно это значение является слишком

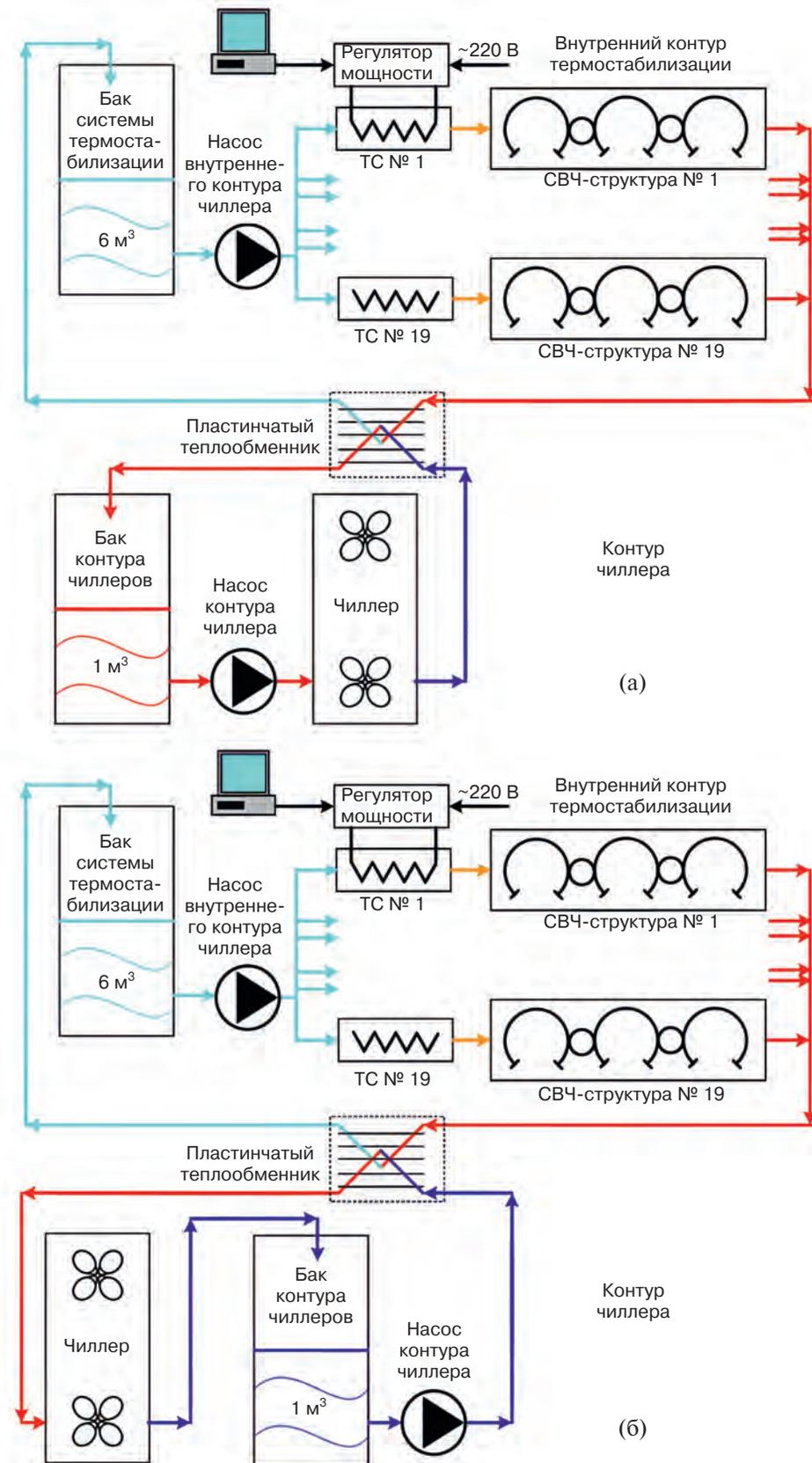


Рис. 4. Гидравлическая схема системы термостабилизации инжекционного комплекса при работе с чиллером до модернизации (а) и после нее (б).

большим для стабильной работы СВЧ-структур линейного ускорителя инжекционного комплекса.

Чтобы уменьшить колебания температуры охлаждаемой чиллерами воды до приемлемых параметров, была предложена и реализована иная система охлаждения технической воды. В старой схеме вода после чиллера напрямую поступала на теплообменник, что и приводило к сильной связи колебания температур секций и охлаждающей воды. В новой же схеме был изменен порядок следования элементов системы термостабилизации (рис. 4б), что позволило направить воду после чиллера в буферный бак (объемом 1 м³). После этого колебания температуры охлаждающей воды значительно снизились, составив величину около 1.2 °С. Колебания же входной температуры, охлаждающей секцию воды, уменьшались до значения 0.2 °С.

2.3. Измеритель временных интервалов TIME24K4 линейного ускорителя инжекционного комплекса

Время-цифровой преобразователь (ВЦП) представляет собой блок для измерения временных интервалов, изготовлен в стандарте КАМАК. Причины выбора именно этого стандарта две: стандарт КАМАК поддерживается на ИК и можно использовать хорошо отработанную технологию, что значительно удешевляет проект и уменьшает время изготовления прибора. Для измерения предполагается диапазон временных интервалов от 100 нс до 20 мс и с дискретностью от 1.5 до 2 нс.

Диапазон временных интервалов и точность измерения определили выбор схемы прибора и инструменты для реализации проекта. Измерение интервала времени цифровым методом основано на заполнении его импульсами с образцовым периодом. Для проекта выбраны два основных образцовых периода. Первый задается от кварцевого генератора с частотой 25 МГц. Второй – от тактовой частоты инжекционного комплекса. Эта тактовая частота используется для блоков временных задержек и равна удвоенной частоте резонатора накопителя-охлаждителя ($2 \cdot 10.937404$ МГц).

Расчет основных параметров измерителя ВЦП дает следующие результаты. Для временного интервала 20 мс и величины дискретности 1.5 нс получается число тактов ($\approx 13\,333\,333$) для изме-

рения временного интервала. Это число близко в двоичном коде к $2^{24} = 16\,777\,216$. Двоичная шина на n контактов представляет число $2n - 1$, отсюда получается шкала прибора 24 бита в двоичном коде.

Синхронный двоичный счетчик на 24 бита для счета тактов с периодом 1.5 нс изготовить проблематично (стоимость прибора неоправданно повысится). Потому для измерения временного интервала 20 мс с разрешением 1.25 нс используются две шкалы. Первая шкала с образцовым периодом 1/25 МГц. Количество тактов счетчика для первой шкалы равно $20 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot 25 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} = 500\,000$. Величину первого синхронного двоичного счетчика (для счета тактов с периодом 1/25 МГц) выбираем 19 бит. Для второй шкалы выделяется 5 бит (24 бит – 19 бит). Количество тактов счетчика второй шкалы равно 32. Получается образцовый период для счетчиков второй вспомогательной шкалы $40 \text{ нс} / 32 = 1.25 \text{ нс}$, что соответствует частоте 800 МГц. Для сохранения временного разрешения и уменьшения тактовой частоты используются два счетчика для второй шкалы. Первый счетчик считает положительные переходы, а второй – отрицательные. Такой вариант позволяет сохранить временное разрешение и уменьшить тактовую частоту второго образцового периода в два раза (до 400 МГц). Этот метод построения прибора можно отнести к методу интерполяции.

Время-цифровой преобразователь Time24k4 изготовлен и проведены тестовые измерения на двух блоках. Блок изготовлен в стандарте КАМАК. Размеры блока 1М. Основные параметры прибора:

- шкала 24 бита;
- временное разрешение 1.25 и 1.428 нс;
- максимальный временной интервал 20.97 и 23.8 мс;
- неравномерность (чет-нечет) ширины каналов 10%;
- интегральная нелинейность на 90% шкалы лучше 0.001%;
- набор статистики четыре страницы шириной 11 бит и глубиной 8 бит.

2.4. Развитие программного обеспечения

Программное обеспечение комплекса построено на основе модульного фреймворка CXv4 [11]. Изначально этот фреймворк служил для абстрак-

ции оборудования ускорителя, но к настоящему времени сложилась практика использования СХ-серверов для обмена данными между программами на клиентском уровне. То есть СХv4 служит в качестве общей программной шины, благодаря чему сильно упрощаются связи между программами. На инжекционном комплексе используется централизованная загрузка/сохранение состояний установки, для которого была необходима конфигурационная база данных, содержащая структурированную информацию о подсистемах и устройствах. Загрузчик состояний служит основой для автоматики, которая реализует цикл накопления-выпуска и переключение между потребителями или видами частиц [7]. Для работы автоматического программного обеспечения сразу же потребовалось обмениваться данными с системами управления потребителей пучка. Ситуация осложняется тем, что системы управления инжекционного комплекса и потребителей пучка изначально развивались независимо, и в результате в них используется разное базовое программное обеспечение. Со стороны ВЭПП-4 – EPICS, на ВЭПП-2000 VCAS и TANGO. На ранних этапах работ необходимые для автоматики данные передавались при помощи программ-шлюзов с использованием общей сети института. Остальные данные, например, диагностическая информация канала К-500 не передавались, а вместо этого была принята практика удаленного запуска клиентских программ. К настоящему моменту времени полностью построена общая сеть инжекционного комплекса и коллайдеров, в которой для обмена данными между системами управления со стороны каждой установки работает шлюзовая виртуальная машина (рис. 5).

Для улучшения взаимодействия с потребителями пучка для СХv4 ранее были разработаны клиентские модули для VCAS, EPICS, TANGO,

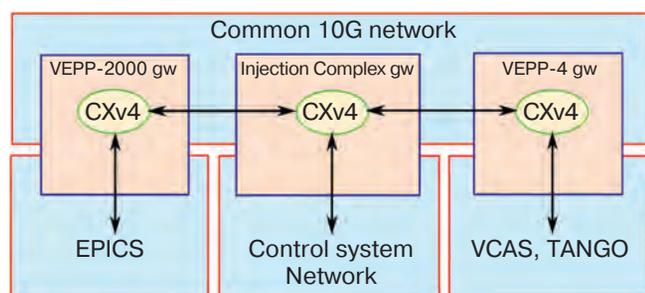


Рис. 5. Схема общей сети инжекционного комплекса и ускорителей потребителей.

и на настоящем этапе работ был создан серверный модуль EPICS. Клиентские модули дают возможность средствами клиентских библиотек СХ получать доступ к данным из стороннего программного обеспечения (ПО), а серверный модуль позволяет СХ-серверу отвечать по протоколу другого фреймворка. Так же для СХv4 был реализован драйвер для зеркалирования данных устройства или отдельных каналов. Такой набор средств позволяет создавать очень гибкие шлюзы между всеми имеющимися установками.

Конфигурационная база данных (БД) комплекса к настоящему времени дополнена и средствами автоматизации конфигурирования СХv4, значительно упростилась настройка СХ-серверов, которые служат для обмена данными как внутри системы управления ИК, так и с потребителями пучка. В настоящий момент конфигурационная БД применяется и в качестве источника данных для прикладных программ. Изначально все описанные архитектурные подходы были применены при создании программ для автоматизации основных технологических процессов инжекционного комплекса (которые упомянуты выше). Благодаря этому структура прикладного ПО комплекса сильно упростилась и приблизительно соответствует схеме, представленной на рис. 6.

Позднее архитектура была применена и в ряде других прикладных программных комплексах, например для программных инструментов управления накопителем-охладителем [14], в которых программы-обработчики данных обмениваются с пользовательскими приложениями через СХ-сервера и конфигурационная БД задействована для выбора используемых в измерении матрицы откликов элементов магнитной системы и т.д.

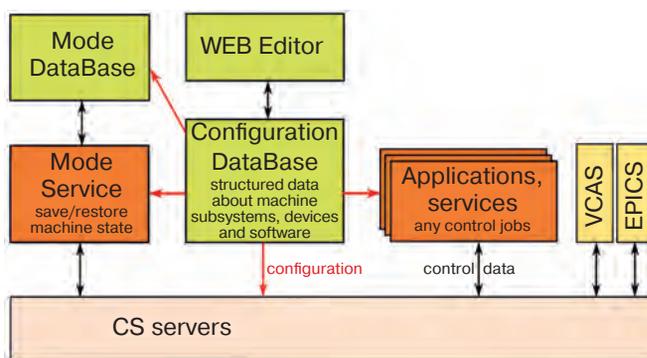


Рис. 6. Схема прикладного программного обеспечения инжекционного комплекса.

3. РАБОТА КОМПЛЕКСА В СЕЗОНЕ 2022/2023 ГОДА

Сезон 2022/2023 года начался 15 сентября и закончился 3 июля. Статистика по количеству частиц в электронном пучке на выходе с пушки приведена на рис. 7.

Небольшой пик в начале объясняется тем, что в сентябре длительность пучка была около 5.35 нс, а после ее уменьшили до 4.75 нс. Рисунок 8 демонстрирует ток накопленного в накопителе-охладителе пучка, который выпускался в транспортный канал К-500. Зеленый маркер соответствует режиму электронов для ВЭПП-2000, бирюзовый – для ВЭПП-4М, красный и пурпурный – позитронные режимы.

На рис. 8 присутствует отличительная особенность, видно, что инжекционный комплекс начал поставлять позитроны только в середине

января 2023 года. Причиной тому выход из строя одного из кластронов, питающих ускоряющие структуры линейного ускорителя.

3.1. Неполадки кластрона

Вышедший из строя кластрон питает 4 секции ЛУ, которые отвечают за первоначальное ускорение позитронов, полученных на конверсионной мишени. Без них ускорить рожденный позитронный пучок не представляется возможным, и в полной мере ИК может производить только электроны. Для работы на потребители были перестроены оставшиеся секции ЛУ, и комплекс продолжил работу с пучками повышенной энергии.

Вместе с этим для выявления причин его регулярных вакуумных пробоев и их устранения был разобран сам кластрон. При вскрытии обна-

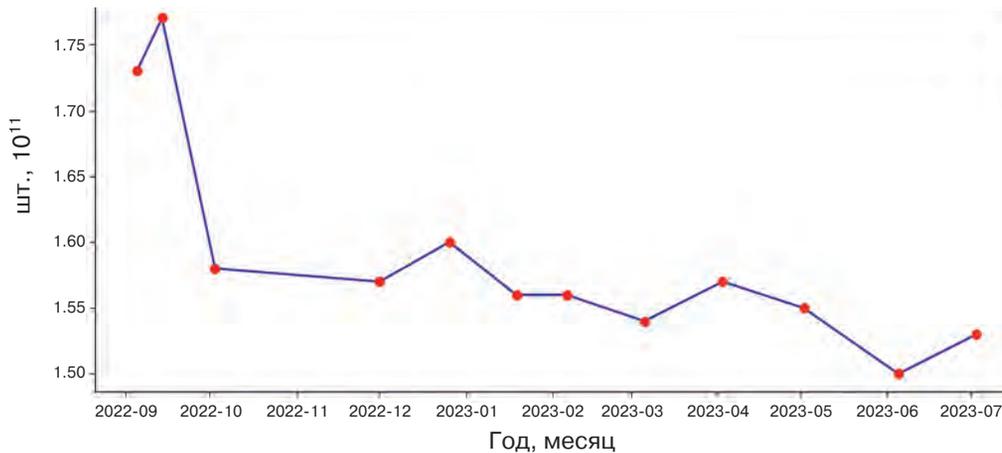


Рис. 7. Количество частиц в электронном пучке, измеренное с электронной пушки.

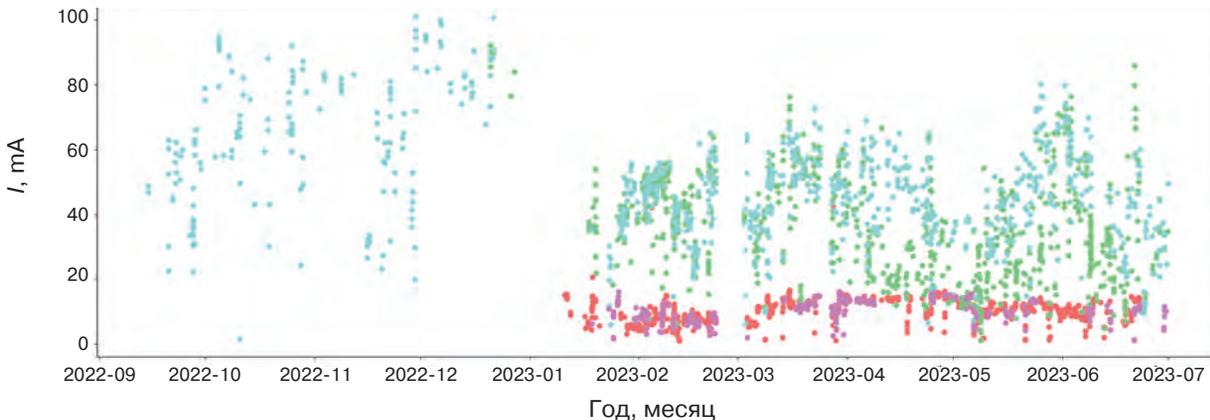


Рис. 8. Ток пучка, выпущенного из накопителя-охладителя в транспортный канал. Зеленый и бирюзовый цвета – электронные режимы, красный и пурпурный – позитронные.

ружилось, что поверхность анода в процессе эксплуатации покрывалась другими металлами, предполагается, что вследствие происшедших пробоев. Рисунок 9а наглядно демонстрирует это, рис. 9б – вид анода после чистки. С катодом же подобных неприятностей не произошло, но на всей его поверхности лежали медные опилки – сыпучие результаты напыления меди после пробоев, на прикатодном электроде образовалось медное напыление (рис. 10).

После устранения причин пробоев клистрон был собран и оттренирован. К моменту его выхода на режим линейный ускоритель вновь был перестроен, и комплекс начал работать на потребителей в полной мере.

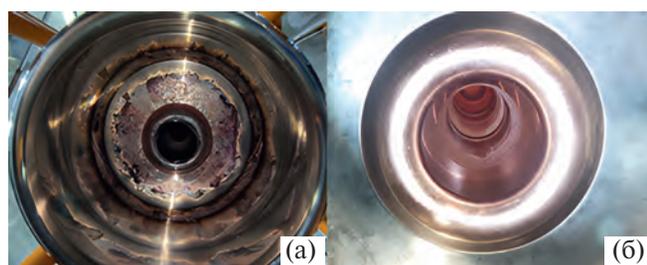


Рис. 9. Фото анода: а – после вскрытия клистрона, б – после чистки.

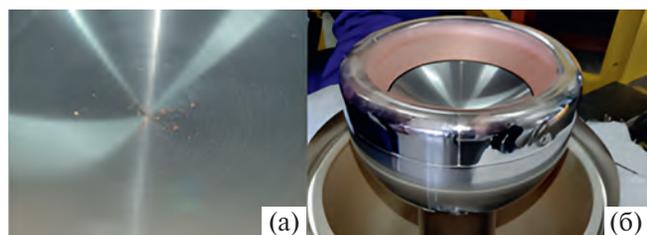


Рис. 10. а – Поверхность катода с медными опилками, б – медное напыление на прикатодном электроде.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инжекционный комплекс продолжает работу по обеспечению пучков заряженных частиц коллайдеров ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН. Несмотря на то, что комплекс полностью покрывает потребности обоих коллайдеров в позитронах и электронах, ведутся регулярные работы по улучшению стабильности работы комплекса и увеличению его производительности.

В текущем сезоне была изменена схема термостабилизации, что позволило значительно снизить колебания температуры охлаждающей воды до величины 1.2 °С, а колебания входной

температуры, охлаждающей секцию – до значения 0.2 °С.

Существенно была изменена схема вывода синхротронного излучения из поворотного магнита для последующей диагностики поперечных размеров пучка. Новая схема была рассчитана с использованием Zemax, а для внедрения отдельных ее компонент в систему управления инжекционного комплекса были разработаны соответствующие пользовательские программы и службы.

Также продолжается развитие программного обеспечения ИК, которое улучшает взаимодействие с потребителями пучка. Конфигурационная БД комплекса к настоящему времени дополнена и средствами автоматизации конфигурирования CXv4, значительно упростилась настройка СХ-серверов, которые служат для обмена данными как внутри системы управления ИК так и с потребителями пучка. В настоящий момент конфигурационная БД применяется и в качестве источника данных для прикладных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berkaev D., Andrianov A., Astrelina K. et al. // Proceedings of IPAC'17. Copenhagen, Denmark. 2017. <https://doi.org/10.1134/S1547477118070294>
2. Emanov F., Andrianov A., Astrelina K. et al. // Proceedings of RuPAC'16. St. Petersburg, Russia. 2016. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-WEXMH01>
3. Timoshenko M.V., Borin V.M., Zharinov Yu. M. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 419. <https://doi.org/10.1134/S1547477120040457>
4. Levicev E.B.. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. № 7. P. 876. <https://doi.org/10.1134/S1547477116070372>
5. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagko A.V. et al. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 19. <http://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005>
6. Подлевских В.В. Ускоряющая секция и СВЧ нагрузка для форинжектора ВЭПП-5. Дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2003.
7. Emanov F.A., Astrelina K.V., Balakin V.V. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20. № 4. P. 754. <https://doi.org/10.1134/S1547477123040258>
8. Optical Design Applications Zemax. <https://www.zemax.com/>
9. Топчиенко А.В. Разработка оптической системы установки для диагностики параметров пучков заряженных частиц: магистерская выпускная квалификационная работа. Новосибирск:

- Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2023. 62 с.
10. Open-source electronics platform Arduino: сайт.
<https://www.arduino.cc/>
 11. *Bolkhovityanov D., Cheblakov P., Emanov F.* // Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Melbourne, 2015. P. 915.
<https://doi.org/10.1134/S1547477120040123>
 12. *Bolkhovityanov D., Emanov F.* // Proceedings of RUPAC'18. Protvino, Russia. 2018. P. 417.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-THPSC07>
 13. Python bindings for uEye API pyueye.
<https://pypi.org/project/pyueye/>
 14. *Балакин В.* // Проблемы информатики. 2022. Т. 55. № 2. С. 27.
<https://doi.org/10.24412/2073-0667-2022-2-27-43>

УДК 621.384.6

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA¹

© 2025 г. М. И. Брызгунов^{a, b, *}, А. В. Бублей^a, А. Д. Гончаров^a, А. П. Денисов^a,
В. И. Кремнев^a, В. В. Пархомчук^a, В. М. Панасюк^a, А. В. Петрожицкий^a, В. Б. Рева^{a, b},
Н. С. Кремнев^a, С. В. Шиянков^a, А. А. Путьмаков^a, В. М. Константинов^a,
П. Е. Мураткозиев^a, В. Г. Ческидов^a, В. Я. Корчагин^a, С. П. Посполита^a, Л. С. Посполита^a,
В. А. Полухин^a, Г. И. Эрг^a, С. И. Рувинский^a, О. В. Беликов^a, В. А. Чекавинский^a,
Л. М. Щеголев^a, Д. Н. Скоробогатов^a, И. А. Гусев^a, Д. В. Сеньков^{a, b}, Д. Н. Пурескин^a,
К. М. Горчаков^{a, b}, Р. В. Вахрушев^a, А. М. Батраков^a, К. С. Штро^a, А. В. Павленко^a,
М. Н. Кондауров^a, Г. В. Карпов^a, М. Г. Федотов^{a, b}, Е. А. Бехтенов^a, А. В. Иванов^a,
А. А. Жариков^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: *M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 02.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

В ИЯФ СО РАН продолжается создание высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA, необходимой для достижения проектной светимости комплекса в ион-ионных столкновениях. Система состоит из двух независимых охладителей для энергии электронов до 2.5 МэВ и током до 1 А, которые одновременно охлаждают два встречных ионных пучка. Описывается состояние дел в реализации данной системы и приведены результаты разработки и испытаний части элементов и подсистем охладителей.

DOI: 10.31857/S0032816225070024

1. ВВЕДЕНИЕ

Система электронного охлаждения для коллайдера NICA состоит из двух практически независимых охладителей для независимого охлаждения обоих ионных пучков (рис. 1). Каждый охладитель имеет свою высоковольтную систему (размещенную в баке с элегазом), транспортные каналы и секцию охлаждения [1]. При конструировании охладителей за основу была взята конструкция высоковольтной системы электронного охлаждения для синхротрона COSY

(г. Юлих, Германия), разработанная в ИЯФ ранее [2].

Высоковольтные системы охладителей отвечают за генерацию электронного пучка, ускорение его до рабочей энергии, а после взаимодействия с ионным пучком – за торможение и поглощения его в специальном электронном коллекторе. Каждая высоковольтная система состоит из колонны, отвечающей за создания основного ускоряющего напряжения (до 2.5 МВ) и высоковольтного терминала сверху. Высоковольтная колонна состоит из идентичных сек-

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

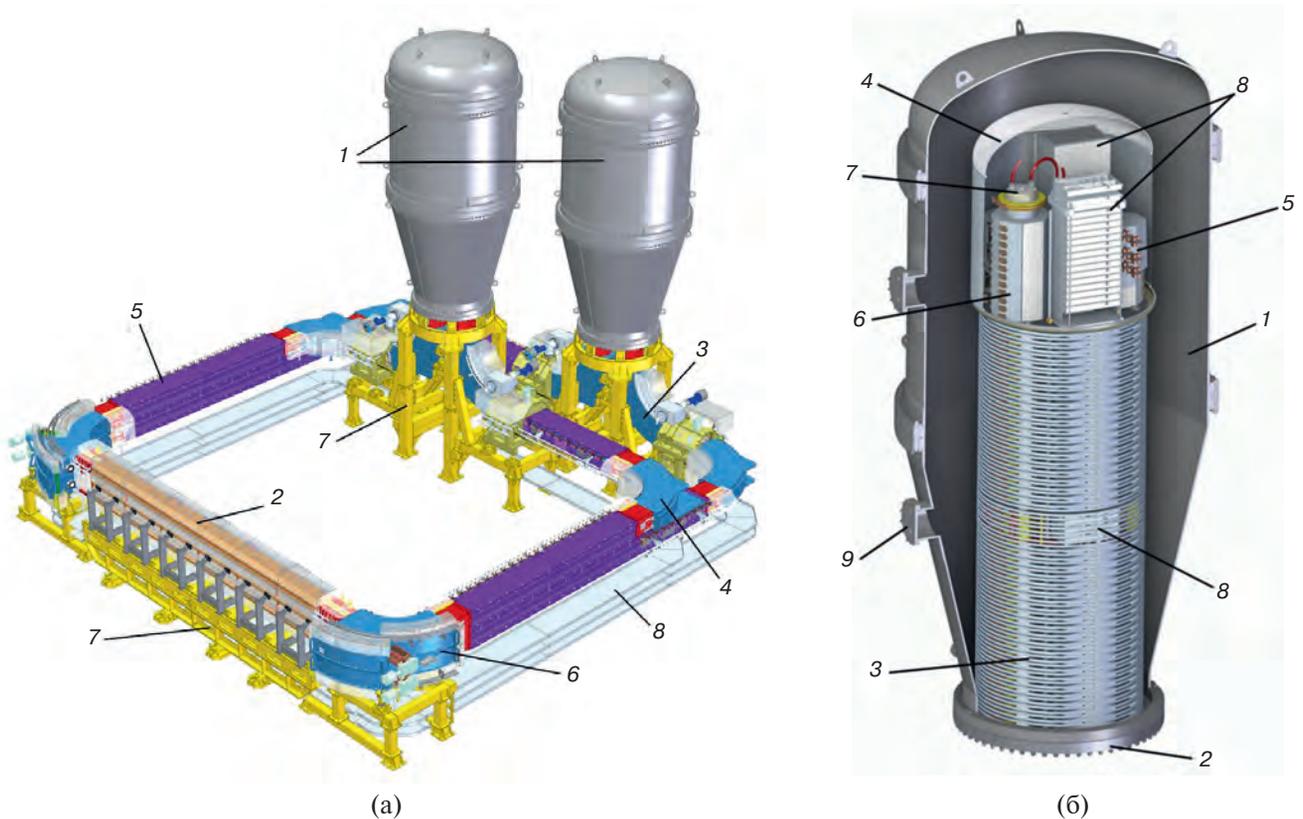


Рис. 1. а – Трехмерная модель СЭО коллайдера NICA: 1 – баки высоковольтной системы, 2 – секция охлаждения, 3 – вертикальный поворотный соленоид, 4 – горизонтальный поворотный соленоид, 5 – прямолинейная секция, 6 – тороидальная секция, 7 – подставка, 8 – кабельный канал. б – Высоковольтная система: 1 – бак с элегазом, 2 – нижний фланец бака, 3 – высоковольтная колонна, 4 – высоковольтный терминал, 5 – соленоид электронной пушки, 6 – соленоид электронного коллектора, 7 – коллектор, 8 – промежуточная секция, 9 – боковой фланец.

ций, содержащих высоковольтные источники на полное напряжение до 60 кВ, две катушки магнитного поля для ускоряющей и тормозящей электростатических трубок и электронику для управления источниками. В центре колонны размещена специальная промежуточная секция, которая установлена для удобства сборки. Данная секция не имеет высоковольтных источников, но в ней есть пикапы для удобства проводки пучка в ускоряющих трубках и дополнительная вакуумная откачка для обеспечения высокого вакуума в трубках и в области катода пушки.

Высоковольтный терминал содержит пушку, коллектор и электронику для управления ими. В охладителях, разработанных в ИЯФ СО РАН, ранее применялась электронная пушка с катодом диаметром 3 см [3]. Такой размер катода (и, соответственно, пучка) оправдан для охладителей на низкую энергию. Однако в коллайдере NICA размеры ионных пучков за счет ускорения гораздо меньше, поэтому было решено разработать пушку с диаметром катода 1 см [4]. К преимуществам такой пушки можно отнести

более простую проводку пучка через систему. Кроме того, меньший размер пучка означает большую плотность тока при том же токе пучка, что позволит увеличить силу трения, не меняя источники питания.

Разработка такой сложной системы подразумевает проектирование и изготовление большого числа различных элементов и подсистем, которые нужно испытать и при необходимости измерить. Результатам разработки и испытаний части элементов и подсистем охладителей посвящена данная статья.

2. ПОУЗЛОВАЯ СБОРКА ТРАНСПОРТНЫХ КАНАЛОВ

Сборка и запуск столь большой системы подразумевает выделение для этих нужд достаточно большого радиационно-защищенного помещения со всеми инженерными коммуникациями, что связано с серьезными трудностями. Поэтому было решено, что полная сборка системы будет проводиться только в ОИЯИ

непосредственно на своем штатном месте в коллайдере. Однако в ИЯФ планируется провести поузловую сборку всех элементов системы.

На рис. 2 показана сборка элементов под высоковольтным баком нижнего охладителя. Здесь можно увидеть подставку под бак, два вертикальных 90-градусных поворотных соленоида (синие) со стоящими сверху согласующими секциями (красные вверху), один горизонтальный 90-градусный поворотный соленоид, короткий соленоид типа Insert (красный внизу) и два соленоида большого диаметра Line-08 (желтые горизонтальные соленоиды), необходимых для размещения в них элементов вакуумной откачки, датчиков положения пучка (пикапов) и для сборки вакуумной камеры.

Такая же поузловая сборка проводилась для элементов верхнего охладителя под высоковольтным баком. После проверки обе сборки были разобраны, упакованы и перевезены в ОИЯИ.

На рис. 3 показаны сборки элементов других частей транспортного канала (участки с горизонтальными 90-градусными поворотами слева и справа от высоковольтных баков на рис. 1а). В данном случае сборки имеют два уровня, т.е. содержат в себе элементы обоих охладителей, однако по конструкции они установлены на одной опоре для экономии места.

3. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Поступающие из производства магнитные элементы охладителя проходят тепловые испытания на полную номинальную мощность и магнитные измерения [5]. Для магнитных измерений транспортных каналов используется трехкомпонентный датчик Холла (микросхема MV2 от компании Metrolab). Данный датчик устанавливается на специальную каретку, которая двигается внутри немагнитной направляющей, помещаемой внутрь элемента. Рельса изготовлена по модульной схеме и собирается под конкретную задачу из набора простых элементов: прямые разной длины, 90-градусные изогнутые направляющие (радиус траектории датчика 100 см) и 45-градусные изогнутые рельсы (с таким же радиусом).

В рамках испытаний, в частности, были завершены измерения всех восьми 90-градусных поворотных соленоидов (четыре горизонтальных и четырех вертикальных). На рис. 4 показан один из вертикальных поворотных магнитов в процессе измерений. Для первого магнита проводились полномасштабные измерения, в ходе которых проверялось распределение поля с присоединенными соседними элементами, влияние соседних элементов на поле в повороте,



Рис. 2. Частичная сборка транспортного канала нижнего охладителя (элементы под высоковольтным баком).

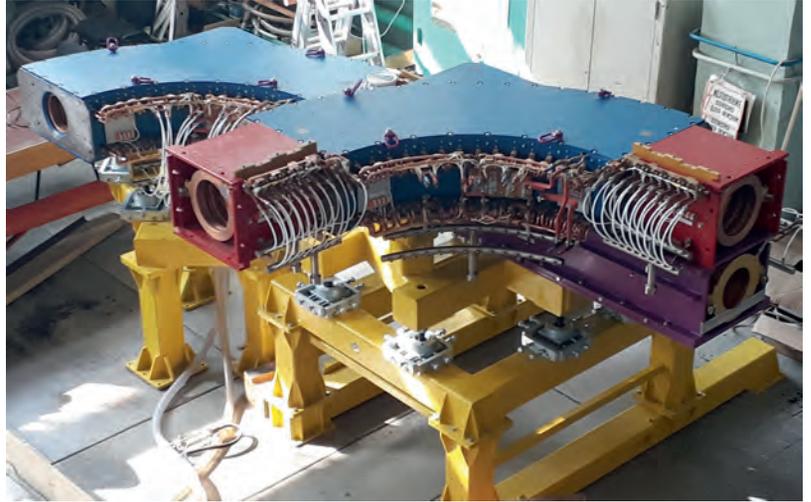


Рис. 3. Сборки участков транспортных каналов с горизонтальными поворотами.

градиенты ведущего и поворотного полей (определялись специальным датчиком, содержащим 12 независимых датчиков Холла). Данные подробные измерения позволили сравнить измерения с расчетами с целью определения ошибок моделирования и конструирования.

Последующие испытания магнитов такого типа проводились для отдельных магнитов без соседних элементов с измерением полей только на оси системы. Такие измерения позволили определять ошибки изготовления каждого конкретного элемента. В подробных измерениях нет необходимости, так как все восемь элементов однотипны с магнитной точки зрения, и сравнения поля на оси с измерениями первого элемента достаточно для выявления ошибок.

На рис. 5 показаны результаты измерений продольного и поворотного магнитных полей для всех восьми элементов после исправления всех ошибок. Видно, что все восемь графиков ложатся практически в одну кривую. Небольшие различия в амплитуде можно объяснить тем, что

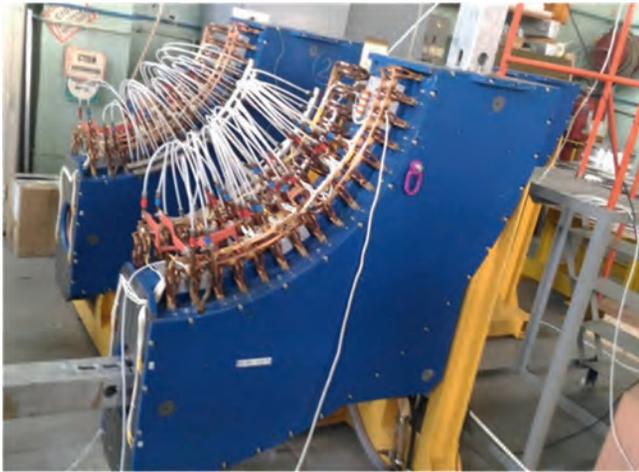


Рис. 4. Система магнитных измерений в вертикальном поворотном магните.

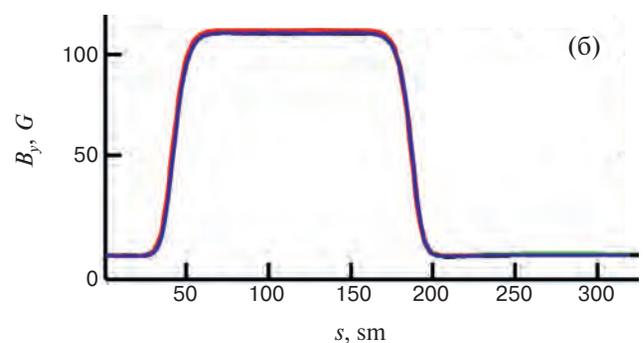
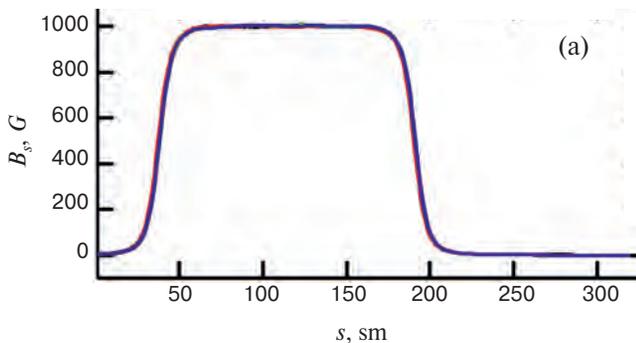


Рис. 5. Результаты измерений продольного (а) и поворотного (б) полей во всех восьми 90-градусных соленоидах.

параллельно с магнитами проходили испытания их источников питания. Поэтому разные измерения могли проводиться с разными источниками питания, в результате чего реальные значения тока в разных измерениях могли немного различаться.

Помимо 90-градусных соленоидов, также проведены испытания многих других уже изготовленных элементов, таких как соленоиды Line-08, Match и InsMatch, Line-20, корректоры EDIP и т.д.

4. КАСКАДНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

При проектировании систем электронного охлаждения, как и при проектировании многих электростатических ускорителей, стоит задача передачи мощности оборудованию, находящемуся под высоким напряжением. Для систем электронного охлаждения на низкую энергию эта задача часто решается при помощи развязывающего трансформатора, обеспечивающего изоляцию на большое напряжение между первичной и вторичной обмотками. Однако для высоковольтных систем такой способ не подходит и приходится использовать другие методы. В системе электронного охлаждения для коллайдера NICA используется метод, опробованный на охладителе COSY – каскадный трансформатор [6]. Такой метод позволяет передавать мощность в десятки киловатт под потенциал в несколько МВ. В основе такого метода лежит использование серии развязывающих трансформаторов на 60 кВ, соединенных последовательно так, чтобы вторичная обмотка одного соединялась с первичной обмоткой следующего. При этом на каждом каскаде можно сделать отдельную небольшую обмотку, которая будет питать электронику в каждой секции ускорителя. В отличие от трансформатора COSY, в охладителе NICA было решено разбить трансформатор на две половины, которые соединяются в промежуточной секции в центре высоковольтной колонны. Такое решение позволило сократить длину одного модуля, что упрощает его сборку и транспортировку. Поскольку в каждом охладителе стоят по два трансформатора, состоящие из двух модулей, то на всю систему необходимо восемь модулей. На электронику каждой секции требуется только одна обмотка отбора мощности, выведенная от одного из двух трансформаторов в колонне. Поскольку намотка и вывод

этих обмоток наружу является достаточно кропотливой работой, то было решено делать модули двух типов (с обмотками и без них). На рис. 6 показана фотография одного модуля с обмотками отбора мощности.

На данный момент изготовлены и испытаны все восемь модулей, необходимых для системы. На рис. 7 показаны результаты измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) между входом и выходом трансформатора и коэффициента передачи напряжения от входа до каждой секции на резонансной частоте.

На графиках АЧХ видно, что семь кривых практически совпадают, т.е. резонансные частоты и коэффициенты передачи у этих транс-

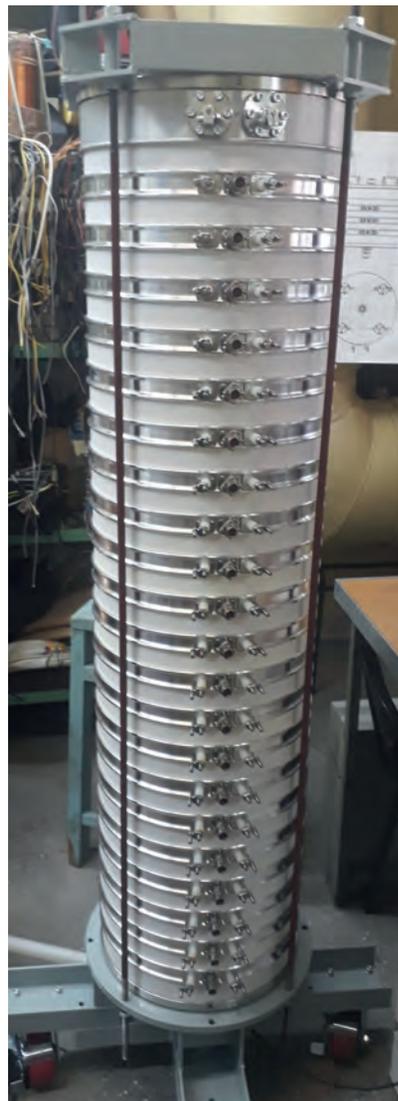


Рис. 6. Модуль каскадного трансформатора с обмотками отбора мощности.

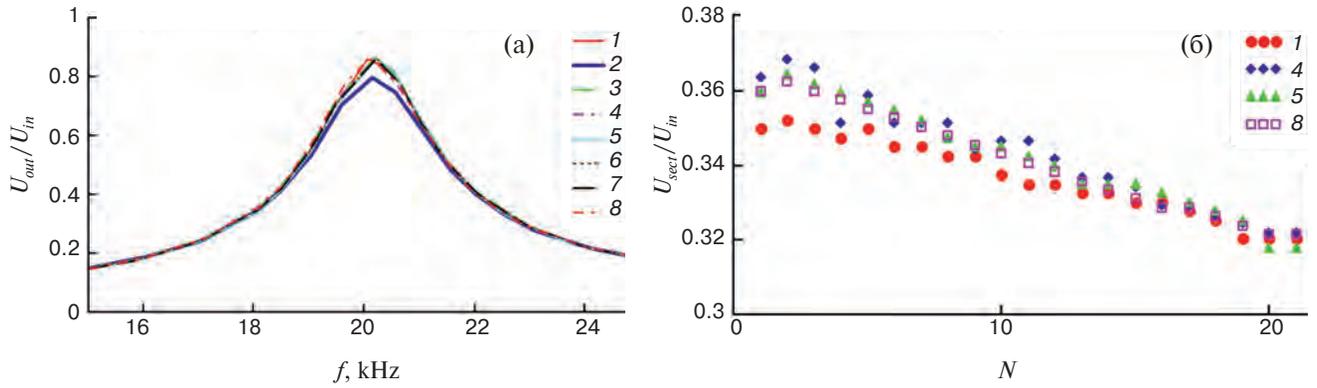


Рис. 7. АЧХ для всех восьми модулей каскадного трансформатора (а) и коэффициент передачи по напряжению в секции на резонансной частоте (б).

форматоров очень близки. Выпадает из общей массы только трансформатор № 2, у которого резонансная частота близка к остальным, однако коэффициент передачи на 5–10% ниже. Для графика измерения коэффициента передачи на разные секции так же видно, что значения для трансформатора № 1 лежат ниже остальных. Причем, исходя из того, что на графике АЧХ его кривая не выделяется на фоне других, можно утверждать, что причина более низких коэффициентов передачи по секциям не связана с проблемами в основных обмотках или с в сердечниках из аморфного железа. В настоящее время идет исследование причин особенностей этих двух трансформаторов.

5. ПЛОЩАДКА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Для работ с высоковольтными системами охладителей необходимо иметь возможность разместить человека с оборудованием около высоковольтных колон на высоте нескольких метров. Причем высота может варьироваться в зависимости от высоты того места в системе, к которому требуется доступ. Для этого на охладителе COSY была изготовлена специальная двухъярусная площадка обслуживания, которая устанавливалась на постоянной основе и полностью окружала высоковольтную систему. Высоковольтный бак имеет гораздо больший диаметр чем высоковольтная колонна, поэтому для его

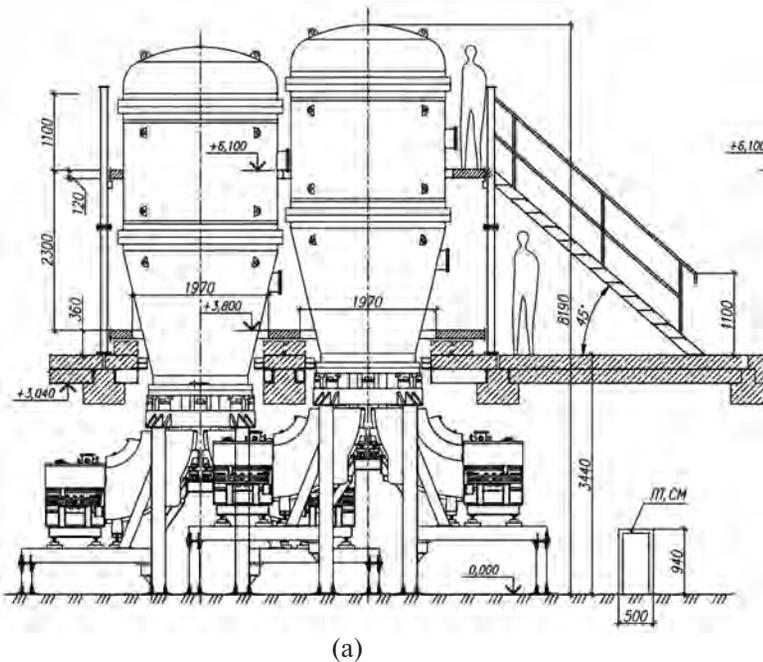


Рис. 8. Площадка обслуживания для высоковольтной системы: а – чертеж с установленными баками, б – фотография площадки в процессе изготовления перед покраской.

установки площадка обслуживания частично разбиралась, т.е. вынимался специальный вкладыш на втором ярусе, освобождавший место под бак. Такой подход со стационарной площадкой оказался очень удобным для сборки, ремонта и обслуживания высоковольтной системы. Все операции с баком и с высоковольтной системой удобно проводить с этой площадки, а работать на высоте в несколько метров на стационарной площадке гораздо удобнее, чем, например, на стремянке. Поэтому для охладителя NICA было решено разработать такую же стационарную площадку обслуживания, окружающую оба бака.

На рис. 8 (слева) показана схема площадки охладителя NICA и баки внутри нее. Сама площадка установлена на плиты радиационной защиты. На случай, если на момент сборки охладителей плиты еще не будут установлены, для площадки обслуживания предусмотрены дополнительные съемные опоры, которые устанавливаются на пол и поднимают всю конструкцию до высоты плит. На рис. 8 (справа) показана фотография площадки во время изготовления перед этапом покраски.

После изготовления площадка обслуживания была разобрана, упакована в специальную тару и перевезена в ОИЯИ.

6. МАСЛЯНАЯ СИСТЕМА

В процессе работы оборудование высоковольтной системы выделяет достаточно большое количество тепла, которое необходимо выводить из бака. Для этого разрабатываются специальные масляные системы, обеспечивающие съем тепла при помощи трансформаторного масла. Всего изготавливаются две идентичные системы (по одной на каждый охладитель), каждая из которых содержит по пять контуров, отвечающих за охлаждение двух каскадных трансформаторов, электроники и магнитной системы высоковольтной колонны, элементов высоковольтного терминала и коллектора электронов. Каждый контур может независимо регулироваться для обеспечения необходимого протока масла.

На рис. 9 показаны две масляные системы в процессе изготовления. На данный момент одна система полностью собрана и проходит гидравлические испытания. Вторая система находится на этапе сборки.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН продолжается разработка высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA. Проводятся



Рис. 9. Фотография масляных систем в процессе изготовления.

испытания и измерения магнитных элементов системы. В частности, завершены испытания всех восьми 90-градусных поворотных магнитов. Выявленные при испытаниях недостатки были оперативно исправлены. Для высоковольтной системы изготовлены и испытаны все восемь модулей каскадного трансформатора. Сравнение их характеристик показывает хорошую повторяемость за исключением некоторых особенностей. Завершено или находится на этапе испытаний производство различных подсистем охладителей. Например, площадок обслуживания высоковольтных систем и масляных систем охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брызгунов М.И., Бублей А.В., Денисов А.П., Гончаров А.Д., Пархомчук В.В., Панасюк В.М., Рева В.Б., Кремнев Н.С., Путьмаков А.А., Беликов О.В., Горчаков К.М., Скоробогатов Д.Н., Чекавинский В.А., Бехтенов Е.А., Жарииков А.А. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 4(229). С. 39.
2. Reva V., Alinovskiy N., Bedareva T., Bekhtenev E., Belikov O., Bocharov V., Borodich V., Bryzgunov M., Bublei A., Chekavinskiy V., Cheskidov V., Dietrich J., Dovzhenko B., Erokhin A., Fedotov M. et al. // Proc. of IPAC, Dresden, Germany. 2014. P. 777.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-MO-PRI075>
3. Bublei A., Goncharov A., Ivanov A., Konstantinov E., Konstantinov S., Kryuchkov A., Panasyuk V., Parkhomchuk V., Reva V., Skarbo B., Smirnov B., Sukhina B., Tiunov M., Zakhvatkin M., Yang X. et al. // Proc. of EPAC-02. 2002. P. 1356.
4. Денисов А.П., Брызгунов М.И., Иванов А.В., Пархомчук В.В., Путьмаков А.А., Рева В.Б. // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16. № 6(225). С. 666.
5. Рева В.Б., Батраков А.М., Брызгунов М.И., Бублей А.В., Вахрушев Р.В., Горчаков К.М., Гостеев В.К., Денисов А.П., Кондауров М.Н., Константинов В.М., Корчагин В.Я., Кремнев Н.С., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Посполита С.П. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 4(249). С. 957.
6. Брызгунов М.И., Гончаров А.Д., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Рева В.Б., Скоробогатов Д.Н. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 14.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215020160>

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ DARIA¹

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

* e-mail: kulevoy@itep.ru

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

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

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

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

DOI: 10.31857/S0032816225070038

1. ВВЕДЕНИЕ

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

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

Оба рассмотренных метода генерации нейтронных пучков требуют колоссальных финан-

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

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

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

С практической точки зрения КИН характеризуется следующими основными чертами.

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

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

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

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

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

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

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

2. СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЯ

2.1. Общая компоновка ускорителя

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

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

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

Таблица 1. Параметры ускоряющего канала для КИН DARIA

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

2.2. Ионный источник на основе плазмы ЭЦР-разряда

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

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

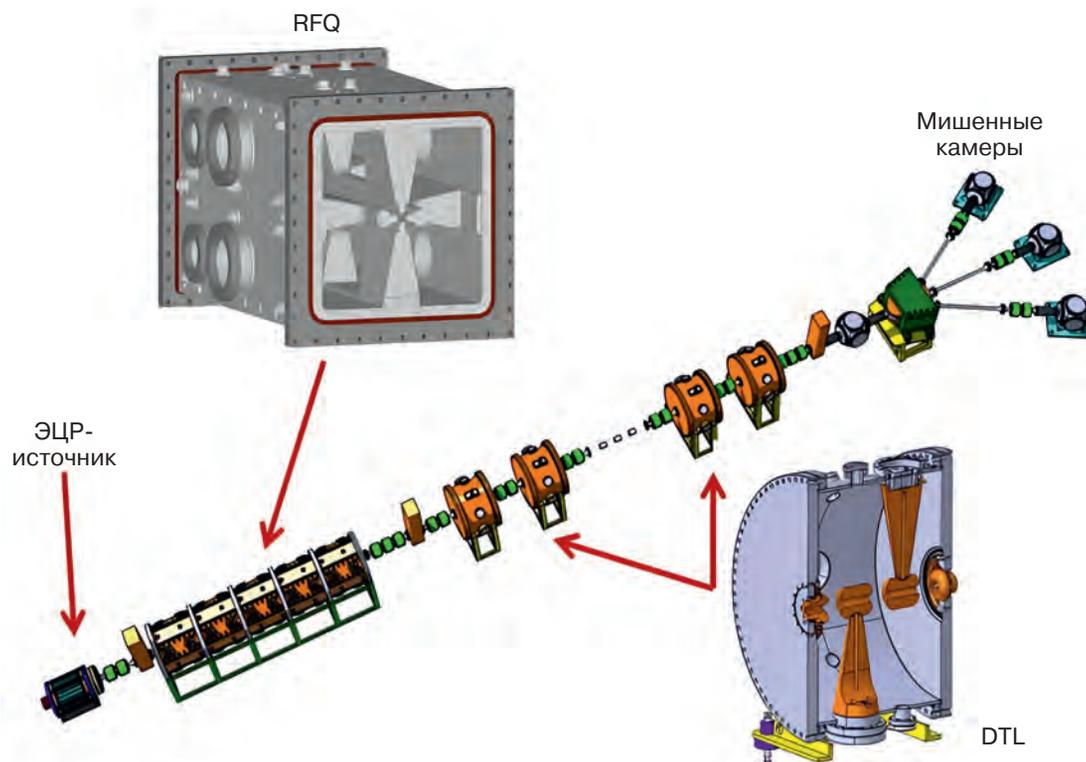


Рис. 1. Структура ускорителя для КИН DARIA.

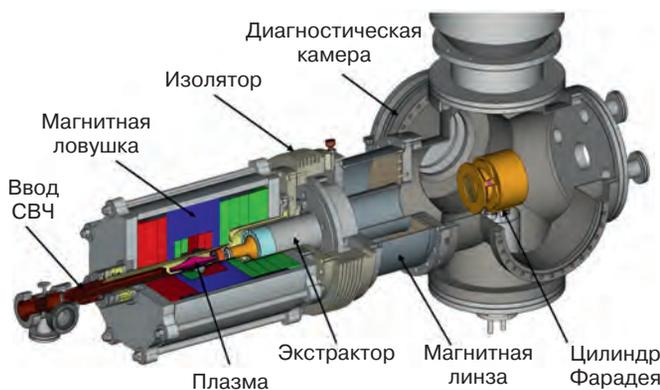


Рис. 2. Конструкция ионного ЭЦР-источника для проекта DARIA.

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

2.3. Ускоряющий канал

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

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

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

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

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

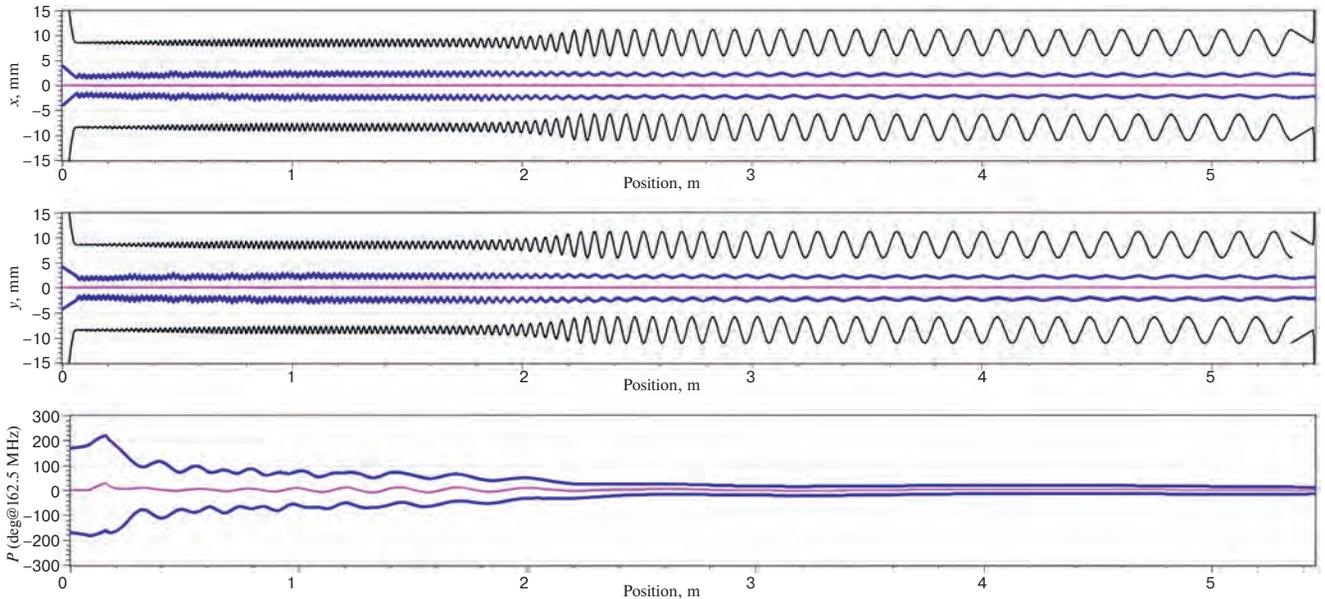


Рис. 3. Результат моделирования динамики пучка в канале RFQ.

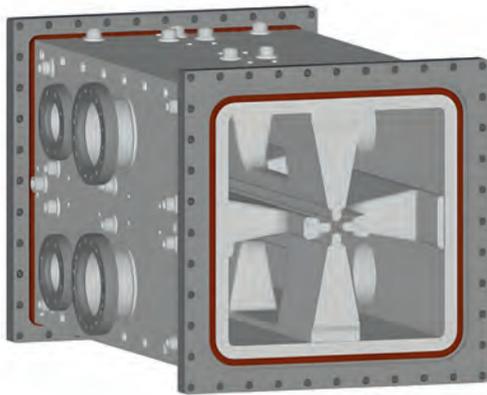


Рис. 4. Секция резонатора RFQ со смещенными окнами связи.

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

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

Таблица 3. Основные параметры DTL

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

Таблица 2. Параметры ускоряющей структуры RFQ

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

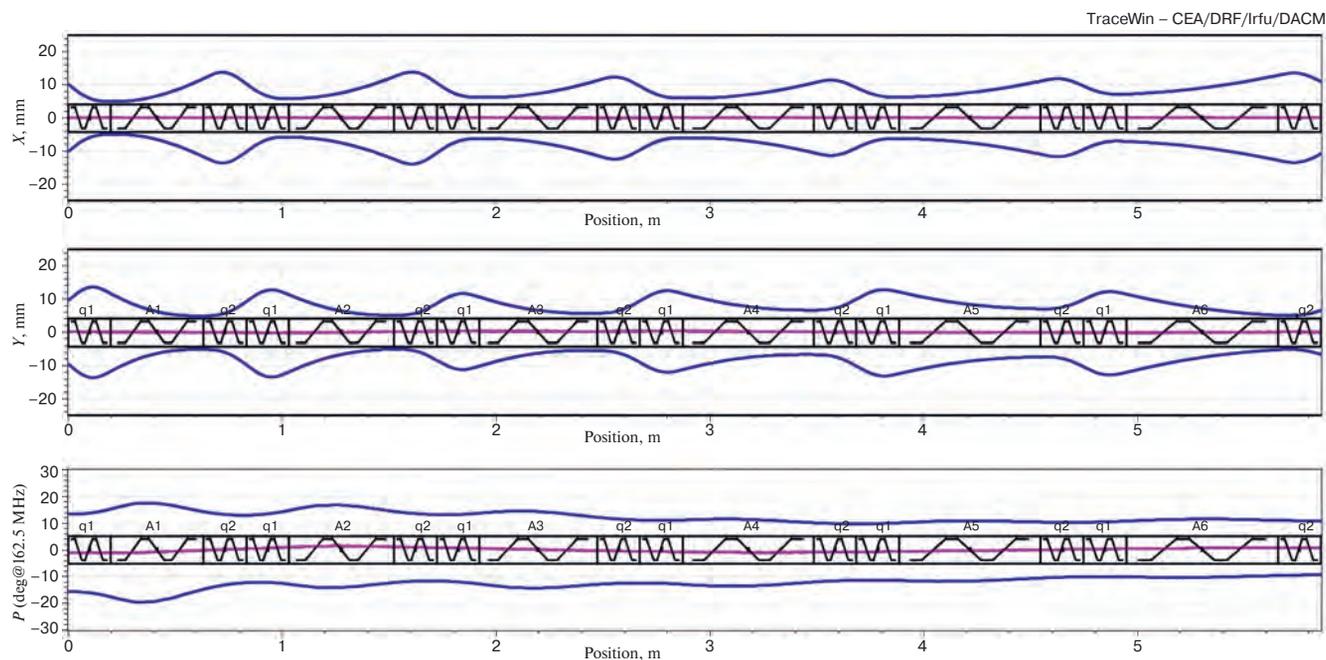


Рис. 5. Огибающие пучка в канале DTL КИН DARIA.



Рис. 6. Схема резонатора DTL.

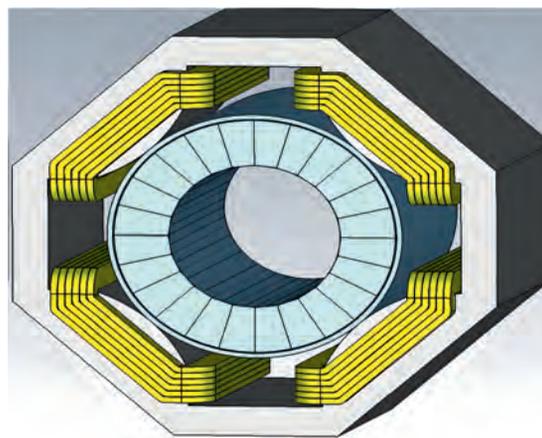


Рис. 7. Модель гибридной линзы с постоянным электромагнитом.

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

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

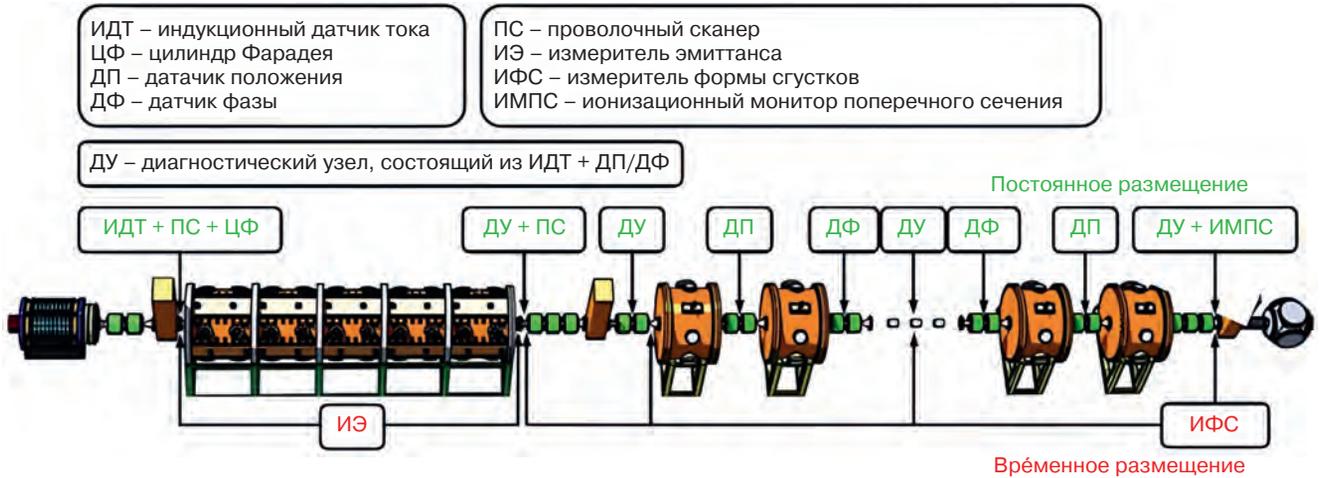


Рис. 8. Схема системы диагностики.

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

Таблица 4. Основные параметры гибридной квадрупольной линзы

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

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

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

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

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

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

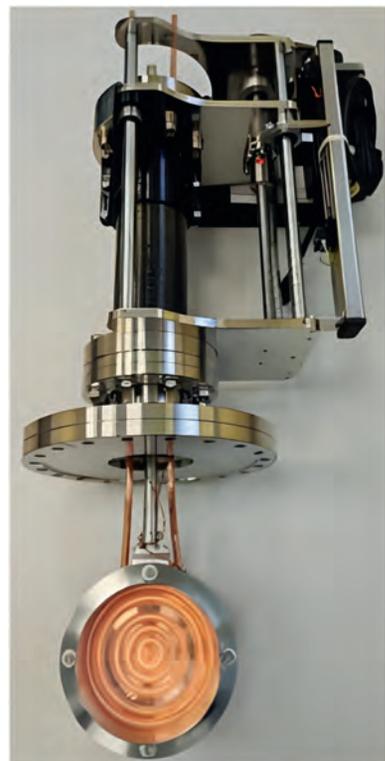


Рис. 9. Цилиндр Фарадея.

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

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

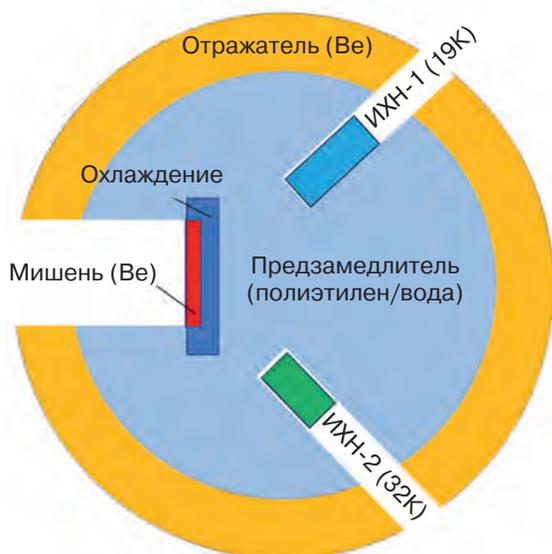


Рис. 10. Схема мишенной сборки КИН.

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

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

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

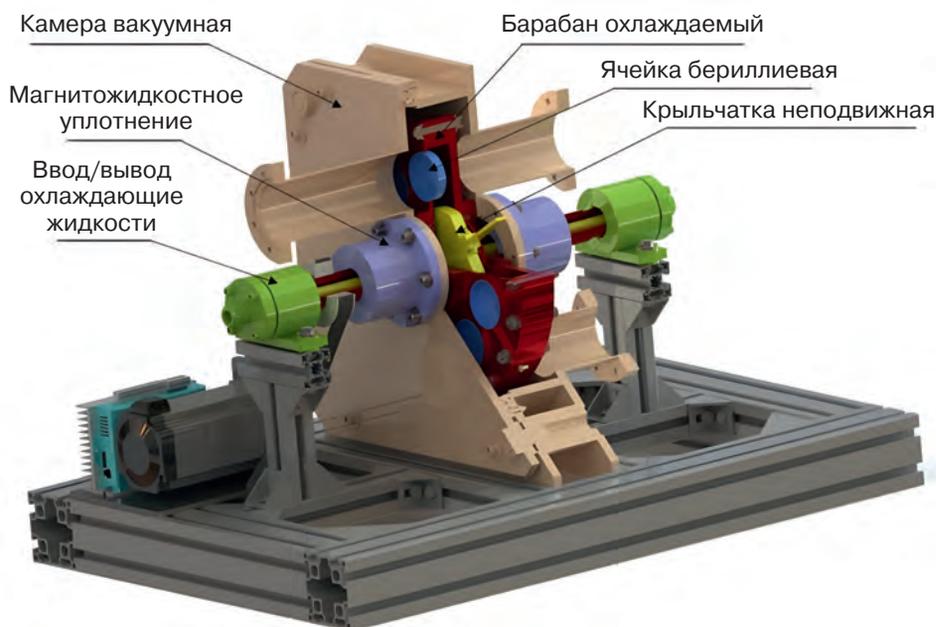


Рис. 11. Мишенная сборка КИН DARIA.

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

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

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

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

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

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

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

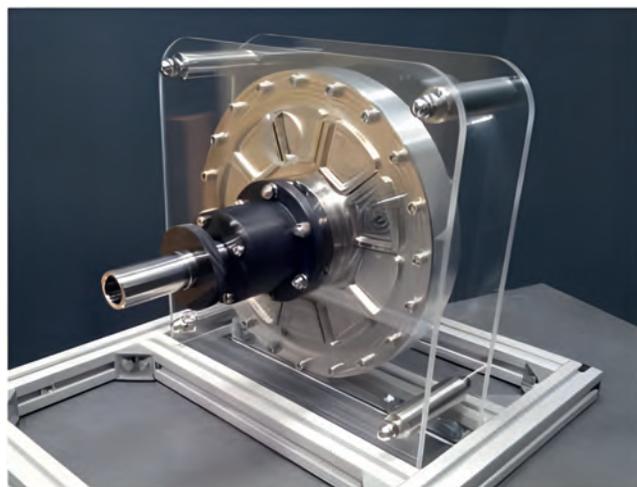


Рис. 12. Прототип мишенной сборки.

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

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

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

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

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



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

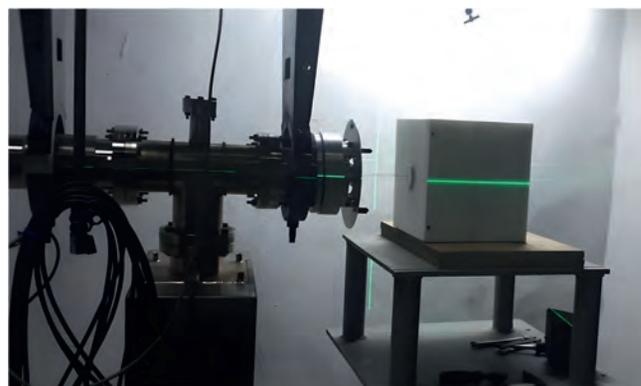


Рис. 14. Установка бериллиевой мишени и полиэтиленового замедлителя на выходе протонного линейного ускорителя И2.

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

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

УДК 537.533.7

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ИСТОЧНИКАХ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹

© 2025 г. О. И. Мешков^{a, b, *}, В. Л. Дорохов^{a, c}, Д. Ф. Решетов^a, А. И. Стирин^d

^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

^c 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

^d Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: O.I.Meshkov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.
После доработки 06.03.2024 г.
Принята к публикации 01.04.2024 г.

Анализируются результаты измерений поперечных размеров и координат центра тяжести пучка электронов накопителя курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ), полученные во время инъекции и при работе на пользователей. Анализировалось изображение пучка, зарегистрированное в оптическом диапазоне длин волн при помощи цифровой камеры на станции оптического наблюдения накопителя КИСИ. Проведен поиск возможных источников поперечной нестабильности пучка во время работы установки на пользователей.

DOI: 10.31857/S0032816225070047

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние и ближайшие десятилетия в центре внимания развития ускорительной физики находятся проекты линейных и циклических коллайдеров для экспериментов по физике высоких энергий (ILC, CLIC, FCC) и источники синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения (Euro-XFEL, LCLS, Spring 8-FEL, СКИФ) [1, 2]. На всех континентах планеты, кроме Африки и Антарктиды, действует несколько десятков источников СИ, относящихся к разным поколениям установок, от второго до четвертого.

Эмиттанс пучка в ускорителе, а следовательно, и его поперечные размеры существенно уменьшаются от одного поколения источни-

ков СИ к другому. Вместе с тем, в состав каждого источника СИ неизбежно входит инжекционный комплекс, содержащий, как правило, бустерный накопитель, в котором пучок имеет существенно больший эмиттанс по сравнению с главным кольцом.

Требования к пространственной стабильности пучка в главном накопителе предельно высоки: речь идет о долях микрометра и десятках микрорадиан [3]. При этом и требования к надежности работы источника СИ также весьма суровы: потребители хотят иметь возможность использовать излучение не менее 95% календарного времени в течение года. В связи с этим развитие методов диагностики пучка, нацеленных на выявление и предотвращение возможных источников пучковых неустойчи-

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

ностей, а также неисправностей разнообразных силовых систем установки представляется актуальным.

2. КУРЧАТОВСКИЙ ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ускорительный комплекс “КИСИ-Курчатов” состоит из линейного ускорителя и двух накопительных колец: бустера “Сибирь-1” и основного кольца “Сибирь-2”, относящегося к источникам СИ поколения 2+ [4, 5]. Основные параметры кольца накопителя “Сибирь-2” приведены в табл. 1. В стандартном режиме эксперимента ускоритель работает при энергии 2.5 ГэВ, а накопление осуществляется при энергии инжекции, равной примерно 450 МэВ. Станции пользователей получают СИ из поворотных магнитов и вставных устройств, вигглеров и ондулятора. Установка работает практически в безостановочном режиме, при этом в неделю проводится девять 12-часовых смен. Для обеспечения такого режима работы установки необходимо иметь возможность наблюдения за состоянием пучка.

На накопителе “Сибирь-2” действует 14 станций пользователей синхротронного излучения [6]. Научная аппаратура, работающая на станциях, постоянно совершенствуется, и точность экспериментальных исследований растет. Этот процесс сопровождается ростом требований пользователей к качеству пучка СИ и связанному с ним качеству электронного пучка, т.е. стабильности его свойств. Удовлетворять растущие потребности пользователей становится все сложнее, так как главный накопитель имеет эмиттанс $98 \text{ нм} \cdot \text{рад}$, а также ограниченный набор средств диагностики и стабилизации орбиты пучка.

3. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Для контроля орбиты пучка в накопителе используется система пикап-электродов, поперечные и продольный размеры пучка контролируются на отдельной станции оптического наблюдения [7]. Изображение пучка, регистрируемое цифровой камерой с использованием оптической части спектра СИ из поворотного магнита суперпериода “Сибирь-2”, постоянно присутствует на мониторе в главной пультовой ускорителя (рис. 1). Изображение строится на матрице камеры с помощью проекционной оптики, при этом необходимо отметить, что вертикальный размер пучка в точке наблюдения близок к дифракционному пределу ($\sigma_y \approx 50 \text{ мкм}$).

Стабилизация орбиты пучка в точках вывода СИ в накопителе осуществляется с помощью троек дипольных корректоров [4, 5]. На станции оптического наблюдения такая система стабилизации орбиты отсутствует, что позволяет отслеживать перемещения пучка, связанные с воздействием разнообразных факторов, как по радиусу, так и по вертикали, а также контролировать поперечные размеры пучка на протяжении длительных промежутков времени. В связи с жалобами пользователей СИ на эпизодически возникающие кратковременные смещения пучка, мешающие проведению прецизионных экспериментов, нами был проведен цикл измерений по изучению стабильности координат центра тяжести пучка и его поперечных размеров.

Изучение стабильности параметров пучка проводилось на станции оптического наблюдения. В первом цикле экспериментов нами были измерены амплитуды колебаний оптического

Таблица 1. Параметры накопителя “Сибирь-2” ускорительного комплекса “КИСИ-Курчатов” и характеристики электронного пучка в точке излучения, используемой для системы оптической диагностики

Параметр	Значение
Энергия E , ГэВ	0.45–2.5
Частота ускоряющего ВЧ-напряжения ν_{RF} , МГц	181.14
Периметр C , м	124.13
Время жизни ($E = 2.5 \text{ ГэВ}$), ч	10–25
Частота обращения, МГц	2.415
Размеры сгустка ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), мм ($E = 2.5 \text{ ГэВ}, I_b = 1 \text{ мА}$)	0.059, 0.45, 20
Длительность сгустка, нс (на полувысоте, $E = 2.5 \text{ ГэВ}, I_b = 1 \text{ мА}$)	0.16
Число электронов в одном сгустке при токе $I_b = 1 \text{ мА}$	$2.6 \cdot 10^9$
Максимальный ток электронов, мА:	
— в односгустковом режиме	100
— в многосгустковом режиме	300

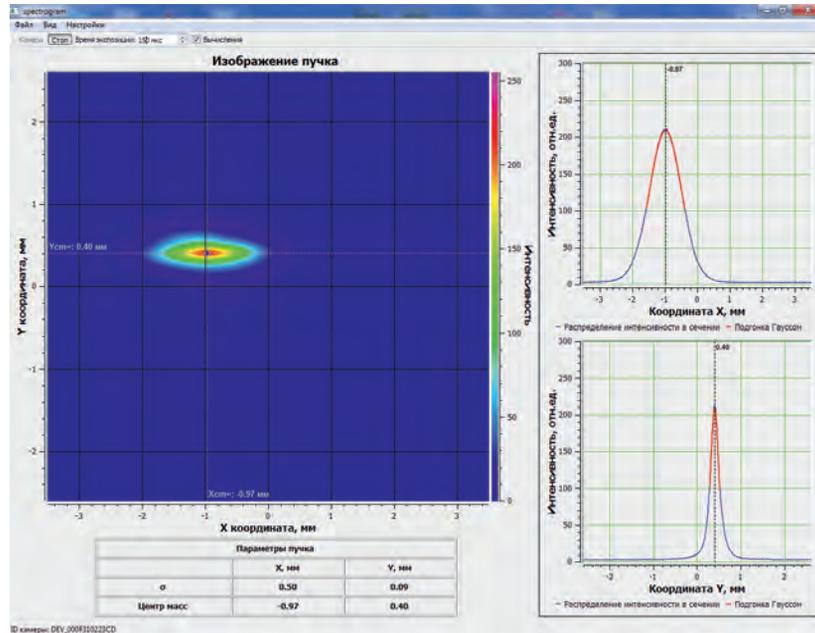


Рис. 1. Окно программы регистрации изображения пучка цифровой ПЗС-камеры.

стола, на котором расположены фотодетекторы станции оптического наблюдения, и амплитуды колебаний центра тяжести пучка с характерными частотами в диапазоне единиц–сотен герц [8], рис. 2.

Спектр вертикальных колебаний пучка содержит отчетливый пик на частоте 50 Гц, в спектре горизонтальных колебаний никаких особенностей обнаружено не было. С точки зрения поль-

зователей, регулярные колебания пучка с частотами в десятки герц увеличивают поперечный размер пучка, но не приводят к сбоям в юстировке аппаратуры, так как для проводимых на станциях КИСИ экспериментов временное разрешение не требуется. Вместе с тем в спектрах прослеживались и гармоники с частотами менее 1 Гц, природу которых хотелось бы прояснить, так как именно такие колебания заметно влияют

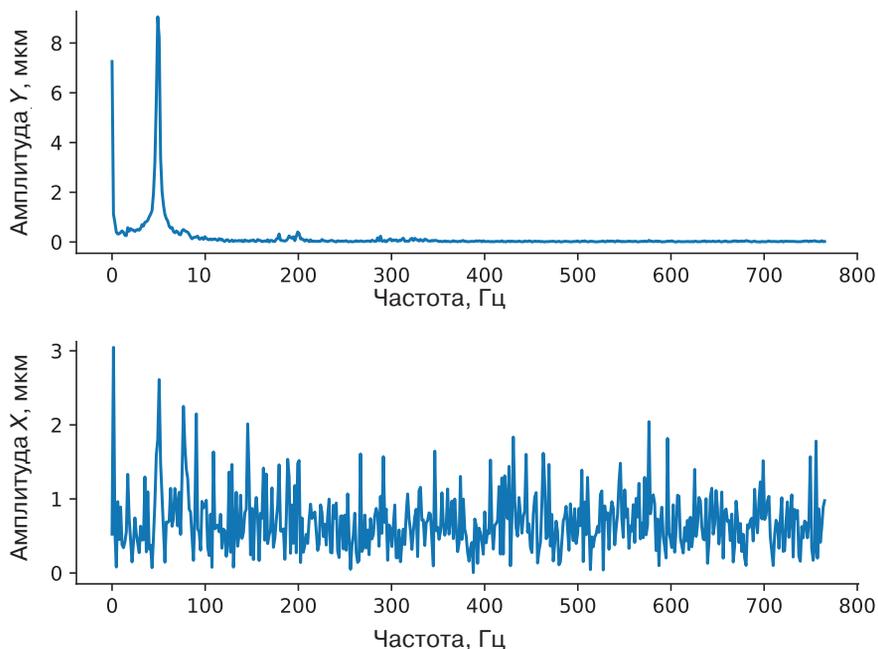


Рис. 2. Спектр колебаний центра тяжести пучка, зарегистрированный на станции оптического наблюдения.

на поток фотонов СИ при его точной фокусировке. Кроме того, такие колебания наблюдались и визуально на мониторе ТВ-камеры.

С этой целью поперечные колебания и изменения размеров пучка были записаны на станции оптического наблюдения на протяжении нескольких смен работы установки на пользователей, начиная с момента инжекции в пустой накопитель. Частота регистрации и обработки изображения пучка на цифровой камере составляла 7 Гц, на диск компьютера записывались вычисленные координаты центра тяжести и размеры (σ_x , σ_y) пучка. Программное обеспечение цифровой камеры было адаптировано под экспериментальную программу, время экспозиции камеры составляло 200 мкс. Такая запись про-

водилась дважды, весной и летом 2023 г. Результаты измерений представлены на рис. 3–6.

Зарегистрированное поведение координат и размеров пучка во время всех смен работы установки было качественно схоже. Резкие броски координат центра тяжести пучка в начале цикла записи связаны с процессами инжекции и ускорения сгустков, в этот промежуток времени накопитель, разумеется, на пользователей не работает. Далее на графике горизонтальной координаты (рис. 3) видны несколько колебаний пучка с амплитудой масштаба $0.1\sigma_x$, которые можно связать с работой систем стабилизации пучка на каналах пользователей, влияющих на орбиту в точке вывода СИ на станцию оптического наблюдения. Дальнейшие смещения

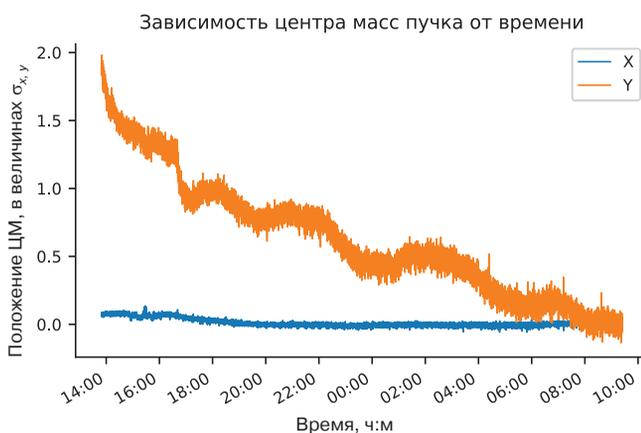


Рис. 3. Смещение центра тяжести пучка в главном накопителе КИСИ по горизонтальной координате (верхний график) и вертикальной координате (нижний график) на протяжении суток, приведенное к радиальному и вертикальному размеру. Период накопления и ускорения пучка на графиках не представлен.

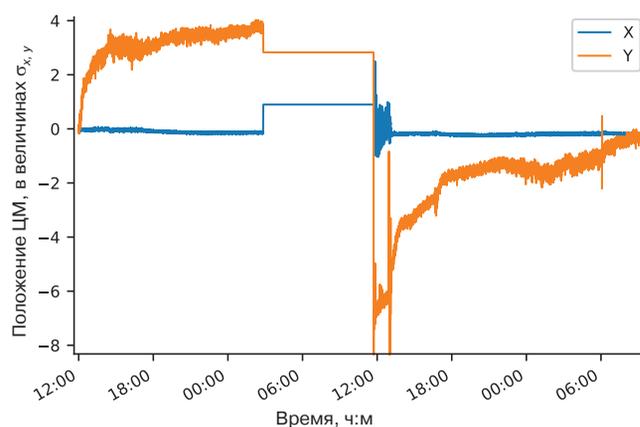


Рис. 4. Временное поведение вертикальной и горизонтальной координат центра тяжести пучка в главном накопителе КИСИ на протяжении двух последовательных смен, разделенных шестичасовым простоем установки.

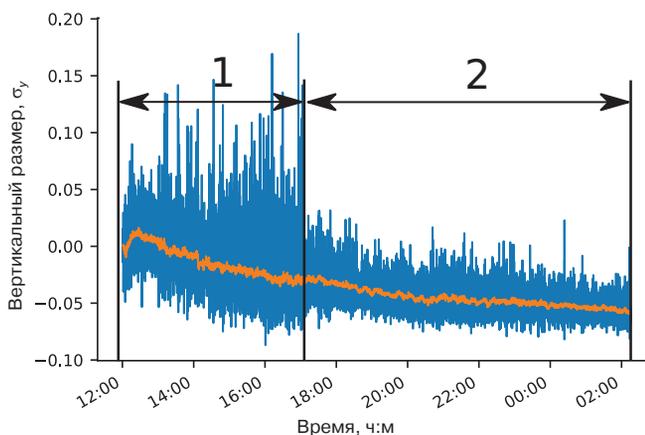
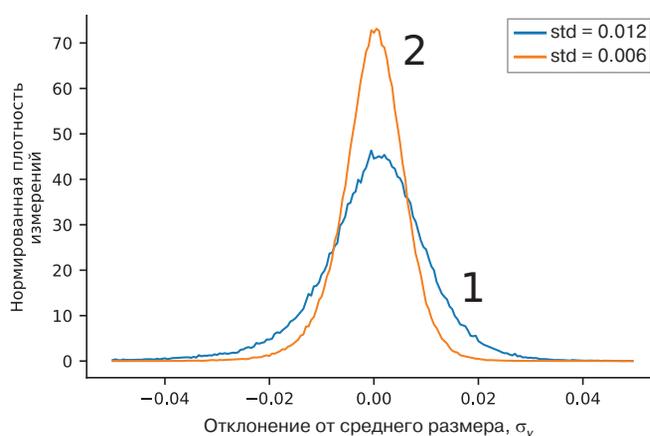


Рис. 5. Долговременное поведение и отклонение от среднего значения вертикального размера пучка в главном накопителе КИСИ.



орбиты по горизонтали не выходят за допустимые пределы $\pm 0.1\sigma_x$. На графике вертикальной координаты бросается в глаза плавный суточный дрейф на величину около $0.1\sigma_y$, сопровождаемый медленными колебаниями с амплитудой масштаба $0.1\sigma_y$ и периодом несколько часов.

На рис. 4 показаны совмещенные на одном графике вертикальные и горизонтальные координаты пучка на протяжении двух последовательных смен, разделенных шестичасовым простоям установки.

Заметно, что после возобновления работы установки вертикальная орбита пучка испытала заметное смещение как при накоплении, так и во время работы на пользователей СИ.

Временное поведение вертикального размера пучка σ_y представлено на рис. 5. За исключением периода накопления и ускорения, который занимает около часа, размеры пучка в основном сохраняют стабильность. Можно отметить токовую зависимость вертикального размера σ_y , который уменьшается на протяжении 12 часов на 10% и выделить два участка, различающихся в два раза по среднеквадратичному отклонению. На графике практически стабильного радиального размера временной зависимости горизонтального размера σ_x заметны несколько выбросов, один из которых показан на рис. 6 в крупном масштабе.

Такое поведение горизонтального размера логично связать с развитием фазовых колебаний пучка, спонтанно возникших и также исчезнувших в течение нескольких минут. Это, тем не менее, могло повлиять на результаты экспериментов пользователей СИ.

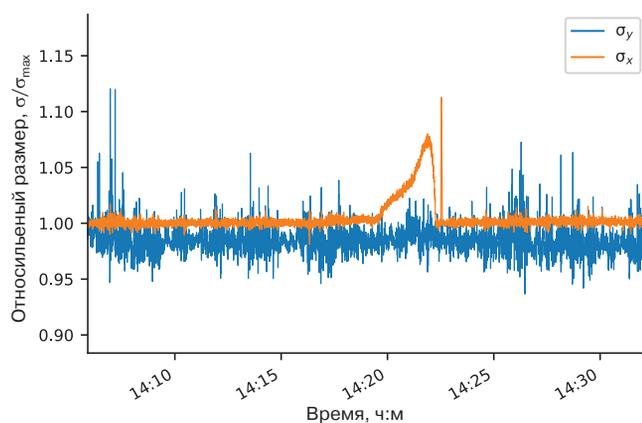


Рис. 6. Изменение размеров пучка в главном накопителе КИСИ, связанное, предположительно, с фазовыми колебаниями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения временной зависимости координат и размеров пучка в главном накопителе КИСИ выявили несколько характерных особенностей, способных оказать влияние на результаты экспериментов пользователей СИ. Две из них были известны ранее и вряд ли могут быть устранены: это токовая зависимость вертикального размера пучка и суточный дрейф его вертикальной координаты, связанный с температурным уходом фундамента здания главного накопителя КИСИ. Этот дрейф, однако же, теоретически может компенсироваться системами стабилизации пучка на каналах пользователей. Следует также отметить кратковременные изменения горизонтального размера пучка, связанные, предположительно, со спонтанными фазовыми колебаниями. При этом за все время записи не было отмечено долговременных колебаний центра тяжести пучка с дисперсией более $0.1\sigma_{x,y}$ при работе установки на пользователей, хотя изменения peak-to-peak как координат, так и размеров пучка на уровне $0.2\sigma_{x,y}$ явно присутствуют. Таким образом, стабильность координат и размеров пучка главного накопителя КИСИ в среднем соответствует требованиям к источникам СИ второго поколения. Разумеется, в процессе эксплуатации установки возможно появление разнообразных факторов, влияющих на стабильность пучка. Для выявления и анализа таких факторов может быть с успехом применена развитая на станции оптического наблюдения система оптической диагностики. Однако даже на примере нескольких суточных циклов регистрации параметров пучка можно видеть, что выявление источников низкочастотных шумов, влияющих на пучок, является весьма сложной задачей. Например, понять природу помехи, увеличивавшей вертикальный размер пучка на рис. 5, не удалось. Низкочастотные помехи имеют явно шумовой, а не гармонический характер и могут быть связаны, например, с работой вентиляции здания или вибрацией его фундамента.

Приобретенный опыт позволяет также сделать определенные выводы для оптической диагностики пучка в бустере и главном накопителе источника СИ СКИФ, строящегося в Новосибирске. Как видно, постоянный количественный контроль за координатами и размерами пучка с помощью оптической диагностики

весьма полезен для поддержания стабильности работы установки. Это требование уже включено в техническое задание для программного обеспечения такой диагностики на бустере СКИФ. То же относится и к аналогичным параметрам пучка в главном накопителе СКИФ, хотя здесь размеры пучка могут быть определены лишь при помощи интерферометрических измерений, которые запланированы. В случае проектной стабильности пучка СКИФ точность измерений координат центра тяжести, определяемых проекционной оптикой, будет недостаточна из-за дифракционных ограничений, однако же и эта информация может сигнализировать о появлении проблем в работе установки, поэтому в систему оптической диагностики СКИФ заложен стандартный способ регистрации изображения пучка, хотя и в УФ диапазоне.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00-177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shin S.* // AAPP Bulletin. 2021. V. 31. № 1. P. 21. <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00021-4>.
2. *Bukhtiyarov A.V., Bukhtiyarov, V. I., Zhuravlev A.N., Zolotarev K.V., Zubavichus Y.V., Levichev E.B., Mezentsev N.A., Nikolenko A.D., Piminov P.A., Churkin I.N.* // Crystallography Reports. 2022. V. 67(5). P. 690. <https://doi.org/10.1134/S1063774522050029>
3. *Hettel R.O.* // Rev. Sci. Instr. 2002. V. 73. P. 1396.
4. *Валентинов А.Г., Воблый П.Д., Михайлов С.Ф., Гаврилов Н.Г., Зубков Н.И., Корчуганов В.Н., Кузьминых В.С., Кулипанов Г.Н., Левичев Е.Б., Трахтенберг Э.М., Эрг Г.И.* Магнитная система накопителя “Сибирь-2” – специализированного источника СИ. Препринт 89–174, ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1989.
5. *Blokhov M., Leonov V., Fomin E., Kovachev G., Korchuganov V., Kovalchuk M., Krylov Yu., Kvardakov V., Moryakov V., Odintsov D., Smoliakov N., Tomin S., Tarasov Yu., Ushkov V., Valentinov A. et al.* // Proc. of RuPAC-2010. Protvino. Russia. 2010. С. 136.
6. <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/beamlines/index.shtml>
7. *Meshkov O., Stirin A., Kovachev G., Korchuganov V., Odintsov D., Tarasov Yu., Valentinov A., Zabelin A., Borin V., Dorokhov V., Khilchenko A., Kvashnin A., Kotelnikov A., Schegolev L., Zinin E. et al.* // Journal of Instrumentation. 2016. V. 11. № 12. P. 12015. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/p12015>
8. *Дорохов В.Л., Мешкова О.И., Стирин А.И., Смыгачева А.С.* // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 5(250). С. 1181.

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.65

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
УСКОРИТЕЛЯ VITA¹

© 2025 г. Г. М. Остреинов^a, С. С. Савинов^a, 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

* e-mail: G.M.Ostreinov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 27.02.2024 г.

Принята к публикации 11.03.2024 г.

Рассмотрен режим “мягкого” ввода пучка ионов в ускоритель VITA, с помощью электростатической Q-snout линзы (предускоряющего электрода). Проведены аналитические и численные расчеты траекторий, фазового портрета и эмиттанса пучков протонов и дейтронов в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ. Показано, что использование предускоряющей электростатической линзы позволяет избежать перефокусировки пучка сильной входной линзой ускорителя и улучшить его прохождение через ионно-оптический тракт. В таком режиме фокусировки фазовый портрет пучка протонов менее чувствителен к изменению тока и энергии ионов, что актуально для установки медицинского применения и его использования в других приложениях.

DOI: 10.31857/S0032816225070059

1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН разработан линейный электростатический тандемный ускоритель оригинальной конструкции, получивший название ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией VITA. Основным применением ускорителя, является проведение всесторонних исследований в области бор-нейтронзахватной терапии (БНЗТ) [1]. Для создания нейтронного пучка с интенсивностью и энергией, необходимой для БНЗТ, используется реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ с пороговой энергией 1882 кэВ. Исходная оптическая система ускорителя проектировалась для транспортировки пучка протонов с током 10 мА и энергией более 2 МэВ. По мере усовершенствования установки, она стала применяться для ряда других приложений, таких как спектроскопия поверхностей с помощью обратного

резерфордовского рассеяния, измерение дифференциального сечения в ядерных реакциях ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^4\text{Li}$, а также для радиационного тестирования материалов с помощью быстрых нейтронов [1]. Таким образом, в различных экспериментах ускоритель должен оперировать в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ и токов в диапазоне от 1 нА до 10 мА. Однако оптимальная транспортировка ионного пучка через ускоритель осуществима лишь в ограниченном диапазоне значений энергии. Причиной этого является входная электростатическая линза, возникающая в области соединения низкоэнергетического тракта и ускорителя (рис. 1). Фокусное расстояние такой линзы f пропорционально отношению энергии инжектируемого пучка к изменению напряженности $f \sim \sim 4V/\Delta E$ [2], где V – потенциал, соответствующий энергии ионов, а ΔE – изменение напря-

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

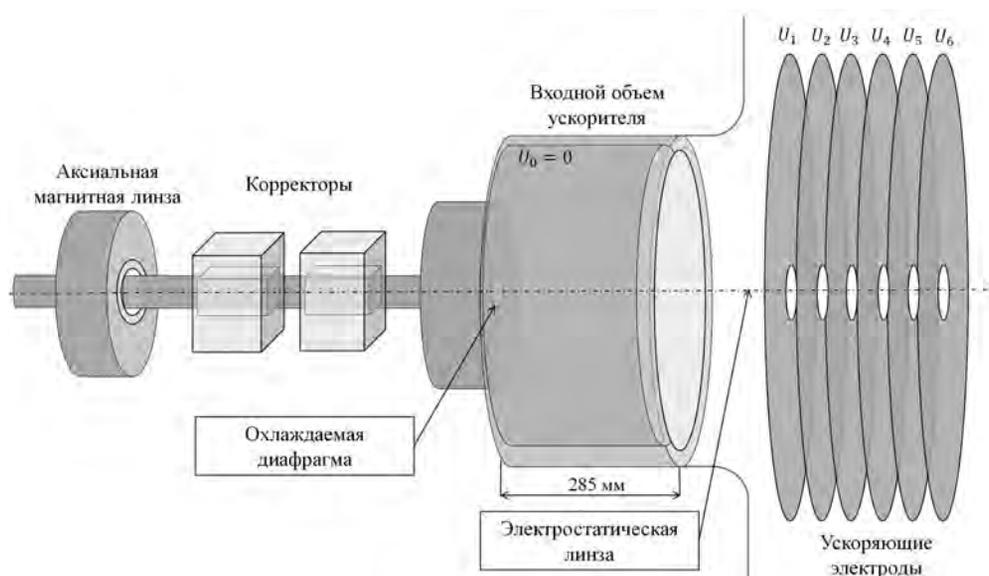


Рис. 1. Схема низкоэнергетического тракта ускорителя ВИТА.

женности поля на апертуре. За счет большого градиента напряженности между областью, свободной от поля, и ускоряющими зазорами, где напряженность поля достигает 25 кВ/см, воздействие на оптику пучка в ускорителе является определяющим. При общей протяженности ускорителя 2 м фокусное расстояние линзы при напряжении на высоковольтном электроде 1.15 МВ и энергии инжекции 21 кэВ составляет всего около 5 см, а при напряжении 200 кВ уже примерно 54 см. Очевидно, что такой разброс фокусных расстояний при работе ускорителя требует дополнительного фокусирующего элемента. В текущей оптической конфигурации компенсация фокусирующего действия вход-

ной электростатической линзы достигается схемой с “жесткой” фокусировкой (рис. 2а), когда в ускоритель вводят сильно расходящийся ионный пучок малого радиуса. Такой пучок можно получить только путем его перефокусировки с помощью магнитной линзы непосредственно перед входом в ускоритель.

В статье описывается модернизированная оптическая система, которая предполагает размещение во входном объеме ускорителя так называемой линзы Q-snout и реализации схемы “мягкого” ввода пучка (рис. 2б). В нашем случае подача напряжения от 5 до 90 кВ на электрод линзы Q-snout позволяет получить на выходе ускорителя слабосходящийся пучок с диаметром

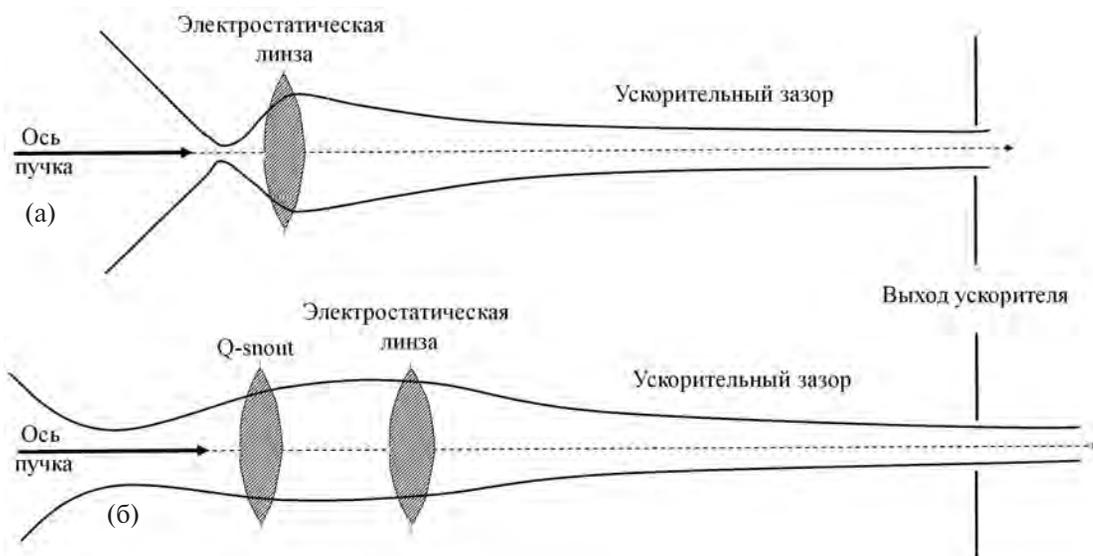


Рис. 2. Схемы ввода пучка в ускоритель: а – схема с жесткой фокусировкой, б – мягкий ввод.

около 10 мм. С использованием матричного формализма проанализирована новая оптическая схема. Проведено моделирование электрических полей и транспортировки пучка, получены его фазовый портрет и огибающие.

2. КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЗЫ

Конструкционная схема линзы Q-snout показана на рис. 3 и представляет собой два соосных цилиндрических электрода, разделенных зазором в 30 мм, общей протяженностью 175 мм. Согласующий электрод состоит из двух соединенных металлических цилиндров длиной 30 и 95 мм, диаметрами 30 и 60 мм соответственно. Перфорированная структура согласующего электрода с геометрическим коэффициентом прозрачности 0.75 обусловлена требованием вакуумной проводимости. На электроды подается управляющее напряжение U_i и U_m с независимых источников питания. Входной объем соединен с внешним баком ускорителя и вместе с охлаждаемой диафрагмой находится под земляным потенциалом. Заметим, что дифференциальная откачка во входном объеме ускорителя обеспечивает давление в 10^{-4} Па, что позволяет подавать напряжения на электроды линзы вплоть до 115 кВ. При помощи изолирующих керамических стержней линза устанавливается во входном объеме ускорителя вдоль оси пучка.

Таким образом, при подаче на электроды линзы управляющего напряжения:

- возникает линза иммерсионного типа с фокальными свойствами, определяемыми отношением U_i / U_m ;

- инжектируемый со стороны охлаждаемой диафрагмы пучок ионов фокусируется и увеличивает свою энергию на величину $e(U_i - U_m)$, что

в свою очередь уменьшает влияние на него входной электростатической линзы;

- ослабляется сила электростатической линзы за счет уменьшения градиента напряженности электрического поля ΔE между согласующим электродом и первым электродом ускорителя.

3. АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данном разделе мы формализуем задачу расчета модернизированной оптической системы, а далее, используя экспериментальные данные характеристик пучка, проведем численное моделирование транспортировки пучка. Целью расчета является получение величин управляющих напряжений U_m , U_i линзы Q-snout, которые позволят осуществить транспортировку пучка через ускоритель с минимальными потерями и обеспечат на выходе из ускорителя сходящийся протонный пучок с поперечным размером около 10 мм в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ. Экспериментальные данные измерений эмиттанса говорят о том, что на входе в ускоритель мы имеем пучок ионов с током 3 мА и поперечным размером 14 мм, угловым разбросом ± 50 мрад и нормализованным эмиттансом $\epsilon_{\text{norm}} = 0.20$ мм · мрад [3]. Мы будем использовать эти данные как для численных оценок, так и для моделирования.

За счет малого углового разброса расчет огибающей пучка можно проводить в параксиальном приближении, а слабое влияние пространственного заряда в области ускорения позволяет описать оптические свойства системы в терминах матрицы перехода для переменных $y(z)$ и $y'(z)$, где $y(z)$ мм – поперечный размер пучка в мм, а $y'(z)$ мрад – угол наклона огибающей к оси пучка. Начало отсчета мы поместим на

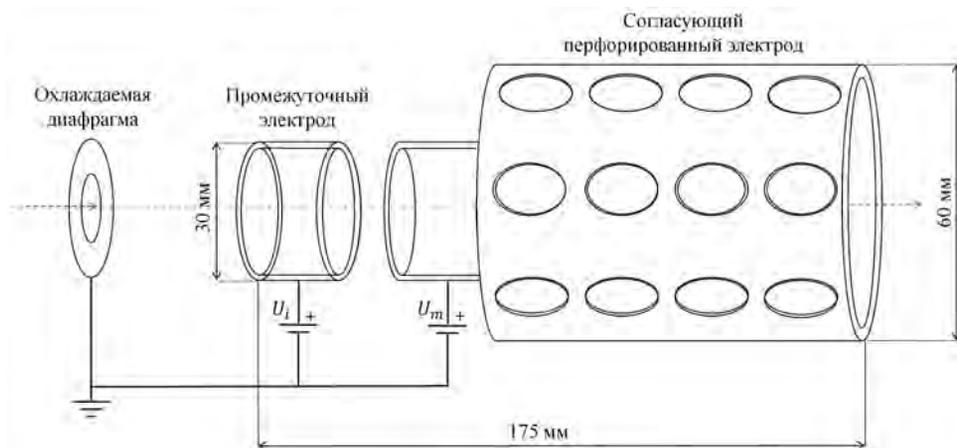


Рис. 3. Схема устройства линзы Q-snout.

место охлаждаемой диафрагмы (см. рис. 2б), тогда матричное уравнение, связывающее размеры и угол пучка на входе в ускоритель и на выходе, будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} y(z) \\ y'(z) \end{bmatrix} = M_G M_E M_F M_S M_M \begin{bmatrix} y_0(z) \\ y'_0(z) \end{bmatrix},$$

где M_F – матрица свободного промежутка, M_S – матрица линзы Q-spout, M_E – матрица входной электростатической линзы, M_G – матрица ускорительного промежутка. Для получения функциональной зависимости размера и угла наклона пучка от управляющего напряжения используем общеизвестные выражения фокусных расстояний апертурных и иммерсионных линз [4], а также упрощенную матрицу перехода для многоапертурного ускорительного промежутка. В развернутом виде уравнение принимает вид

$$\begin{bmatrix} y(z) \\ y'(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & A \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_E & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_E & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{bmatrix}.$$

Приведем далее выражения для компонент матриц:

$$\frac{1}{f_E} = \frac{e(E_1 - E_2)}{4(eU_m + \varepsilon_i)}$$

– фокусная сила входной электростатической линзы, где E_1 – напряженность поля на конце согласующего электрода, E_2 – напряженность поля между электродами ускорителя, U_i и U_m – напряжения на промежуточном и согласующем электродах, ε_i – энергия инжекции пучка;

$$\frac{1}{f_S} = \frac{(eU_i + \varepsilon_i)^2 + eU_m^2 - 2(U_m(eU_i + \varepsilon_i))}{4DU_m((eU_i + \varepsilon_i) + \sqrt{(eU_i + \varepsilon_i)eU_m})}$$

– фокусная сила двухэлектродной иммерсионной линзы, где D – зазор между электродами;

$$A = \frac{2b}{\left(1 + \sqrt{\frac{U_6}{U_1}}\right)}, \quad B = \sqrt{\frac{U_1}{U_6}},$$

L – расстояние между охлаждаемой диафрагмой и промежуточным электродом, b – размер ускорительного промежутка U_6 , U_1 – потенциалы первого и последнего ускоряющих электродов. Численный анализ уравнения дает оценку диапазона управляющего напряжения, необходимого для “мягкого” ввода пучка в ускоритель, $U_m = 30$ –80 кВ.

Для получения точных значений U_m , U_i проведено моделирование методом конечно-элементного анализа. Расчет состоял из двух этапов: сначала были получены трехмерные распределения электрических полей, потом рассчитаны огибающие и фазовые портреты пучка. Реальный размер и регулярный разлет пучка ионов задавались в соответствии с экспериментально полученными данными. На фазовой плоскости выбрано гауссово распределение плотности частиц [5].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графики расчета потенциала приведены на рис. 4. Согласующий электрод с поданным на него управляющим напряжением U_m контроли-

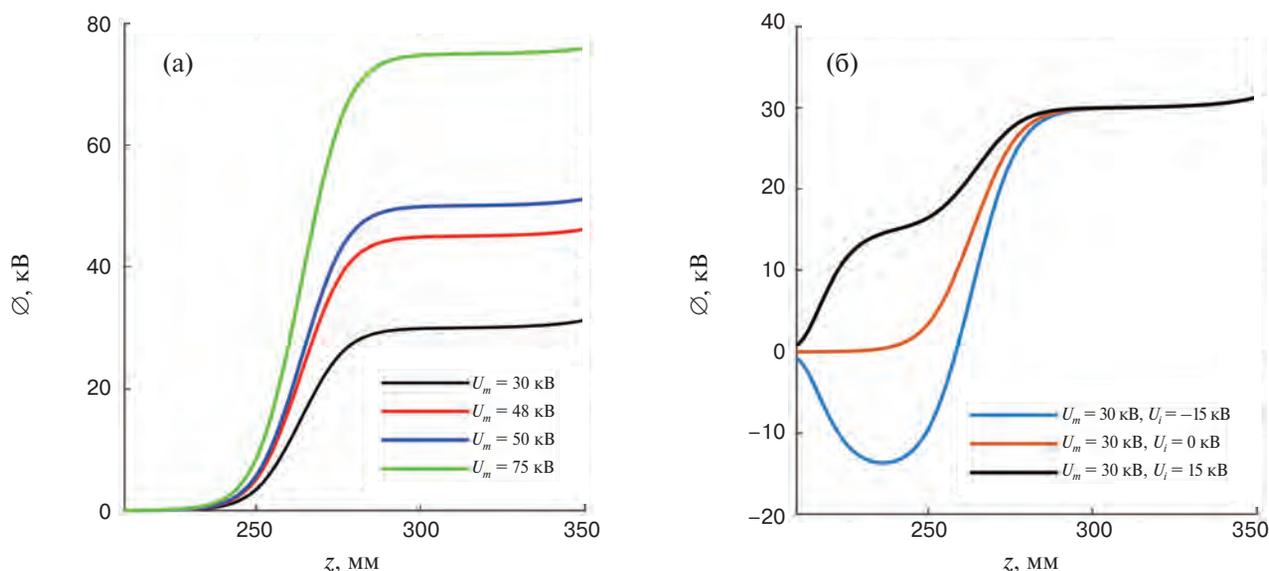


Рис. 4. Осевое распределение потенциала во входном объеме ускорителя при различных значениях U_i , U_m и высоковольтным напряжением 1 МВ: а – с нулевым потенциалом на промежуточном электроде, б – с подачей напряжения на промежуточный электрод.

рует силу входной линзы за счет снижения градиента напряженности поля в области 400 мм (рис. 4б). Роль промежуточного электрода заключается в независимом контроле фокусного расстояния линзы Q-snout.

Обозначим критерии выбора управляющих напряжений U_m , U_i для оптимального прохождения пучка:

- на протяжении всего ускорителя поперечный размер пучка не превышает 20 мм;
- реализуется режим “мягкого” ввода пучка, т.е. нет необходимости перефокусировать пучок на вход в ускоритель;
- на выходе из ускорителя пучок почти параллельный или слабосходящийся.

Рассмотрим огибающие пучка при работе ускорителя на энергии 200 кэВ. На рис. 5а видно, что при значениях $U_1 = 5–20$ кВ мы имеем плавно сходящийся пучок, который на выходе (1800 мм) имеет поперечные размеры 5–8 мм и угловой разброс ± 15 мрад, что отвечает приведенным выше критериям. При подаче напряжения на промежуточный электрод $U_i = -5$ кВ пучок дополнительно фокусируется, а при дальнейшем уменьшении U_i линза переходит в режим “жесткого” ввода, когда пучок перефокусируется на входе в ускоритель [5].

Перейдем к рассмотрению огибающей пучка при энергии 1.15 МэВ (рис. 5в). Поскольку сила входной линзы увеличилась, на согласо-

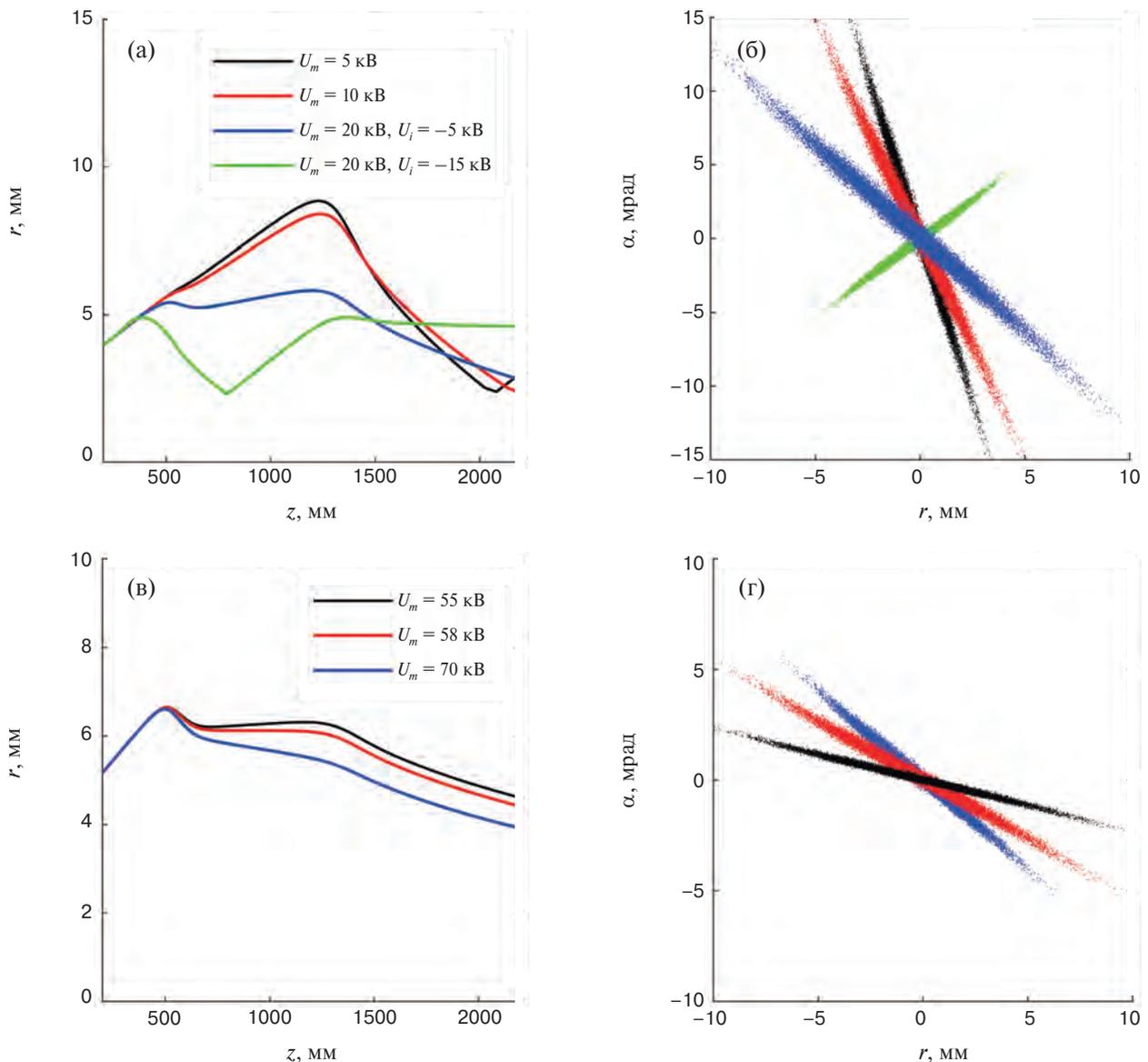


Рис. 5. Огибающие и фазовые портреты пучка протонов на выходе из ускорителя при энергиях 200 кэВ (а, б) и 1 МэВ (в, г).

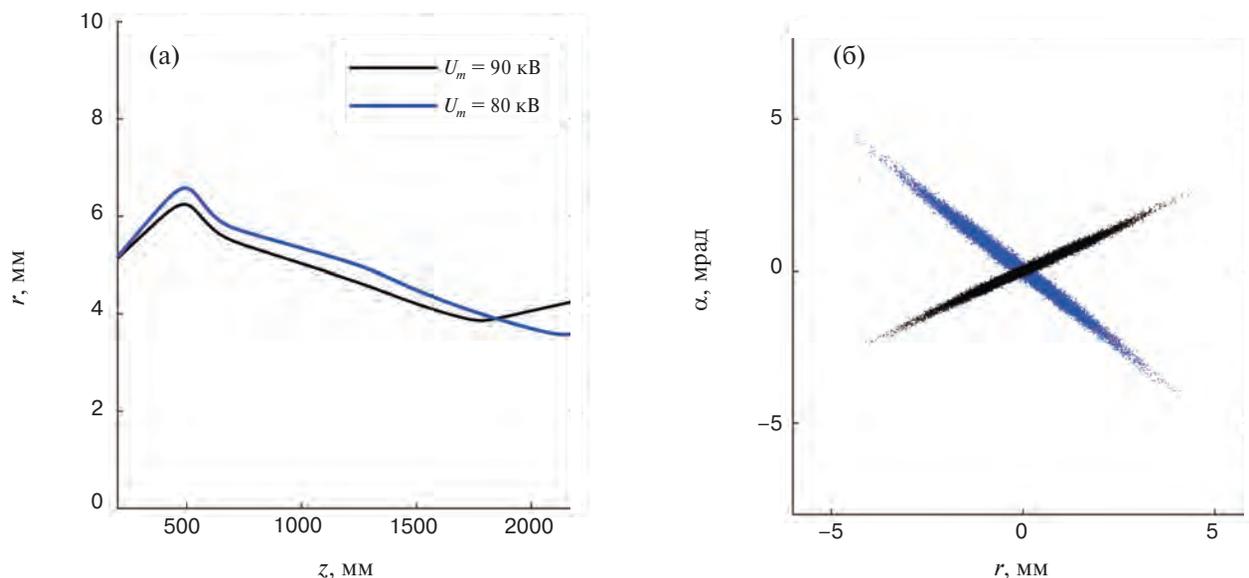


Рис. 6. Огибающие (а) и фазовые (б) портреты пучка протонов на выходе из ускорителя при энергии 2.15 МэВ.

ший электрод необходимо подать напряжение 50–60 кВ, тогда оптическая конфигурация пучка не изменится и на выходе мы получим пучок с размером 10 мм и угловым разбросом ± 10 мрад. Наконец, рассмотрим работу линзы при энергии пучка 2.3 МэВ, здесь сила входной линзы наибольшая, как видно на рис. 6а, все пучки являются сходящимися, а максимальный угловой разброс ± 2.5 мрад получается при подаче напряжения 90 кВ на согласующий электрод.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для применения тандемного электростатического ускорителя ВИТА в различных приложениях требуется обеспечить прохождение пучка через ускоритель в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ. Особенностью многих электростатических ускорителей является сильная входная линза, естественным образом возникающая в месте соединения области, свободной от поля и ускорительного зазора. В текущей конфигурации установки для компенсации действия входной линзы используется схема с “жесткой” фокусировкой, когда соленоидальной магнитной линзой пучок ионов перефокусируется в область входной линзы. Поскольку сила входной линзы зависит от величины высоковольтного напряжения, данная схема имеет ряд недостатков [3]:

- необходимость точной подстройки фокусного расстояния при работе ускорителя на различных энергиях;

- большие сферические aberrации пучка;
- повышенная тепловая нагрузка на диафрагму первого ускоряющего электрода.

В данной работе предложено реализовать схему “мягкого” ввода пучка за счет установки во входной объем ускорителя двухэлектродной линзы Q-spout. В схеме с “мягкой” фокусировкой действие входной линзы ослабляется за счет плавного нарастания электрического поля на входе в ускоритель, причем градиент напряженности управляется напряжением на согласующем электроде U_i . При этом угол наклона огибающей пучка на входе в ускоритель близок к нулю. Достоинствами этой схемы по сравнению с “жесткой” фокусировкой является меньшая чувствительность коэффициента прохождения и выходных параметров пучка от угла сходимости пучка на входе в ускоритель. Анализ уравнений и расчет оптического тракта методом конечных элементов позволил определить диапазон значений напряжения на согласующем и на промежуточном электродах, необходимого для осуществления “мягкого” ввода пучка в диапазоне энергий 0.2–2.15 МэВ. Диапазон значений напряжений составил (10–90) кВ для U_m , и (–15–5) кВ для U_i . При этом во всех случаях на выходе из ускорителя удалось сформировать слабосходящийся или параллельный пучок. Максимальный угловой разброс ± 5 мрад и поперечный размер 5 мм получен при энергии ускорителя 2.3 МэВ. В остальных случаях средний размер пучка на выходе из ускорителя составил 4 мм, а угловой разброс ± 2.5 мрад.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касатов Д.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Шудло И.М. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050158>
2. Elkind M.M. // Rev. Sci. Instrum. 1953. V. 24 (2). P. 129.
<https://doi.org/10.1063/1.1770640>
3. Бикчурина М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Шудло И.М. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 18.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040164>
4. Liebl H. Applied Charged Particle Optics, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, p. 131.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-71925-0>
5. Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю., Шудло И.М. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 1. С. 105.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.01.50280.86-20>
6. Larson J.D. // Nuclear Instruments and Methods. 1974. V. 122. P. 53.
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(74\)90471-6](https://doi.org/10.1016/0029-554X(74)90471-6)

УДК 621.384.63

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000 ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДВА ГОДА¹

© 2025 г. С. А. Растигеев^{a,*}, Ю. С. Актершев^a, Е. В. Бедарев^{a,b}, О. В. Беликов^a,
Д. Е. Беркаев^a, В. С. Денисов^a, Э. А. Эминов^{a,b}, Л. Б. Фомин^a, К. М. Горчаков^a,
Г. В. Карпов^a, А. С. Касаев^a, А. Н. Кирпотин^a, З. Э. Коншин^a, И. А. Кооп^{a,b}, А. А. Краснов^a,
А. В. Купуржанов^a, Г. Я. Куркин^a, А. П. Лысенко^a, С. В. Мотыгин^a, А. А. Мурасев^a,
А. В. Отбоев^a, Е. А. Переведенцев^{a,b}, В. П. Просветов^a, Ю. А. Роговский^{a,b}, А. М. Семенов^a,
А. И. Сенченко^a, Ю. М. Шатунов^{a,b}, Д. Б. Шварц^a, М. В. Тимошенко^a, В. Д. Юдин^a,
И. М. Землянский^a, Ю. М. Жаринов^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*

* e-mail: S.A.Rastigeev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 17.04.2024 г.

ВЭПП-2000 — электрон-позитронный коллайдер с круглыми пучками, созданный и работающий в ИЯФ СО РАН. Интегральная светимость, накопленная за последние два года, достигла 0.5 фбн^{-1} при пиковой светимости $0.9 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Представлено краткое описание комплекса ВЭПП-2000, современное состояние и достигнутые результаты.

DOI: 10.31857/S0032816225070062

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые установки со встречными пучками появились примерно 60 лет назад. В настоящее время экспериментальные данные с коллайдеров являются одним из основных источников информации о фундаментальных свойствах материи. ВЭПП-2000 — один из двух действующих в России коллайдеров. Состояние дел на ВЭПП-2000 и, соответственно, объем набранных статистических данных на территории России, во многом характеризуют российский вклад в мировую науку в области физики высоких энергий.

2. КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000 [1–3] предназначен, в первую очередь, для изучения физики легких мезонов и прецизионных измерений сечений аннигиляции электрон-позитронных пар в адроны. Для выполнения физической программы используется два детектора — криогенный магнитный детектор (КМД-3) и сферический нейтральный детектор (СНД). При этом предполагалось, что за время эксплуатации комплекса необходимо набрать интеграл светимости не менее 1 фбн^{-1} на каждый детектор в области энергий пучков 0.2–1 ГэВ.

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

Коллайдер ВЭПП-2000 создан в ИЯФ СОРАН на основе инженерной инфраструктуры комплекса предшественника ВЭПП-2М, что радикально снизило стоимость, но во многом определило концепцию нового комплекса. В рамках существующего экспериментального зала периметр коллайдера ВЭПП-2000 составил всего 24.4 м с отсутствием возможности разведения пучков в паразитных местах встречи, т.е. возможен лишь режим столкновения 1×1 ступок. Однако для выполнения программы по набору статистики столкновения частиц необходимо достижение достаточно высокого уровня светимости $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при максимальной энергии 1 ГэВ на пучок. Для достижения запланированной светимости предложена и реализована концепция круглых пучков [4], что предполагает равенство поперечных эмиттансов и дробной части бетатронных частот, а также равенство и малые значения бета-функций в области столкновений. Таким образом, поперечное движение частиц становится эффективно одномерным, и устраняется отрицательное влияние нелинейных резонансов связи, что повышает стабильность при взаимодействии интенсивных встречных пучков, а характерные параметры встречи превышают значение 0.1.

Концепция круглых пучков реализована с использованием сверхпроводящих соленоидов, обеспечивающих требуемые параметры финальной фокусировки в местах встречи. Кроме того, в зависимости от полярности включения соленоидов возможно применение различных схем реализации концепции встречных пучков, как с поворотом плоскости поперечных колеба-

ний частиц при прохождении места встречи, так и без поворота. Таким образом, возрастают возможности достижения запланированного уровня светимости. В целом кольцо коллайдера ВЭПП-2000 (рис. 1) образуется двумя одинаковыми арками, разделенными промежутками мест встречи, где располагаются детекторы и соленоиды финальной фокусировки. Каждая арка состоит из двух ахроматических поворотов, разделенных техническим промежутком. В одном таком промежутке располагаются впускные магниты, в другом – ВЧ-резонатор, а по краям обоих промежутков размещены дублеты квадрупольных линз и секступольные линзы, совмещенные с повернутыми на 45° относительно продольной оси квадрупольными линзами. Каждый ахроматический поворот состоит из двух магнитов, разделенных малым промежутком, где располагается триплет квадрупольных линз, а также радиальные и вертикальные секступольные линзы, совмещенные с повернутыми на 45° относительно продольной оси квадрупольными линзами. Все квадрупольные линзы кольца накопителя ВЭПП-2000 содержат либо радиальные, либо вертикальные дипольные коррекции, также возможно корректирование поля каждого из поворотных магнитов. Для диагностики пучков предусмотрены 4 электростатических пикапа, расположенные по одному в малых промежутках квадратов, и 16 ПЗС-камер, регистрирующих видимую часть синхротронного излучения с краев поворотных магнитов. Абсолютное значение суммарного тока пучков измеряется по феррозонду – трансформатору тока. Индивидуальные значения

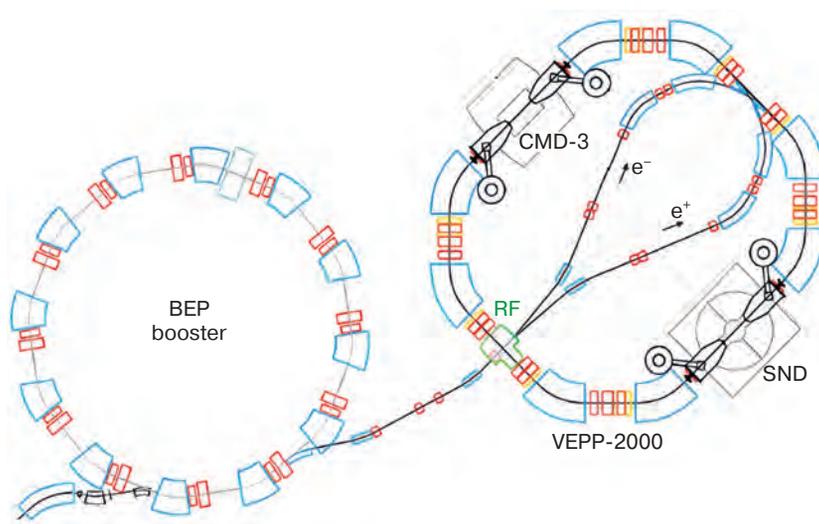


Рис. 1. Комплекс ВЭПП-2000.

токов электронов и позитронов контролируются по показанию электростатических пикапов в момент пролета соответствующих пучков. Точное измерение энергии пучков осуществляется по обратному комптоновскому рассеянию лазерного излучения. Первичным источником электронов и позитронов для комплекса ВЭПП-2000 служит отдельный объект – инжекционный комплекс (ИК) [5], с которого поступают частицы с постоянной энергией примерно 430 МэВ. Электроны и позитроны поочередно инжектируются, накапливаются и ускоряются до энергии эксперимента в электронно-позитронный бустер (БЭП) [6]. Далее частицы выпускаются из БЭП и по разветвляющемуся каналу инжектируются в накопительное кольцо коллайдера ВЭПП-2000.

3. РАБОТА С ПУЧКОМ И ПОВЫШЕНИЕ СВЕТИМОСТИ

При малом периметре кольца коллайдера ВЭПП-2000 возникает необходимость в плотной расстановке элементов, совмещении функций элементов и работе в области насыщения магнитных полей. Данное обстоятельство существенно осложняет настройку оптимальных режимов столкновения частиц, однако индивидуальное питание каждого элемента оптической структуры предоставляет широкие возможности по повышению светимости. На исследуемой рабочей точке по бетатронным колебаниям возможны тонкая регулировка оптической структуры и орбиты пучков, минимизация дисперсии в области столкновения частиц, компенсация хроматизма и регулировка связи поперечных колебаний.

В настоящее время коллайдер работает в режиме оптики, когда солениды, расположенные по краям детекторов, включены встречно. Таким образом, плоскость бетатронных колебаний не разворачивается по результату прохождения частицами детекторного промежутка, а равенство поперечных эмиттансов пучка обеспечивается расположением рабочей точки вблизи резонанса связи бетатронных частот.

Для набора статистики необходимо, чтобы пучковые фоны детекторов не превышали некую величину, иначе живое время детекторов резко уменьшается и ухудшается качество набранной статистики. Для контроля фона детекторов используются данные счета дрейфовых камер,

расположенных на внутреннем радиусе детекторов. Настройка режима кольца ВЭПП-2000 осуществляется итерационно постепенным увеличением токов пучков при приемлемом фоне детекторов [7]. Данная процедура требует много времени, однако при наборе статистики шаг по переходу на новую энергию сталкивающихся пучков обычно не превышает 10 МэВ, поэтому режим в целом сохраняется, и возможна оптимизация по повышению светимости непосредственно в процессе набора статистики столкновений. Выбор рабочей точки крайне важен для достижения высокого уровня светимости, однако исследование новых рабочих точек невозможно в режиме набора статистики столкновений частиц, поскольку на больших токах пучков сдвиг вдоль резонанса связи даже на несколько тысячных вызывает неприемлемое увеличение фоновой загрузки детекторов. На данный момент наиболее хорошо оптимизирован режим при дробной части частот бетатронных колебаний равной примерно 0.18. В рабочей точке 0.18 при максимальных токах сталкивающихся пучков частота π -моды колебаний пучков достигает величины 0.36. Интересен процесс прохождения резонанса $1/3$. При увеличении токов частота π -моды перескакивает с уровня примерно 0.31 сразу на 0.34 за счет изменения поперечного размера пучков. Сначала оба пучка синхронно увеличиваются в поперечном размере, потом синхронно сжимаются. Пучки при этом остаются устойчивыми, но при данном процессе временно снижается удельная светимость и, как следствие, набор статистики менее эффективен. При дальнейшем увеличении токов пучков более интенсивный пучок резко сжимается, а более слабый увеличивается в размерах, что сопровождается резким уменьшением времени жизни слабого пучка и быстрой потерей части размера пучка. Иногда возможно восстановление устойчивого состояния посредством выравнивания токов пучков дополнительной инъекцией частиц, и в какой-то момент размеры пучков сравниваются. Если такого эффекта быстро достичь не удастся, то проводится сброс обоих пучков и постепенное поочередное накопление токов сталкивающихся пучков с нулевого уровня. С недавних пор достаточно перспективно выглядит режим при дробной части частот бетатронных колебаний примерно 0.12, а ранее непродолжительное время использовался режим при 0.14. В иных рабочих точках пока не удастся

за разумное время достичь неплохой светимости, чтобы совместить продолжительную тонкую настройку режима с набором статистики столкновений.

Для иллюстрации некоторых процессов, происходящих при наборе статистики, на рис. 2 представлен режим работы комплекса ВЭПП-2000 для последней в описываемый период точки по энергии пучков – 641 МэВ. На рис. 2а приводится процесс накопления электронов и позитронов в БЭП. Видно, что позитроны накапливаются медленнее, чем электроны, что связано с разным темпом поступления частиц с ИК. На рис. 2б показана зависимость токов позитронов, электронов и суммарный ток пучков в накопителе ВЭПП-2000. При суммарном токе пучков примерно 220 мА, светимости в каждом из мест встречи примерно равны

$0.3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. (рис. 2с). Поскольку интенсивности пучков достаточно велики, каждая инжекция частиц вызывает значимое изменение поперечных размеров циркулирующих пучков (рис. 2д). Более интенсивный пучок сжимается, а слабый пучок увеличивается в поперечном размере, что отражается на времени жизни суммарного тока пучков (рис. 2е). При этом возрастает фоновая нагрузка детекторов (рис. 2ф) – основной ориентир при наборе статистики. В представленном на рис. 2 режиме при суммарном токе пучков 230 мА измеренные частоты σ -моды и π -моды когерентных колебаний равны соответственно 0.12 и 0.3, что отвечает оценочной величине параметра встречи: 0.15.

Величины средних светимостей (10% лучших) при всех энергиях эксперимента за последнее два года представлены на рис. 3. Для сравне-

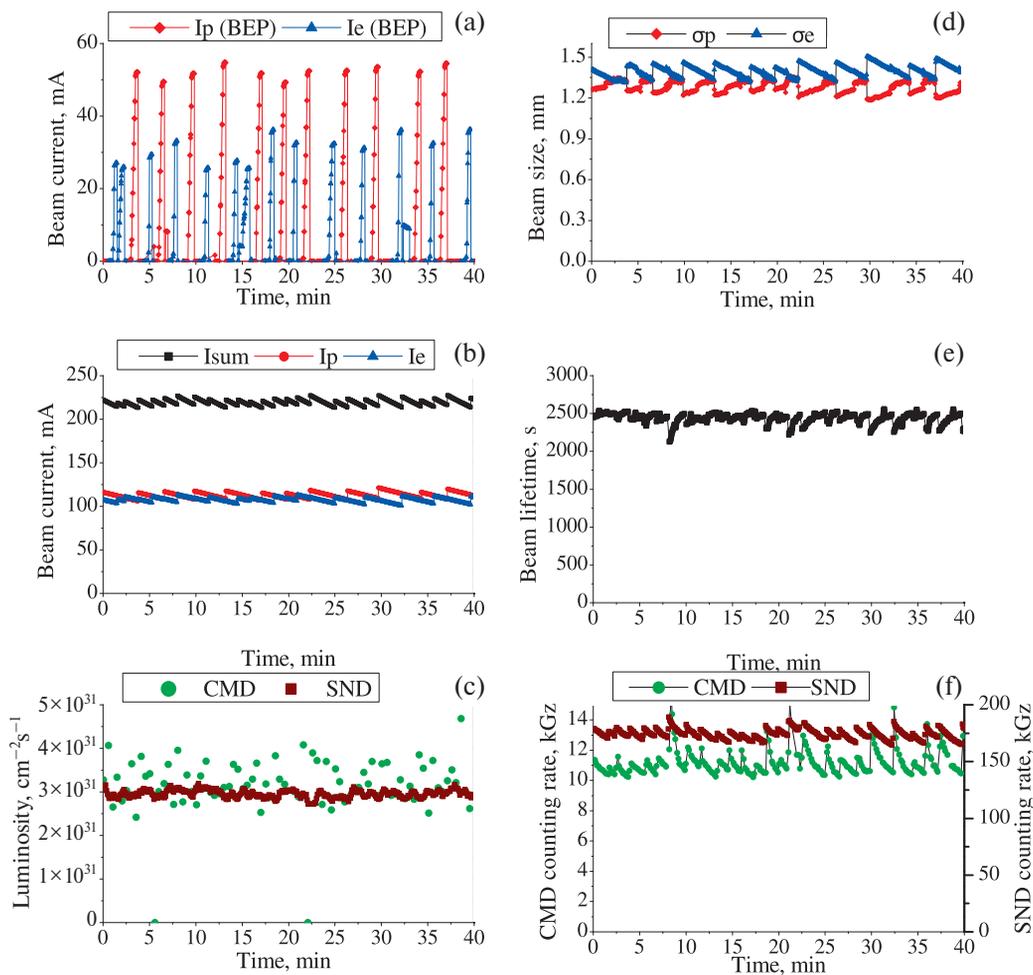


Рис. 2. Пример работы комплекса ВЭПП-2000 при энергии эксперимента 641 МэВ. Приводится временная зависимость тока пучков в бустере БЭП (а), а также временные зависимости токов пучков для коллайдера ВЭПП-2000 (б), светимостей, регистрируемых детекторами (с), вертикальных размеров пучков (д), времени жизни по суммарному току пучков (е) и счета дрейфовых камер в внутреннем радиусе детекторов (ф).

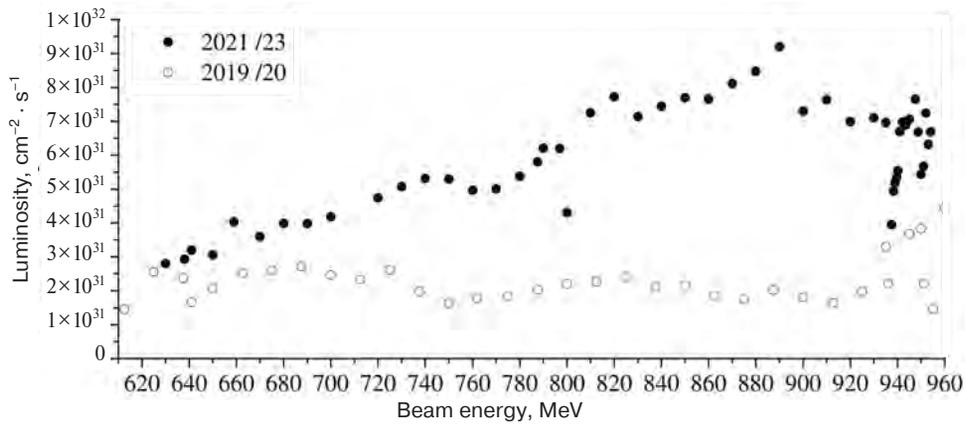


Рис. 3. Сравнение средних светимостей (10% лучших) за последние два года и результатов, полученных в том же диапазоне энергий пучков в 2019–2020 годах.

ния на рис. 3 также приведены лучшие результаты, полученные в данном диапазоне энергий в предыдущие годы. Здесь и далее приводятся данные с детектора КМД-3, отметим, что данные с детектора СНД, характеризующие светимость и объем набранной статистики, различаются незначительно, так как оба места встречи реализованы идентично. Из рис. 3 виден существенный прогресс в увеличении светимости. Максимальная светимость $0.9 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ была получена при энергии пучков 890 МэВ при суммарном токе пучков почти 0.5 А.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО НАБОРУ СТАТИСТИКИ СТОЛКНОВЕНИЙ

За последние два года состоялись 9-й и 10-й сезоны работы коллайдера ВЭПП-2000 по набору статистики столкновений, проходившие соответственно с декабря 2021 г. по июнь 2022 г. и с февраля по июнь 2023 г. В соответ-

ствии с физической программой энергия сталкивающихся пучков постепенно снижалась, охватив диапазоны 790–954 МэВ в 9-м сезоне и 630–797 МэВ в 10-м сезоне. На рис. 4 приводится распределение по энергии интеграла светимости, набранного за последние два сезона и за все предыдущие годы. Пик интеграла светимости расположен в области порога рождения нуклонов при аннигиляции электрон-позитронных пар. Средние светимости для (10% лучших) для всех энергий эксперимента за все время работы комплекса ВЭПП-2000 приведены рис. 5. Также для наглядности на рис. 5. приводятся аналитические кривые зависимости светимости от энергии с сохранением оптики кольца и с уменьшением бета-функций в месте встречи пропорционально энергии пучка. На рис. 6. видно значительное увеличение объема набираемой статистики столкновений за два последних сезона. В целом за последние два сезона набран интеграл светимости 0.5 фбн^{-1} на каждый детек-

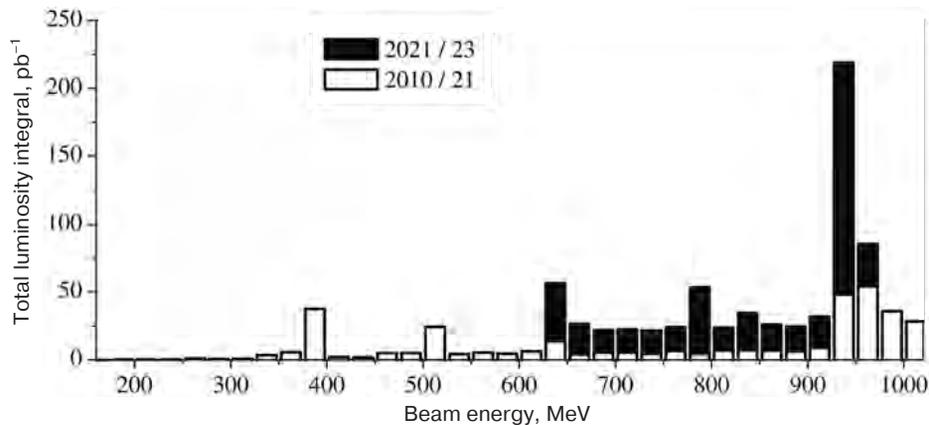


Рис. 4. Распределение по энергии интеграла светимости, набранного за последнее два сезона и за все предыдущие годы.

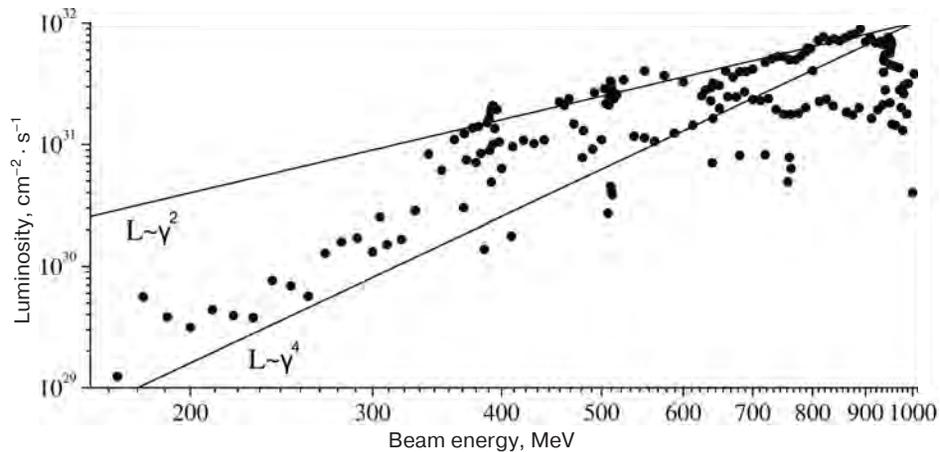


Рис. 5. Средние светимости (10% лучших) в зависимости от энергии пучков за все время работы комплекса ВЭПП-2000.

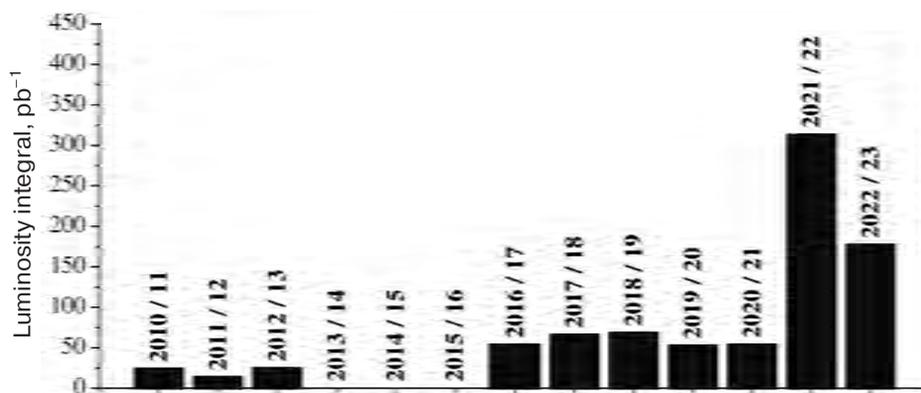


Рис. 6. Распределение по сезонам набранных интегралов светимости.

тор, в то время как за предыдущие 8 сезонов набран интеграл светимости 0.3 фбн^{-1} на каждый детектор. Таким образом, производительность коллайдера ВЭПП-2000 по реализации физической программы значительно возросла за два последних года.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа с пучком позволила значимо увеличить светимость в диапазоне высоких энергий ВЭПП-2000. Интеграл светимости, набранный за все время работы ВЭПП-2000, увеличился за последние два года примерно с 30% до 80% от целевого уровня равного 1 фбн^{-1} на каждый детектор. Полученные результаты демонстрируют достаточно высокий уровень эффективности концепции круглых пучков, реализованной на коллайдере ВЭПП-2000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu.M., Evstigneev A.V., Ganyushin D.I. et al.* // Proc. Of EPAC'20. Vienna, Austria, 2000. P. 439.
2. *Shwartz D.B., Anashin V.V., Batrakov A.M. et al.* // Proc. of RUPAC'18. Protvino, Russia, 2018. P. 7. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-MOXMH02>
3. *Timoshenko M.V., Aktershev Yu., Belikov O.V. et al.* // Proc. of RUPAC'21. Alushta, Russia, 2021. P. 28. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2021-TUY01>
4. *Danilov V.V., Ivanov P.M., Koop I.A., et al.* // Proc. of EPAC'96. Sitges, Spain, 1996. P. 1149.
5. *Maltseva Yu.I., Andrianov A., Astrelina K. et al.* // Proc. of RuPAC'18. Protvino, Russia, 2018. P. 39.
6. *Shwartz D.B., Berkaev D.E., Bochek D.V. et al.* // Proc. Of IPAC. Dresden, Germany, 2014. P. 102. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-MO-PRO018>
7. *Rastigeev S.A., Aktershev Yu.S., Bedarev E.V. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20. № 4. P. 866. <https://doi.org/10.1134/S1547477123040556>

ЗАПРЕЩЕННЫЕ ПОЛОСЫ БЕТАТРОННЫХ ЧАСТОТ В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-2000¹

© 2025 г. Д. Э. Чистяков^{a, b, *}, Е. А. Переведенцев^{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: d.e.chistyakov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 8.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

Соленоиды финального фокуса электрон-позитронного коллайдера с круглыми пучками ВЭПП-2000 могут создавать запрещенные полосы на плоскости бетатронных частот. Это ограничивает важную для коллайдера область вблизи параметрических резонансов (малых дробных частей бетатронных частот). Представлен теоретический обзор совместного действия эффектов от неточной компенсации соленоидов и параметрических резонансов на целых частотах. Результаты дополнены численными расчетами и моделированием с помощью программы RING. Из эксперимента найдены границы области устойчивости на плоскости бетатронных частот, их положение согласуется с теоретическим ожиданием.

DOI: 10.31857/S0032816225070071

1. ВВЕДЕНИЕ

Наличие связи бетатронных колебаний, например из-за нескомпенсированного поворота плоскости колебаний от соленоидов финального фокуса коллайдера ВЭПП-2000 [1], приводит к появлению запрещенных полос специального вида на плоскости бетатронных частот. Такого рода ограничение вместе с различными машинными резонансами сужает рабочую область бетатронных частот. Для помещения рабочей точки в максимально эффективную для коллайдера область малых дробных частей бетатронных частот необходимо контролировать, т.е. уменьшать влияние совместного эффекта запрещенных полос и резонансов на целых частотах.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При описании линейного поперечного движения частиц в циклическом ускорителе с учетом связи бетатронных колебаний используется матричный формализм. Положение частиц задается четырехмерными векторами вида $X^T = (x, p_x, y, p_y)$. В этих терминах можно описать совместное действие резонансов и запрещенных полос.

2.1. Определяющие резонансы

Выражение для амплитуды резонанса на целой частоте можно получить, используя теорию возмущений. К примеру, пусть в системе без связи введено возмущение магнитной системы $G^T = (0, x \cdot g^x(s), 0, 0)$ для колебаний $x, y \equiv 0$.

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

Ввиду отсутствия связи решение для колебаний по оси x может быть найдено из исходных 4-векторов Флоке

$$F_x^T = \left(w_x, w'_x + \frac{i}{w_x}, 0, 0 \right) e^{i\Psi_x}$$

(w_x – огибающая бетатронных колебаний) в виде

$$X = \frac{1}{2} (AF_x + A^* F_x^*), \quad (1)$$

здесь $A = a(s)e^{i\Delta\varphi(s)}$, где $a(s)$ и $\varphi(s)$ – медленные относительно бетатронной частоты функции. В таком случае известно уравнение на A [2]:

$$A' = -iF_x^{*T} S G, \quad (2)$$

где

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ -1 & 0 & & \\ & & 0 & 1 \\ 0 & & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

В случае полуцелого резонанса ($\nu_x = k/2 + \Delta$) после усреднения по быстрой фазе

$$\Psi_x = \left(\frac{k}{2} + \Delta \right) \frac{s}{R} + \chi_x(s)$$

при малой расстройке Δ получаем

$$a' + ia\varphi' = -\frac{i}{2} g_k^x a e^{-i\left(2\Delta\frac{s}{R} + 2\varphi\right)}, \quad (3)$$

где за амплитуду полуцелого резонанса взята усредненная по периоду структуры величина

$$g_k^x = \frac{1}{2\pi R} \cdot w_x^2(s) g^x(s) e^{-i\left(k\frac{s}{R} + 2\chi_x(s)\right)} ds. \quad (4)$$

Аналогичные выкладки можно провести и для y колебаний для получения амплитуды g_k^y .

Кроме упомянутых выше резонансов существует разностный ($\nu_x - \nu_y = n + \Delta$) и суммовый ($\nu_x + \nu_y = n + \Delta$) резонансы связи, их амплитуды соответственно равны [3]

$$C = \frac{1}{2\pi R} \oint w_x w_y (C_{field}) e^{-i\left(\chi_x - \chi_y + \frac{ns}{R}\right)} ds, \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{2\pi R} \oint w_x w_y (S_{field}) e^{-i\left(\chi_x + \chi_y + \frac{ns}{R}\right)} ds, \quad (6)$$

где

$$C_{field} = q + \frac{L}{2} \left(\frac{w'_y}{w_y} - \frac{w'_x}{w_x} \right) + i \frac{L}{2} \left(\frac{1}{w_x^2} + \frac{1}{w_y^2} \right),$$

$$S_{field} = q + \frac{L}{2} \left(\frac{w'_y}{w_y} - \frac{w'_x}{w_x} \right) + i \frac{L}{2} \left(\frac{1}{w_x^2} - \frac{1}{w_y^2} \right),$$

$$q = \frac{e}{2pc} \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} - \frac{\partial B_y}{\partial y} \right), \quad L = \frac{eB_s}{pc}.$$

2.2. Матрица периода

При известных огибающих функциях и в отсутствие связи матрица периода для одной степени свободы записывается в виде

$$M_0 = \begin{pmatrix} c_0 - w_0 w'_0 s_0 & w_0^2 s_0 \\ -\left(w_0'^2 + \frac{1}{w_0^2} \right) s_0 & c_0 + w_0 w'_0 s_0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $c_0 = \cos \mu_0$, $s_0 = \sin \mu_0$, $\mu_0 = 2\pi\nu_0$ – набег бетатронной фазы за период.

Учет уединенного резонанса на целой частоте можно сделать, продолжая выкладки теории возмущений (1)–(4) из предыдущего раздела. Новая матрица периода будет построена из возмущенных векторов Флоке F_a и F_b , а также их собственных чисел λ (набегов бетатронных фаз) следующим образом:

$$M = (F_a F_b) \cdot \begin{pmatrix} \lambda_a & 0 \\ 0 & \lambda_b \end{pmatrix} \cdot (F_a F_b)^{-1}, \quad (8)$$

где $(F_a F_b)$ – матрица 2×2 , составленная из двух векторов-столбцов.

Рассчитанные таким образом элементы матрицы M соответственно равны

$$m_{11} = c_r - s_r \frac{w'w(\delta + g_k c_\theta) - g_k s_\theta}{r},$$

$$m_{12} = s_r \frac{w^2(\delta + g_k c_\theta)}{r}, \quad (9)$$

$$m_{21} = -s_r \left\{ A_m \frac{\delta}{r} + (B_m c_\theta - C_m s_\theta) \cdot \frac{g_k}{r} \right\},$$

$$m_{22} = c_r + s_r \frac{w'w(\delta + g_k c_\theta) - g_k s_\theta}{r},$$

где g_k – модуль амплитуды соответствующего резонанса (4), α – его комплексная фаза,

$$\delta = \frac{2\Delta}{R}, \quad c_r = \cos\left(\frac{1}{2}sr\right), \quad s_r = \sin\left(\frac{1}{2}sr\right),$$

$$r = \sqrt{\delta^2 - g_k^2}, \quad c_\theta = \cos(\alpha - \delta s + 2\Psi),$$

$$s_\theta = \sin(\alpha - \delta s + 2\Psi), \quad A_m = \left(w'^2 + \frac{1}{w^2} \right),$$

$$B_m = \left(w'^2 - \frac{1}{w^2} \right), \quad C_m = 2 \frac{w'}{w}.$$

Для двух степеней свободы матрица периода 4×4 без связи запишется в виде

$$M_4 = \begin{pmatrix} M_x & 0 \\ 0 & M_y \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где за $M_{x,y}$ можно взять (7) или (8) для соответствующей степени свободы.

Связь бетатронных колебаний из-за соленоидов можно описать, например, с помощью тонкой матрицы поворота плоскости колебаний на угол φ :

$$R = \begin{pmatrix} I \cdot \cos \varphi & I \cdot \sin \varphi \\ -I \cdot \sin \varphi & I \cdot \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где I – единичная матрица 2×2 .

Тогда новая матрица периода будет выражена произведением

$$M_{tot} = R \cdot M_4. \quad (12)$$

2.3. Запрещенные полосы бетатронных частот

Появление запрещенных полос бетатронных частот обусловлено тем, что при внедрении возмущения не всем начальным частотам соответствуют устойчивые решения.

В общем случае устойчивое решение соответствует условиям

$$|\cos \mu| \leq 1, \quad (13)$$

$$\text{Im}(\cos \mu) = 0. \quad (14)$$

При переходе к двумерным колебаниям запрещенные полосы превращаются в запрещенные области. Так, для x и y матриц (7) с возмущением R можно найти собственные числа $e^{\pm i\mu_{1,2}}$ возмущенной матрицы периода (12). Набеги бетатронных фаз за новый период задаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \cos \mu_{1,2} = & \cos \frac{\mu_{0x} + \mu_{0y}}{2} \cos \frac{\mu_{0x} - \mu_{0y}}{2} \cos \varphi \pm \\ & \pm \sqrt{\sin^2 \frac{\mu_{0x} + \mu_{0y}}{2} \left(1 - \cos^2 \frac{\mu_{0x} - \mu_{0y}}{2} \cos^2 \varphi \right) + B \sin \mu_{0x} \sin \mu_{0y} \sin^2 \varphi}, \quad (15) \\ \text{где } B = & \frac{1}{4} \left\{ \left(\frac{w_{0x}}{w_{0y}} - \frac{w_{0y}}{w_{0x}} \right)^2 + \left(w_{0x} w'_{0y} - w_{0y} w'_{0x} \right)^2 \right\}, \end{aligned}$$

а значения огибающих функций взяты в начальной точке.

Тогда запрещенные области, выделенные розовым цветом, выглядят так, как показано на рис. 1.

Кроме запрещенных областей и их границ можно отобразить линии уровня новых коси-

нусов набега бетатронной фазы (рис. 2). Здесь линии уровня красного и синего цветов соответствуют двум новым косинусам, розовые области – запрещенные. На плоскости возмущенных частот эти линии уровня переходят в обычную прямоугольную сетку, $v_{x,y} = \text{const}$.

На рис. 3 представлен результат численного расчета запрещенных областей, отмеченных красным цветом, для случая совместного действия резонансов на целых частотах и поворота от соленоидов. Матрица периода выражена произведением матриц (8) и возмущения R с параметрами связи, близкими к рис. 2, и разными амплитудами резонансов.

В целом, присутствие резонансов на целых частотах искажает повторяющуюся картину рис. 2 вблизи этих целых частот; при отдалении от них, в других клетках, картина восстанавливается. На рис. 4 параметры резонансов следующие: $g^x = 0.12$, $g^y = 0.08$, $\alpha^x = 2\pi \cdot 0.2$, $\alpha^y = 0$.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПРОГРАММЕ RING

Для облегчения понимания экспериментальных данных было проведено моделирование устойчивости движения на программе RING в исходной линейной оптике коллайдера ВЭПП2000 с целыми частями бетатронных частот $v_x = 4$, $v_y = 2$. В этой оптике соленоиды финального фокуса в каждом из двух мест встречи попарно скомпенсированы (суммарно не вращают плоскость бетатронных колебаний).

Пусть нарушение компенсации соленоидов представлено бесконечно тонким элементом,

вращающим плоскость бетатронных колебаний на малый угол, при этом пренебрегается возмущение фокусировки соленоидов. Расположение этого элемента у одного из соленоидов и описание его матрицей (11) с углом $\varphi = 2\pi \cdot 0.05$ дает результат, показанный на рис. 5.

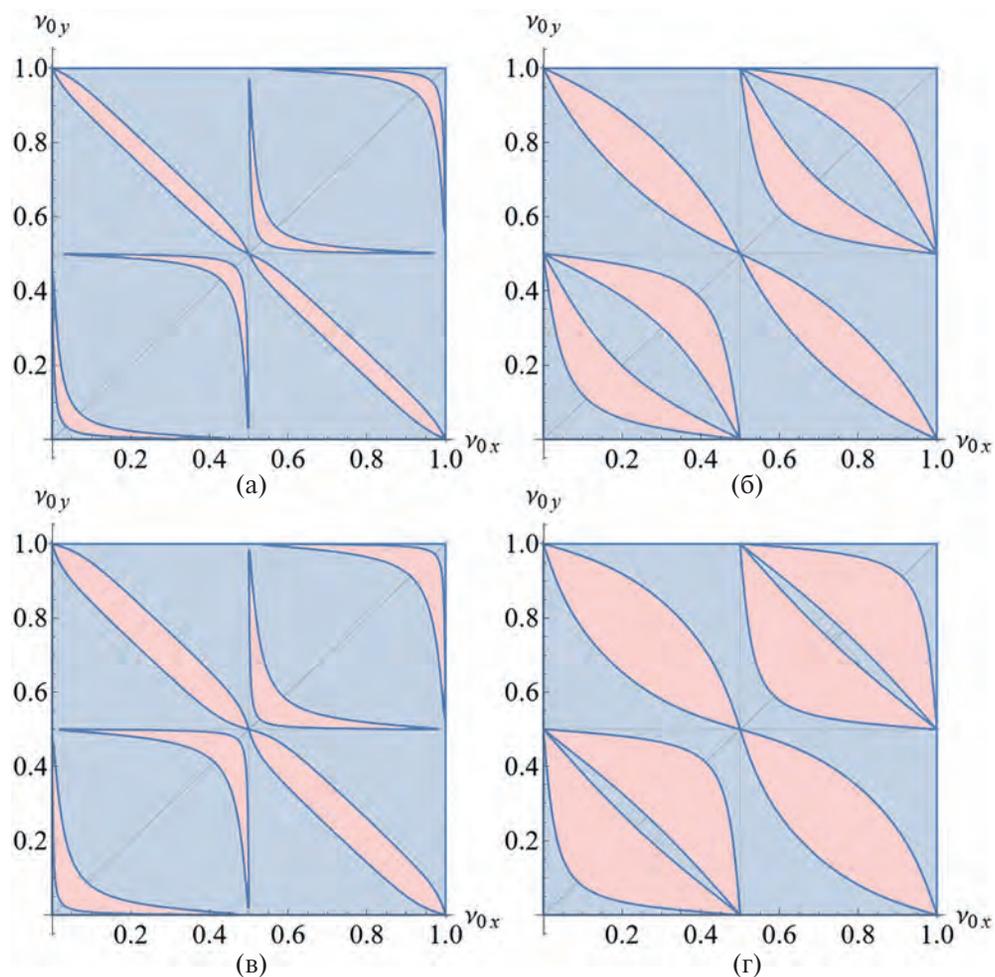


Рис. 1. Запрещенные полосы бетатронных частот при возмущении поворотом: **а** – $\varphi = 2\pi \cdot 0.05$, $B = 0.125$; **б** – $\varphi = 2\pi \cdot 0.15$, $B = 0.125$; **в** – $\varphi = 2\pi \cdot 0.05$, $B = 0.375$; **г** – $\varphi = 2\pi \cdot 0.15$, $B = 0.375$.

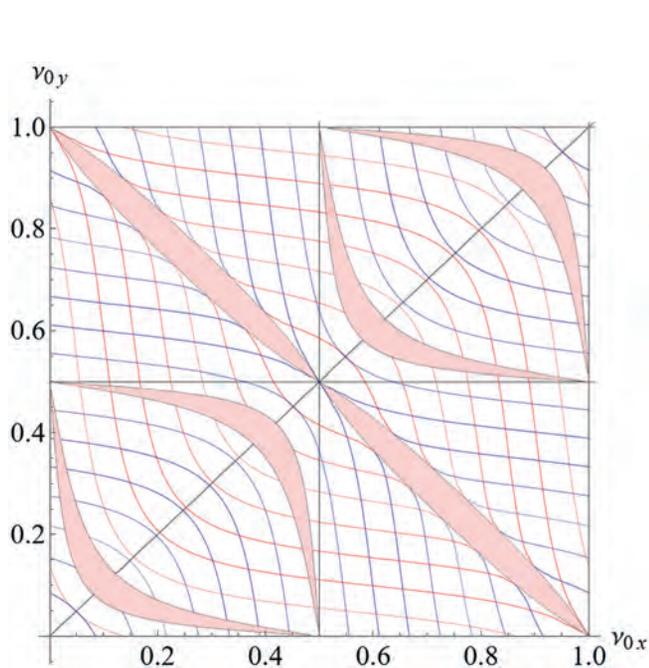


Рис. 2. Линии уровня косинусов набегу бетатронной фазы.

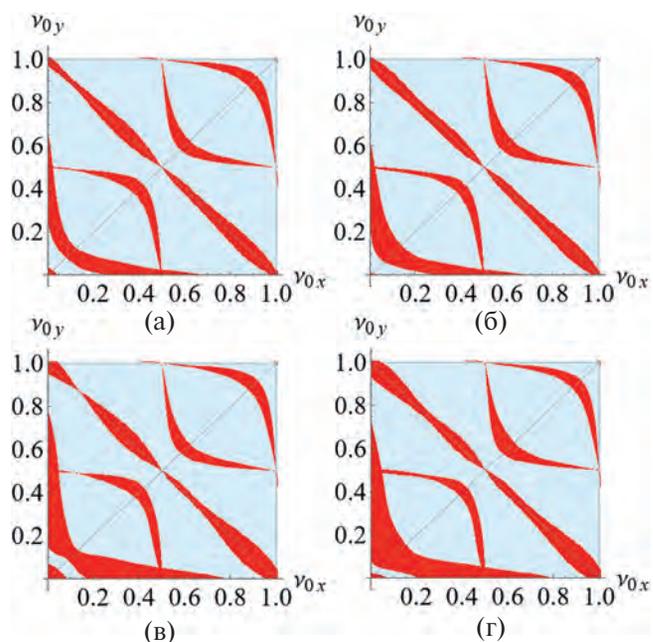


Рис. 3. Совместное действие резонансов и соленоидов: **а** – $g^{x,y} = 0.05$, $\alpha^{x,y} = 0$; **б** – $g^{x,y} = 0.05$, $\alpha^x = \pi \cdot 0.5$, $\alpha^y = 0$; **в** – $g^{x,y} = 0.1$, $\alpha^{x,y} = 0$; **г** – $g^{x,y} = 0.1$, $\alpha^x = \pi \cdot 0.5$, $\alpha^y = 0$.

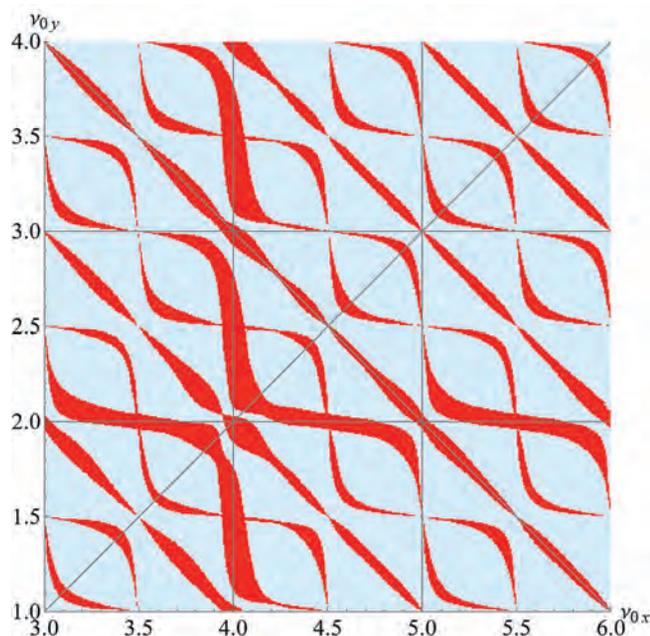


Рис. 4. Совместное действие резонансов и соленоидов. На плоскости частот показано несколько клеток.

Здесь слева представлена плоскость невозмущенных частот, а справа — возмущенных, т.е. исходная рабочая точка на плоскости слева под воздействием возмущения связи переходит в другое место на плоскости справа. Для наглядности серии точек разделены цветами.

Таким образом, с помощью моделирования показано, что край запрещенной зоны, вызванной возмущением связи в виде тонкого элемента кручения, переходит в линии на целых возмущенных частотах.

На реальной установке возмущение связи создается нарушением компенсации соленоидов. Иначе говоря, чтобы создать угол из формулы (15), необходимо усилить или ослабить поле соленоидов, при этом также изменятся его фокусирующие свойства. По этой причине картина моделирования предсказуемо приобретет отличия от ожидаемой. Результат моделирования с суммарным углом кручения $\varphi = 2\pi \cdot 0.01$ приведен на рис. 6, однако граница запрещенных областей по-прежнему соответствует целым частотам.

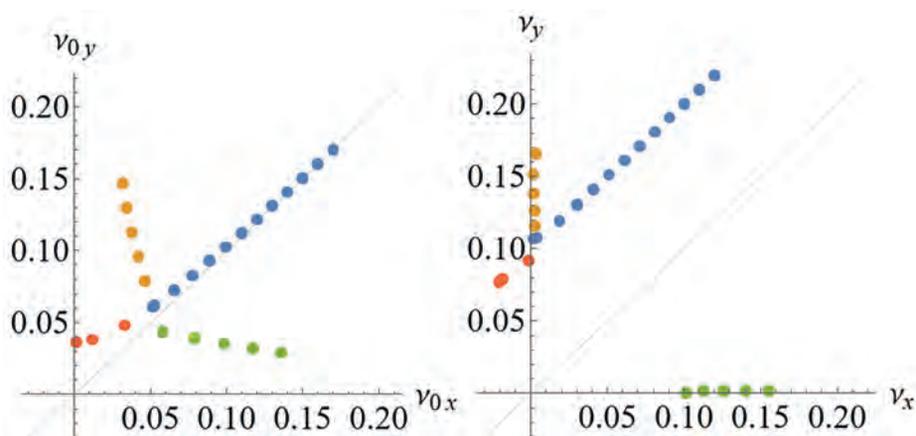


Рис. 5. Моделирование с элементом кручения нулевой длины.

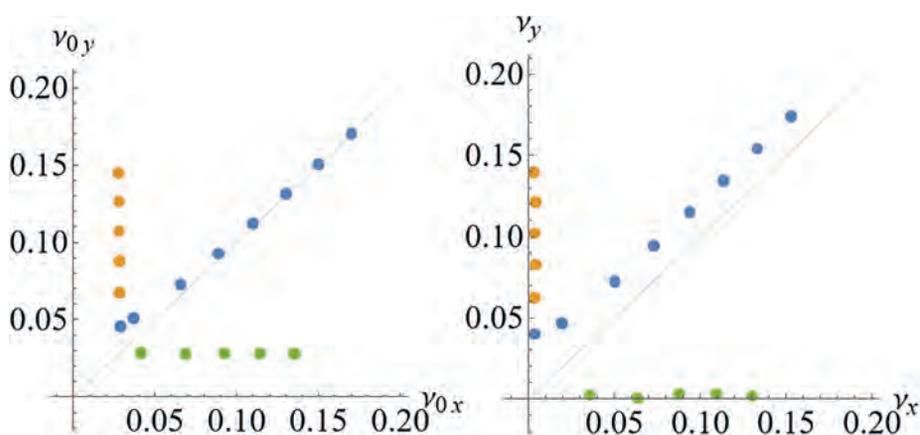


Рис. 6. Моделирование с изменением полей соленоидов.

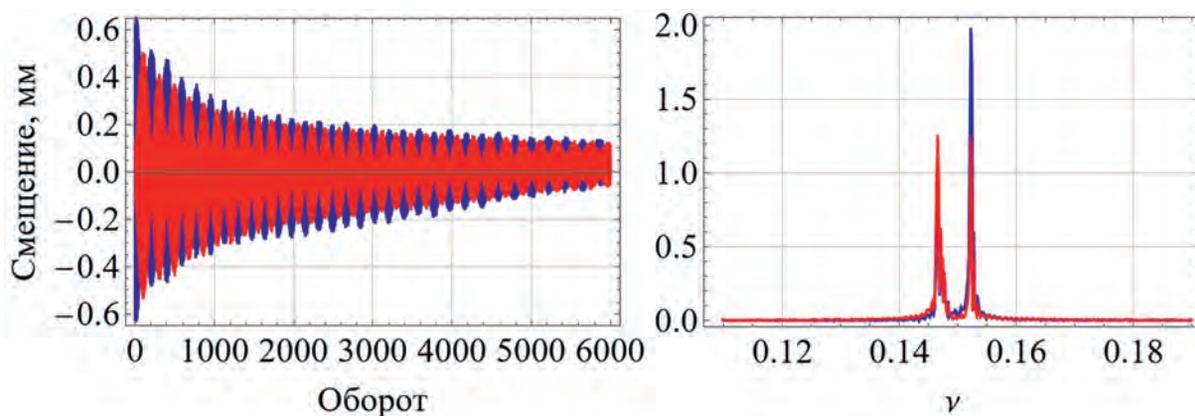


Рис. 7. История колебаний пучка и ее спектр по координатам x и y .

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Картина реальных запрещенных областей была экспериментально изучена на коллайдере ВЭПП2000 с одиночным пучком электронов. Из истории колебаний пучка, возбужденных ударом, с помощью фурье-преобразования определялось положение рабочей точки [4]. Типичный вид данных вблизи разностного резонанса связи показан на рис. 7.

Помимо этого, велось измерение времени жизни пучка путем численной аппроксимации токовой зависимости от времени с характерным временем спада $\tau = -I / \dot{I}$. При нормаль-

ной работе комплекса время жизни составляет порядка 4000 с.

Положение запрещенных областей было снято в наиболее интересной области малых дробных частей бетатронных частот. Перемещение рабочей точки имеющимися на пультовой коллайдера “ручками” дало следующую картину времени жизни, изображенную на рис. 8.

Резкий спад времени жизни вызван приближением к краям запрещенных областей, при котором нарастают биения бета-функций, и пучок начинает быстрее гибнуть, не попадая в динамическую апертуру.

Таким образом, экспериментально найдено положение границы устойчивости и, следовательно, края запрещенной зоны. Форма этой границы создана совместным действием определяющих резонансов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качественно представлены причины появления запрещенных полос бетатронных частот, их расположение и форма, а также результаты численного моделирования границ устойчивости на программе RING и экспериментально измеренное положение линий равного времени жизни на плоскости бетатронных частот ВЭПП-2000. Расширение рабочей области сводится к уменьшению резонансных амплитуд указанных в работе резонансов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркаев Д.Е., Шварц Д.Б., Шатунов П.Ю., Роговский Ю.А., Романов А.Л., Кооп И.А., Шату-

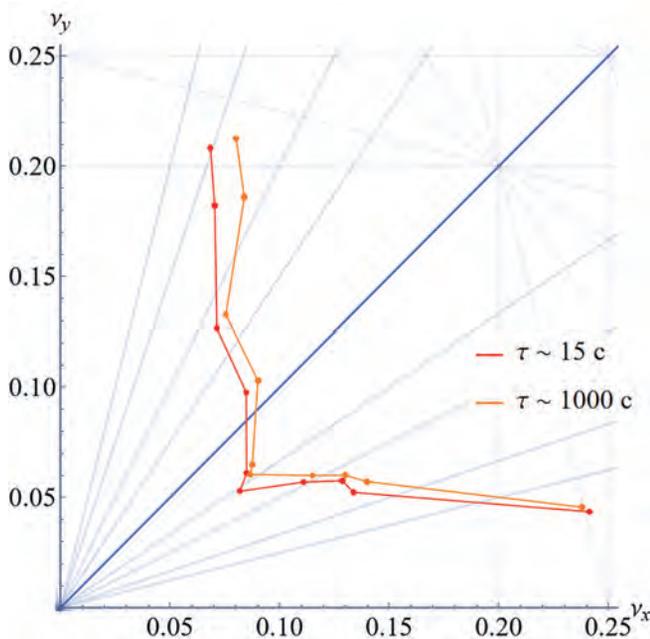


Рис. 8. Линии равного времени жизни.

- нов Ю.М., Землянский И.М., Лысенко А.П., Переведенцев Е.А., Станкевич А.С., Сенченко А.И., Хазин Б.И., Анисенков А.В., Гаязов С.Е. и др. // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. С. 247.
2. *Perevedentsev E.A.* // AIP Conf. Proc. 2001. V. 592. P. 6. <https://doi.org/10.1063/1.1420408>
3. *Guignard G.* The General Theory of All Sum and Difference Resonances in a Three-Dimensional Magnetic Field in a Synchrotron. Geneva: CERN, 1976. P. 74.
4. *Rogovsky Yu. A., Bekhtenev E.A.* // Proceedings of DIPAC2011. Hamburg, Germany. 2011. P. 203.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНЫМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОМ ИЯФ СО РАН¹

© 2025 г. Л. А. Кутнякова^{a, *}, Е. С. Константинов^b, А. В. Петрожицкий^{a, b, c},
С. А. Растигеев^b, В. Б. Рева^b

^a *Институт археологии и этнографии Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 17*

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

^c *Центр коллективного пользования “УМС НГУ-ННЦ”
Новосибирского государственного университета
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

* e-mail: bkharat.mail@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 29.03.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

Описаны основные принципы создания системы автоматизации ускорительного масс-спектрометра, который был создан Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера в рамках интеграционного проекта для нужд институтов Сибирского отделения РАН по оригинальному проекту. Установка представляет собой ионный ускоритель-тандем с перезарядной мишенью с энергией частиц до 4 МэВ. Для управления установкой разработана распределенная система управления, что позволяет упростить модернизацию программных и аппаратных компонент комплекса. Использование среды LabVIEW для создания управляющих программ и пользовательских интерфейсов облегчает адаптацию системы и позволяет повысить эффективность работы установки.

DOI: 10.31857/S0032816225070085

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод ускорительной масс-спектрометрии появился в 70-х годах XX века. В нем, в отличие от метода регистрации распадов, происходит прямой подсчет атомов радиоуглерода (¹⁴C) в образце. Работа ускорительного масс-спектрометра основана на формировании ионного пучка из углерода образца, последовательной очистке пучка от фоновых примесей и затем непосредственном подсчете ионов ¹⁴C. Метод применим не только для изотопов углерода, с его помощью можно измерять содержание в образце и других редких долгоживущих космогенных и антропогенных изотопов, таких как ¹⁰Be, ²⁶Al, ¹²⁹I и др. Ускорительный масс-спектро-

метр (УМС) ИЯФ СОРАН был создан Институтом ядерной физики им. Будкера в рамках интеграционного проекта для нужд институтов Сибирского отделения РАН по оригинальному проекту [1]. Основное назначение УМС ИЯФ СО РАН это радиоуглеродные (¹⁴C) измерения образцов пользователей, которые он успешно проводит с 2011 г. [2]. После запуска ускоритель в течение 10 лет являлся единственным в России ускорительным масс-спектрометром. Установка представляет собой ионный ускоритель-тандем с перезарядной мишенью с энергией частиц до 4 МэВ, она построена по оригинальному проекту и имеет следующие отличительные параметры: тандемный электростатический ускоритель на интегрированном в структуру умножителе

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

с напряжением +1 МВ на терминале с вертикальным расположением ускорительных трубок, перезарядка ионов C^- в состояние C^{3+} в мишени на основе пара магния, эффективное многоступенчатое подавление фоновых ионов [3] (в поворотных магнитах на входе и на выходе из ускорителя, в магниевой мишени, в 180-градусном электростатическом повороте перед второй ускорительной трубкой), времяпролетный финальный детектор, дополнительно отсеивающий фоновые ионы. Чувствительность УМС составляет $10^{-15} \text{ }^{14}C/^{12}C$, что позволяет использовать для анализа пробы с эквивалентной массой углерода порядка 1 мг, а это дает возможность использовать установку как для минимально разрушающих методов анализа в археологии, так и для биомедицинских исследований [4, 5]. УМС ИЯФ успешно используется для радиоуглеродных (^{14}C) измерений с 2011 г., в 2017 г. установка была зарегистрирована как уникальная научная установка, а с 2020 г. работает в составе совместной радиоуглеродной лаборатории Golden Valley имеющей международный индекс GV.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

С момента создания установка проходила несколько этапов, развиваясь от концепта и прототипов, подтверждающих заложенные в нее идеи, к комплексу, работающему на нужды пользователей. В силу этого для управления и сбора данных используется несколько довольно разнородных систем, часть которых — коммерчески доступные системы с широкой поддержкой, однако многие разработаны в ИЯФ и довольно уникальны, например, электроника детектора в формфакторе КАМАК, поэтому для управления установкой была выбрана концепция распределенной программной системы с относительно изолированными сегментами. Это позволяет упростить модернизацию программных и аппаратных компонент комплекса, ввиду того, что не требуется, заменяя отдельную подсистему, вносить исправления в основную часть программного кода.

Структура ускорительного масс-спектрометра показана на рис. 1. Комплекс состоит из ионного источника с селектором на 23 образца, ускорителя тандемного типа с перезарядной магниевой мишенью и электростатическим поворотом в высоковольтном терминале, масс-спектрометра с времяпролетным детектором на выходе

и системы управления на базе одного компьютера архитектуры x86 под управлением ОС Windows.

Для получения тока ионов углерода в состоянии 1 — используется ионный источник распылительного типа с твердым катодом: в нем исследуемый образец является углеродным катодом, облучаемым пучком атомов цезия. Углеродные катоды предварительно химически подготовлены двухэтапным методом. На первом этапе из материала образца пользователя выделяется нужное вещество, не обменивавшееся углеродом с окружающей средой и, следовательно, несущее информацию о возрасте образца. Например, коллаген из костей или целлюлоза из древесины. На втором этапе, в процессе графитизации, из этого вещества выделяется чистый углерод. Твердый катод получается запрессовкой этого углерода в алюминиевый держатель.

Образцы вставлены в селектор, который представляет собой поворотный барабан на 23 позиции. Пучок отрицательных ионов поступает из источника в электростатический ускоритель-тандем с перезарядной мишенью. Такой тип ускорителя позволяет использовать ускоряющий промежуток для многократного ускорения постоянного тока ионов: входной пучок ускоряется положительным потенциалом 1 МВ и попадает в высоковольтный терминал — изолированную платформу, находящуюся под высоким потенциалом. Там на пути пучка находится магниевая перезарядная мишень, в которой ионы “обдираются” на атомах магния, меняя свое зарядовое состояние до 3+ (тем самым уничтожая молекулярные комплексы 14-й массы, такие как ^{13}CH , $^{12}CH_2$).

Теперь положительные ионы могут снова ускориться тем же ускоряющим промежуток, а так как заряд теперь утроенный, то общая набранная ионами энергия будет составлять 4 МэВ для ускоряющего напряжения 1 МВ. Электронно-оптическая система ускорителя построена так, чтобы осуществлять многократную (четырёхкратную, с учетом перезарядной мишени) фильтрацию целевых ионов в поворотных магнитах и электростатическом повороте [2]. На выходе ускорителя расположен масс-спектрометр с времяпролетным детектором, который осуществляет дополнительную селекцию (по скорости и вектору движения) входящих ионов, позволяя вести подсчет единичных атомов нужного изотопа.

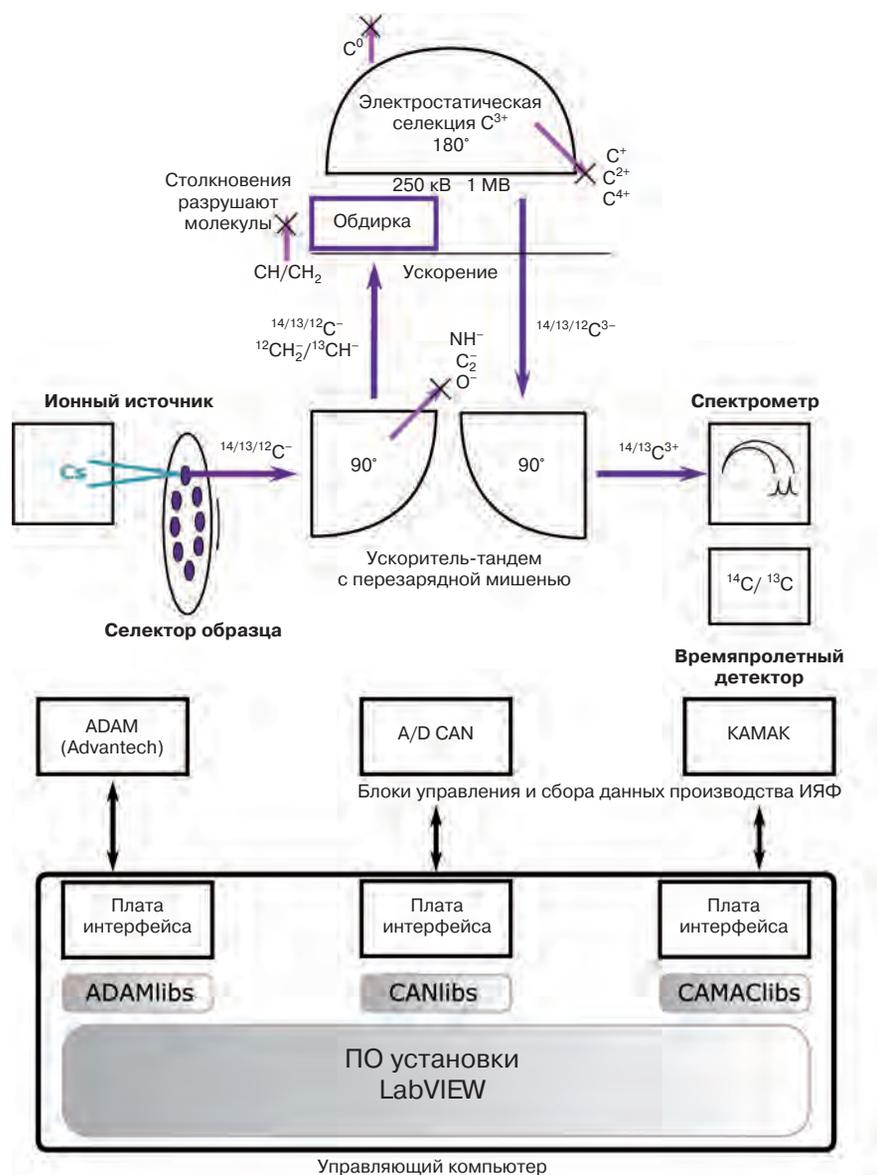


Рис. 1. Структура ускорительного масс-спектрометра.

3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Управляющие блоки и блоки сбора данных установки можно разделить на три группы: первая – это блоки промышленной автоматизации серии ADAM4000, подключенные к системе управления по интерфейсу RS485 (в том числе и с оптоволоконной развязкой – для блоков, находящихся в высоковольтном терминале). Вторая группа – блоки управления и сбора данных разработки ИЯФ, использующие интерфейс связи CANbus со специализированным протоколом, также разработанным в ИЯФ. И третья группа – это блоки управления на основе крейтов КАМАК. Для связи со всеми блоками используется один компьютер, оснащенный

всеми тремя типами интерфейсных плат. Вся система управления, включая библиотеки для работы с оборудованием, построена с использованием среды LabVIEW. Структура программного обеспечения комплекса показана на рис. 2 и может быть логически разделена на четыре слоя: уровень драйверов интерфейсов, уровень библиотек для аппаратных устройств, уровень управляющего ядра с машиной состояний, управляющей функционированием приложений последнего уровня, уровня пользовательских программ, через которые оператор взаимодействует с установкой.

Последние три уровня полностью реализованы с использованием среды LabVIEW, для передачи информации от ядра на уровень при-



Рис. 2. Структура программного обеспечения УМС.

кладных программ используется механизм глобальных переменных среды LabVIEW. Это позволило создать простой и в то же время достаточно формализованный канал передачи и получения ключевых данных состояния. Изначально это делалось, чтобы максимально разделить собственно управляющее ядро и уровень прикладных программ, однако эксплуатация показала, что такая архитектура позволяет обеспечить в том числе и бесперебойную модернизацию пользовательского программного обеспечения под нужды развития установки.

Механизм позволяет в том числе реализовывать путь модернизации программного комплекса через написание дополнительных приложений под конкретную задачу, что не требует длительной отладки и тестирования и позволяет

быстро реализовать требуемый функционал. Как пример можно привести реализацию автоподстройки положения центра образца в барабане селектора, обеспечивающую компенсацию смещений при установке для получения максимального качества ионного тока при проведении измерений. Подстройка была реализована как отдельная утилита, запускающаяся оператором перед стартом измерений. Автоподстройка поочередно настраивает с помощью шагового двигателя положение барабана, при котором достигается максимальный ток для каждой позиции, передает данные в ядро управления, и дальнейшие измерения образцов проходят уже с найденными положениями селектора. Такое архитектурное решение, с разделением уровня представления устройств и уровня прикладных

программ и имплементацией некоего стандартизированного протокола для передачи данных между ними часто встречается в системах управления сложными комплексами. Однако обычно это реализуется в виде довольно сложных многопроцессорных и многосерверных систем в концепции клиент-серверного взаимодействия. Реализация логики работы комплекса при этом разделяется на критически важную часть, которая обеспечивается специальными аппаратными устройствами (типа ПЛК) с аппаратными же блокировками устройств, и часть уровня пользователя, которая уходит в состав прикладных приложений. Однако такой подход для системы управления УМС был бы, на взгляд авторов, неоправданным, как по затрачиваемым ресурсам, так и по потенциалу и, главное, требуемым ресурсам на модернизацию и развитие системы управления. Выбранный подход с выделенным отдельно ядром системы управления, сопрягающейся с прикладными программами, работающими в среде LabVIEW через механизм глобальных переменных этой среды, позволил создать гибкую, не требовательную к ресурсам систему, т.е. управление надежно работает с использованием единственного довольно слабого компьютера.

На рис. 3 слева показан типичный для обычного процесса измерения образцов интерфейс оператора. Основная часть информации показывает данные счетной статистики с детектора. Тут же сторожевой индикатор, который должен привлечь внимание оператора, если возникает (анализируемое по нескольким параметрам)

несоответствие в поступающих с детектора данных. Это позволяет оператору вовремя отреагировать на сбой набора статистики с образцов, которые иначе могут обесценить и забраковать весь сеанс сбора данных. В левой части этого экрана в дополнение показываются критические параметры ионного источника, ускорителя и вакуума. Поскольку и ионный источник, и ускоритель-тандем – это технически очень сложные устройства с большим количеством высоковольтных элементов, то деструктивные процессы в них, если они начинаются, редко приводят к мгновенной потере работоспособности, намного чаще это выглядит как нарастающие токи утечек и нарастающие по частоте высоковольтные пробои. Соответственно, данная часть с довольно детальной информацией, а не просто индикаторами – работа/ошибка, служит целям ранней диагностики проблем оператором установки. В штатной ситуации, когда все работает, эта часть не поглощает большого внимания оператора. Правый экран – экран контроля состояния ионного источника, он используется для работ по настройке установки.

На рис. 4 приведены результаты проведения измерений “барабана” тестовых образцов с известной заранее концентрацией радиоуглерода. Слева показаны обработанные данные набора статистики по каналам счета атомов ^{14}C и измерения тока ^{13}C . На правом – результаты определения концентрации радиоуглерода для каждого образца со статистической ошибкой порядка 1%.

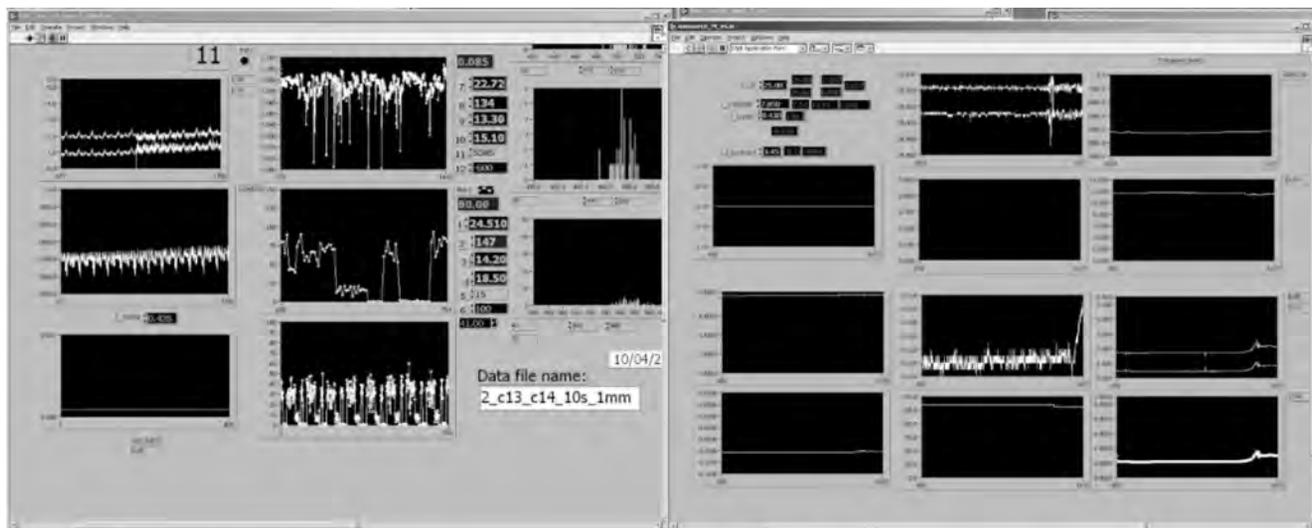


Рис. 3. Экран программ набора статистики (слева) и контроля ионного источника (справа).

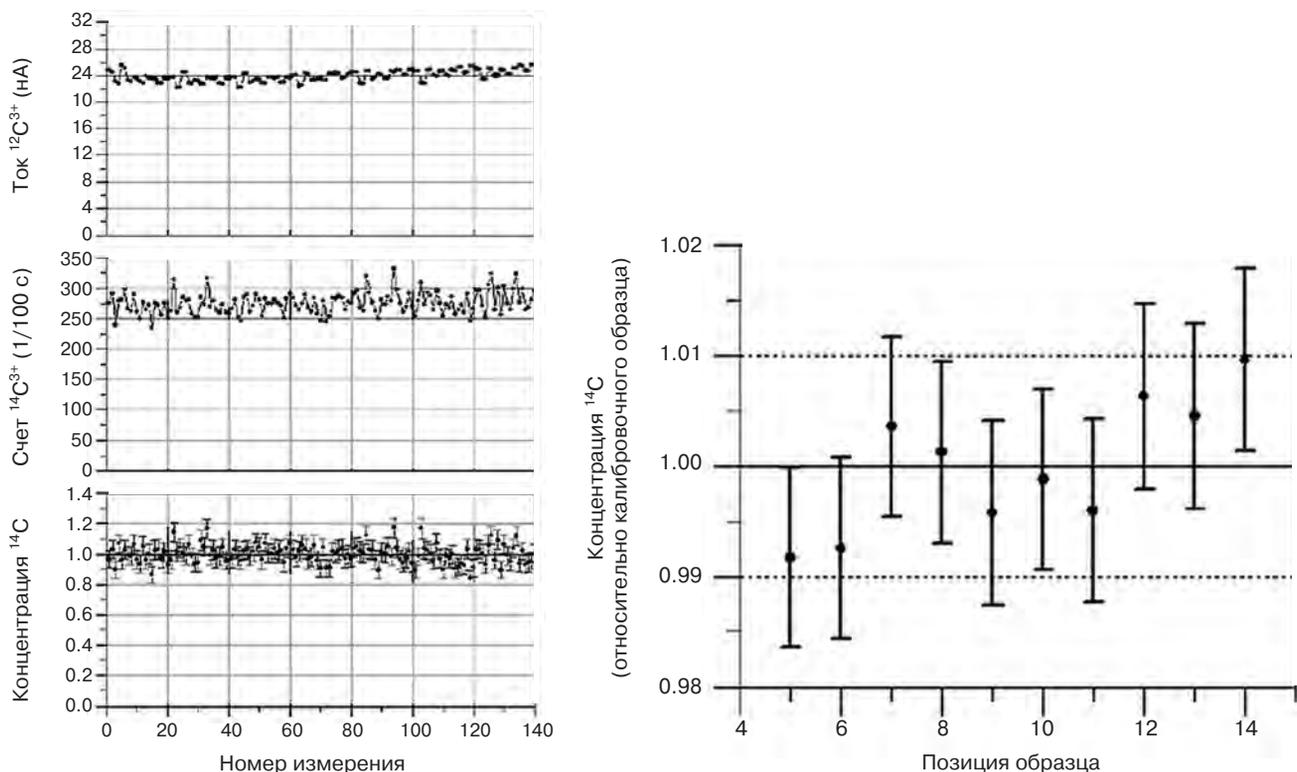


Рис. 4. Обработанные результаты набора статистики и полученные концентрации радиоуглерода для набора тестовых образцов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начав работу с образцами пользователей в 2011 г. в составе центра коллективного пользования ННЦ, установка продолжает использоваться для археологических, экологических и биомедицинских исследований, проводя радиоуглеродный анализ пользовательских образцов. В 2017 г. установка была зарегистрирована как уникальная научная установка, а с 2020 г. работает в составе совместной радиоуглеродной лаборатории Golden Valley, имеющей международный индекс GV, и в таком качестве успешно прошла международный кросс-тест GIRI по определению возраста археологических образцов [6].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиновский Н.И., Гончаров А.Д., Ключев В.Ф., Константинов С.Г., Константинов Е.С., Крючков А.М., Пархомчук В.В., Петриченко М.В., Растигеев С.А., Рева В.Б. // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 9. С. 107.
2. Растигеев С.А., Гончаров А.Д., Ключев В.Ф., Константинов Е.С., Кутнякова Л.А., Пархомчук В.В., Петрожицкий А.В., Фролов А.Р. // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13. № 7. С. 1438.
3. Пархомчук В.В., Растигеев С.А. // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9. № 4-5. С. 729.
4. Пархомчук Е.В., Петрожицкий А.В., Игнатов М.М., Кулешов Д.В., Калинин П.Н., Прокопьева Е.А., Кутнякова Л.А., Пархомчук В.В. // Траектория исследований – человек, природа, технологии. 2022. Т. 1. № 1. С. 61. https://doi.org/10.56564/27825264_2022_1_61
5. Rastigeev S.A., Frolov A.R., Goncharov A.D., Klyuev V.F., Konstantinov E.S., Kutnyakova L.A., Parkhomchuk V.V., Petrozhitskii A.V. // Phys. Part. Nuclei Lett. 2014. V. 11. № 5. P. 642. <http://doi.org/10.1134/S1547477114050240>
6. Petrozhitskiy A., Parkhomchuk E., Ignatov M., Kuleshov D., Kutnyakova L., Konstantinov E., Parkhomchuk V. // Radiocarbon Conference. 2024. P. 1. <http://doi.org/10.1017/RDC.2024.4>

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.384.63

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ НАСТРОЙКИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ¹

© 2025 г. Р. З. Мамутов^{a, b, c, *}, Г. Н. Баранов^{a, b, d, **}

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

^d Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

* e-mail: R.Mamutov@inp.nsk.su

** e-mail: G.N.Baranov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 28.04.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Реализовано прикладное программное обеспечение для автоматизации процедур настройки магнитооптической структуры циклических ускорителей. Описаны методы и алгоритмы, основанные на пучковых измерениях и позволяющие оператору быстро обрабатывать экспериментальные данные, полученные из системы диагностики ускорителя. Кроме того, программа служит высокоуровневым контроллером для управления магнитной системой и онлайн-мониторинга ее состояния. Инструмент протестирован и интегрирован в систему управления коллайдера ВЭПП-4М.

DOI: 10.31857/S0032816225070091

1. ВВЕДЕНИЕ

От качества магнитной структуры зависят многие ключевые параметры ускорителя: эмиттанс, светимость, яркость и др. Наличие неидеальностей в элементах неизбежно приводит к уменьшению производительности установки, что в свою очередь отрицательно сказывается на эффективности и точности проводимых экспериментов. Регулярный контроль и коррекция параметров магнитной структуры позволяют достичь проектных параметров ускорителя и поддерживать его состояние. Решение данных задач невозможно без использования специ-

ально разработанных программных систем. Более того, такие системы должны соответствовать актуальным требованиям разработки программного обеспечения (ПО) и постоянно развивающейся инфраструктуре ускорителя.

На ускорителях заряженных частиц проводятся исследования по фундаментальным и передовым направлениям физики высоких энергий, а также эксперименты с синхротронным излучением, исследования в области ядерной физики и других прикладных направлениях [1]. Поэтому контроль состояния магнитооптической структуры и ее улучшение крайне актуальны и необходимы. Для решения задачи

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

коррекции магнитной структуры ускорителей и, как следствие, для повышения производительности циклических ускорителей разрабатывается соответствующий программный инструмент SmartCorrection, в основе которого лежит прецизионный анализ пучковых данных. Такое программное обеспечение решает множество трудоемких задач при работе на ускорителе, таких как оперативный анализ экспериментальных данных, контроль состояния магнитной структуры в реальном времени, автоматизация получения экспериментальных данных и внесение корректирующих поправок в параметры для достижения необходимой конфигурации магнитной системы.

2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УСКОРИТЕЛЕМ

На рис. 1 в упрощенном и обобщенном виде представлена инфраструктура системы управления ускорителя. Работа с источниками питания магнитных элементов, системой диагностики пучка и интегральными параметрами ускорителя осуществляется посредством системных переменных, реализованных на серверном уровне и предоставленных с помощью определенных программных интерфейсов. Оператор и другие категории пользователей используют конечные пользовательские программы для управления установкой и ее системами. Как правило, системы диагностики пучка и управления магнитными элементами на основе автоматизированных систем управления [2–6] предоставляют сетевой доступ к параметрам системы. В частности, это делает опрос показаний датчиков положения пучка (ДПП) и токов источников питания, попадающих в общий доступ из сети комплекса после обработки серверными при-

ложениями, и их задание удобным, доступным и надежным.

Представленная программа относится к программному обеспечению верхнего уровня с пользовательским интерфейсом и предназначена для операторов, управляющих установкой, и физиков, моделирующих параметры ускорителя и пучка. По своему функциональному назначению у программы можно выделить несколько главных задач: сбор и предобработка “сырых” данных; последующий анализ экспериментальных данных, включающий вычислительно-емкие расчеты; высокоуровневое управление элементами и параметрами ускорителя; высокоуровневое архивирование и задание режимов работы установки; визуализация и мониторинг основных параметров магнитной структуры. Взаимодействие с ускорителем осуществляется посредством обращения к системным переменным. В контексте основной решаемой задачи программа обеспечивает автоматизацию операций управления, необходимых для реализации алгоритмов коррекции магнитооптической структуры.

Программа спроектирована таким образом, чтобы сделать вычислительную часть, связанную с моделированием ускорителя и анализом измеренных данных, универсальной и не зависимой от конкретной установки. Данная часть кода оформлена в отдельный модуль общего назначения, что позволяет проводить анализ структуры любого ускорителя, а также моделирование ускорителя и его параметров в отрыве от системы управления и графического интерфейса.

Таким образом, структурно программу можно разделить на три независимые или слабо зависимые компоненты: графический интерфейс, интерфейсы для взаимодействия с установкой и вычислительный модуль. Поскольку алгоритмы коррекции магнитооптической структуры по большей части одинаковы для всех циклических ускорителей, а широко распространенные платформы для разработки систем управления реализуются по похожим стандартам, программа легко адаптируется для использования на другой установке, что делает ее универсальной и гибкой.

3. АЛГОРИТМЫ НАСТРОЙКИ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Процедура коррекции магнитооптической структуры базируется на измерении и анализе откликов замкнутой орбиты пучка на пооче-



Рис. 1. Упрощенная схема взаимодействия с ускорителем.

редное изменение поля в каждом дипольном корректоре [7] или квадрупольной линзе [8] (в зависимости от задачи). Положение пучка регистрируется всеми ДПП, а составленная матрица из откликов является детальным источником информации о состоянии магнитной структуры и формирует основу экспериментальных данных. Помимо этого, дополнительно измеряются бетатронные частоты колебаний пучка, дисперсия орбиты и возбуждаемые бетатронные колебания пучка в ДПП [9]. Далее происходит подгонка измеренных данных модельными за счет варьирования параметров структуры. Для этого решается задача оптимизации: для каждой матрицы рассчитывается модельная матрица откликов и других параметров ускорителя. Таким способом можно извлекать информацию об имеющихся искажениях в структуре и источниках этих искажений, сравнивая модель и реальный ускоритель. В частности, можно определять ошибки в градиентах полей, физические смещения и повороты магнитных элементов и ДПП, калибровки ДПП и корректоров. Все эти возмущения искажают оптические функции ускорителя, влияют на динамику пучка и негативно сказываются на ключевых параметрах установки, а впоследствии ухудшают качество проводимых исследований на ускорителе.

В зависимости от размера ускорителя и количества его элементов вычислительная задача

может стать трудоемкой, поскольку число варьируемых параметров может возрасти. Более того, часто возникает необходимость разбивать существующие элементы в структуре на компоненты для увеличения точности при численном интегрировании или для корректности моделирования. При этом расчет параметров модели и подгонка экспериментальных данных может занимать часы, что затрудняет оперативную настройку ускорителя. Однако специфика решаемой обратной задачи позволяет увеличить скорость вычислений за счет GPU (Graphics Processing Unit) ускорения [10] и, что более важно, допускает параллельные вычисления за счет CPU (Central Processing Unit) [11]. Как известно, для операций с большими численными массивами отлично подходят вычисления на видеокартах. В данной работе GPU-ускорение используется совместно с CPU-ускорением. Варьирование параметра можно рассматривать как независимую вычислительную задачу, поэтому она хорошо ускоряется путем распределения отдельных подзадач по разным логическим процессорам компьютера. Более того, в программе предусмотрено объединение вычислительных устройств для организации распределенной вычислительной системы. Устройствам, находящимся в общей сети, делегируется часть общей вычислительной задачи и данных, и на каждом запускается необходимая расчет-

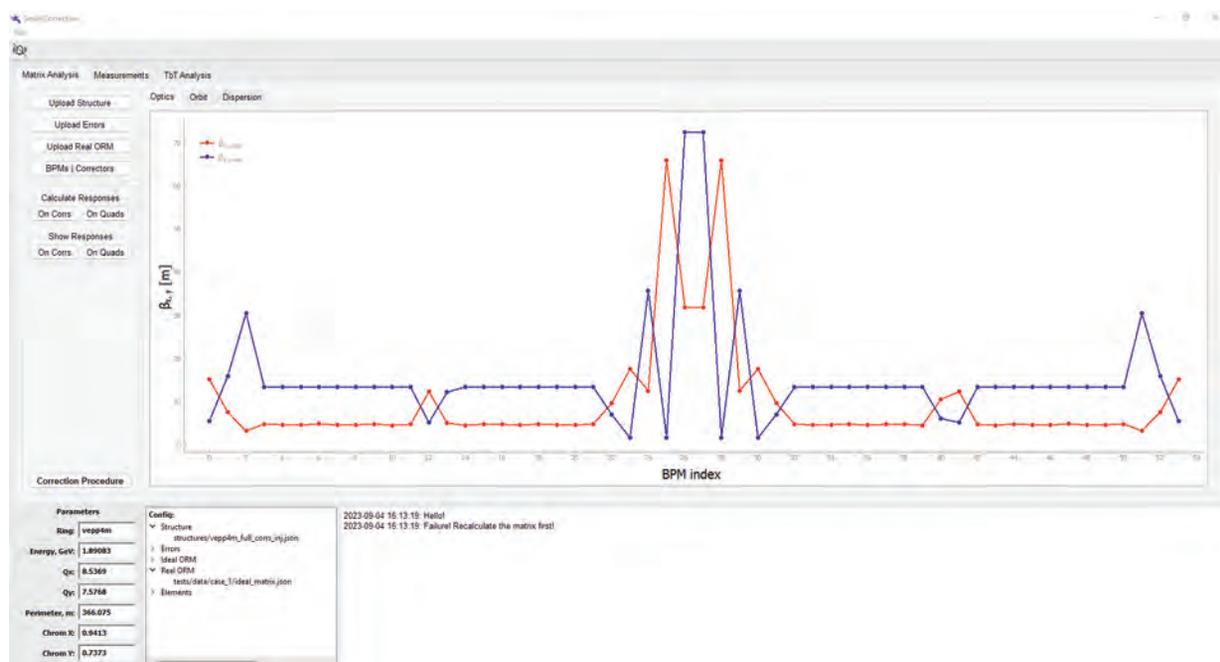


Рис. 2. Главное окно программы с модельными оптическими функциями ускорителя.

ная функция. Экземпляр программы, который является инициатором расчетов, затем выступает в роли сервера и ожидает результат вычислений от каждого устройства для дальнейшей обработки.

На рис. 2 представлено главное окно программы. Здесь осуществляется работа с файлами: загрузка структуры модели ускорителя, найденных искажений структуры, экспериментальных данных. Кроме того, рассчитываются и отображаются модельные оптические функции, являющиеся точным представлением магнитооптической структуры ускорителя. Крайне полезно просматривать и предварительно сопоставлять измеренные данные с модельными. Это позволяет делать первичные выводы о реальной структуре ускорителя и его компонентах, а также обнаруживать систематические ошибки, связанные с измерением и работой установки в целом. Поэтому для визуального контроля предусмотрено окно с графиками, представленное на рис. 3.

Для подгонки экспериментальных данных и задания уставок в источники питания элементов предусмотрена отдельная панель. В результате подгонки пользователь находит структуру со всеми искажениями, соответствующую реальной структуре ускорителя на момент измерения экспериментальных данных. Чтобы скорректировать структуру ускорителя до требуемой, пользователь задает рассчитанные поправки в источники питания элементов, а для части искажений, связанных с физической юстиров-

кой элементов, может потребоваться помощь технического персонала. При необходимости, повторив эксперимент и подгонку, пользователь может откалибровать модель ускорителя с учетом внесенных коррекций для дальнейшего использования и моделирования. На рис. 4 представлен интерфейс вычислительной процедуры. Панель позволяет:

- выбирать подгоночные параметры модели;
- выбирать алгоритм минимизации и число логических процессоров;
- решать обратную задачу: расчет якобиана, выбор сингулярных чисел, обращение матрицы и др.;
- выбирать желаемую итерацию подгонки, очищать и сохранять прогресс;
- составлять необходимые графики и таблицы в ходе прогресса;
- задавать в ускоритель найденные поправки в токах элементов и управлять режимами работы ускорителя.

Показанный на рис. 5 интерфейс предназначен для взаимодействия с ускорителем и получения экспериментальных данных. После подключения к системе управления ускорителя выполняется алгоритм “циклирования” дипольных корректоров и квадруольных линз. Для подготовки к эксперименту и обеспечения воспроизводимости результатов поле каждого магнита, согласно локальному циклу гистерезиса, меняется несколько раз, причем процедура осуществляется для всех магнитов одновременно таким образом, чтобы не разрушать пучок и сильно не искажать орбиту. Это позволяет существенно сократить время проведения всех циклов по отдельности. В этом случае процедура занимает не больше пары минут, тогда как поочередное выполнение магнитного цикла каждого магнита может занять значительное время. Далее реализуется алгоритм измерения матрицы откликов, когда по очереди в каждом магните изменяется поле и по ДПП фиксируется искажение орбиты пучка, которая в это время отслеживается по соответствующим графикам. Как правило, одна полная итерация измерения откликов на большой набор корректоров может занимать несколько часов.

Помимо коррекции магнитной структуры, реализована настройка орбиты: коррекция орбиты к целевой и создание локальных возмущений – “бампов”. Добавлены различные алгоритмы [12], которые по матрице откли-

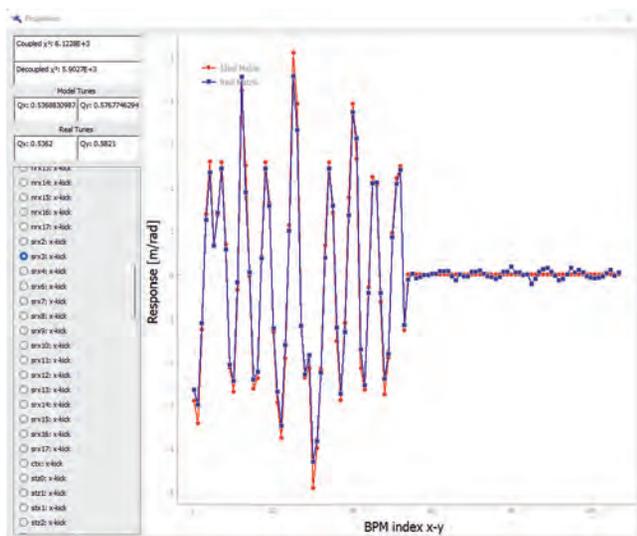


Рис. 3. Окно с визуализацией модельных и измеренных откликов на каждый магнитный элемент. На оси абсцисс продублированы номера датчиков для горизонтальных и вертикальных показаний.

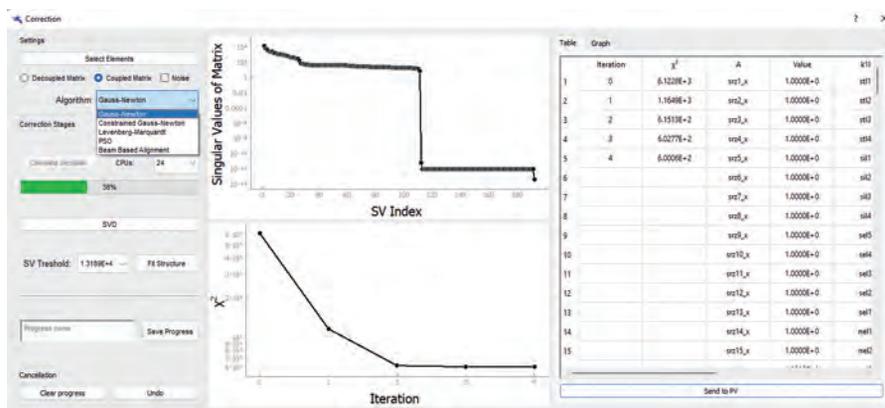


Рис. 4. Подгонка экспериментальных данных модельными. Справа расположена таблица с найденными искажениями структуры.



Рис. 5. Интерфейс взаимодействия с ускорителем: получение данных с ДПП и управление магнитными элементами.

ков вычисляют необходимые токовые добавки в дипольные корректоры. Контроль орбиты, безусловно, является важной частью работы: во-первых, ускоритель работает при фиксированной орбите пучка во время эксперимента; во-вторых, после манипуляций с измерением откликов рабочая орбита должна вернуться в исходное состояние, так же как возвращаются значения полей магнитов.

Независимый и оперативный контроль магнитной структуры основан на анализе возбуждаемых бетатронных колебаний пучка в ДПП. За счет гармонического анализа осцилляций пучка

удается определить оптические функции ускорителя и бетатронные частоты. На рис. 6 представлено окно, содержащее необходимый функционал. Важно отметить, что данный алгоритм используется как вспомогательный, позволяющий отслеживать динамику оптических функций во время основной коррекции методом матриц откликов.

В ходе работы программы формируется два журнала событий. Первый относится к эксперименту и анализу, второй, предназначенный для протоколирования и отладки внутренних событий программы, записывается в базу данных

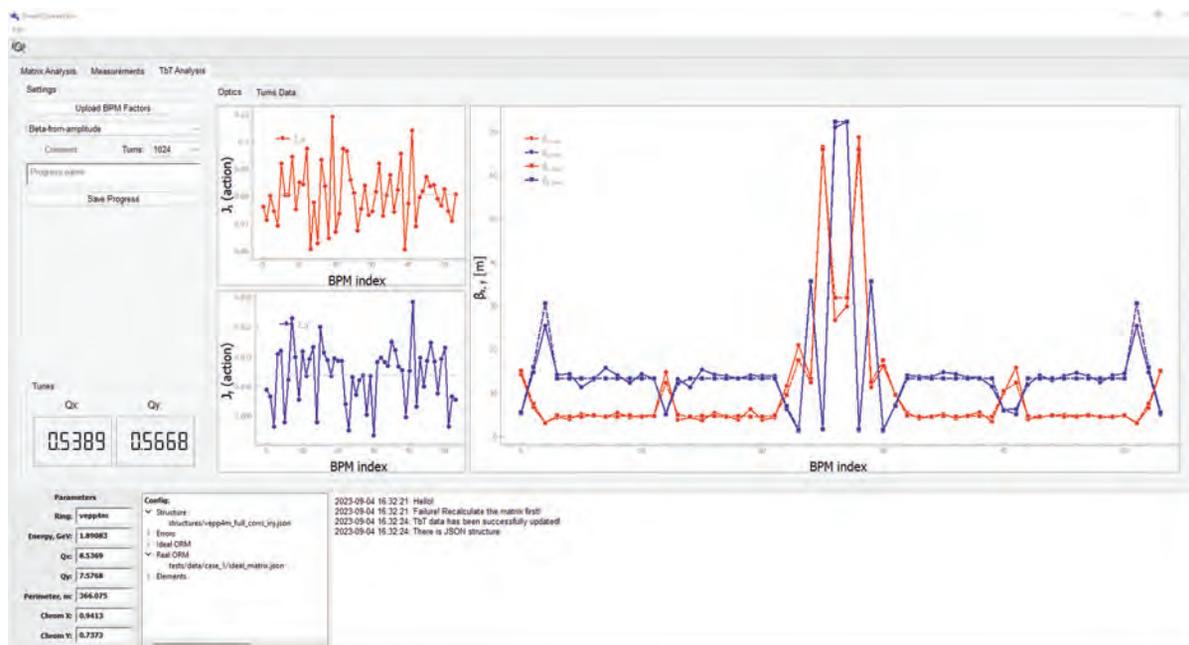


Рис. 6. Анализ возбуждаемых бетатронных колебаний пучка, полученных с ДПП. На графиках представлены восстановленные оптические функции.

PostgreSQL. Многие основные настройки программы указываются по умолчанию в специальном конфигурационном файле.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022–2023 гг. программа была внедрена в систему управления коллайдера ВЭПП-4М [13–15] и активно использовалась при настройке оптики установки. В ходе работы получены результаты, которые позволили улучшить состояние магнитной структуры установки, скорректировав оптические функции, обнаружить некорректно работающие элементы и откалибровать модель. Разработанная программа является надежным и неотъемлемым инструментом на ускорительном комплексе. Кроме того, ведется работа по достижению абсолютной универсальности в применении на других ускорителях с разными магнитными структурами и системами управления. Дальнейшее использование разработанной системы для получения наилучших параметров установок планируется на ускорителях ВЭПП-3, ВЭПП-5, ВЭПП-2000, а также на строящемся синхротроне СКИФ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и правительства Новосибирской области (грант РНФ № 22-12-20025

“Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами”). Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barbatat O.* Applications of particle accelerators. CERN-AC-90-04-DI-BLIT. CERN, 1990. <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-1994-001.841>
2. *Dalesio L.R., Kozubal A.J., Kraimer M.R.* EPICS architecture. New Mexico: Los Alamos National Lab, 1991. <https://www.osti.gov/biblio/6110347>
3. TANGO Controls. URL: <https://www.tango-controls.org/>
4. *Bolkhovityanov D., Cheblakov P.B., Emanov F.A.* // Proc. ICALEPCS'15. Melbourne: JACoW, 2015. P. 915. <http://dx.doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2015-WEPGF093>
5. *Singh S.* // Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Phys. 2010. V. 55. P. I18.
6. WinCC Open Architecture. URL: <https://www.wincco.com/>
7. *Safranek J.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1997. V. 388. Iss. 1–2. P. 27. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00309-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00309-4)

8. *Kim K., Huang J., Ko I.* // Japanese Journal of Applied Physics. 1999. V. 38. № 12R. P. 6926.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.38.6926>
9. *Alexahin Y., Gianfelice-Wendt E.* // JINST. 2011. V. 6. P. P10006.
<https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/6/10/P10006>
10. *Cook S.* CUDA Programming: A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2012.
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-00029-7>
11. *Chandrashekar B.N., Sanjay H.A., Srinivas T.* // International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS). Coimbatore: IEEE. 2021. P. 646.
<https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395977>
12. *Mirza S.H., Singh R., Forck P., Klingbeil H.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. Iss. 7. P. 072804.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.072804>
13. *Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Borin V.M., Dorokhov V.L., Karnaev S.E., Karyukina K. Yu., Kiselev V.A., Levichev E.B., Meshkov O.I., Mishnev S.I., Morozov I.A., Nikolaev I.B., Okunev O.N., Simonov E.A. et al.* // Proc. RuPAC'21. Alushta: JACoW Publishing, 2021. P. 34.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUA01>
14. *Бехтенов Е.А., Карпов Г.В., Пиминов П.А.* // ПТЭ. 2017. № 5. С. 78.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217050044>
15. *Bekhtenev E.A., Karpov G.V.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15. Iss. 7. P. 929.
<https://doi.org/10.1134/S1547477118070154>

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 533.9.07+62-52

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ АВТОМАТИКА АТОМАРНОГО ИНЖЕКТОРА С ЭНЕРГИЕЙ 15 кэВ¹

© 2025 г. В. В. Орешонок^{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: V.V.Oreshonok@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Атомарный инжектор на положительных ионах (водород, дейтерий) сравнительно низкой энергии 15 кэВ, но с рекордным током пучка 150 А был разработан в ИЯФ для нагрева плазмы в открытых ловушках и компактных токамаках. К вспомогательным системам инжектора относятся: система регулировки давления в газовых трассах, вакуумная система и система заправки крионасосов. Алгоритмы автоматки реализованы при помощи разработанного программируемого логического контроллера с четырехканальным асинхронным интерфейсом связи. Уровень полевой шины представлен промышленными модулями удаленного ввода-вывода и приборами с физическими интерфейсами RS-232/485. Интерфейс пользователя обеспечен посредством меню дисплея передней панели логического контроллера, а также программного обеспечения, реализованного в среде LabVIEW.

DOI: 10.31857/S0032816225070107

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальный образец атомарного инжектора на положительных ионах был спроектирован и изготовлен в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск) [1]. Параметры инжектора представлены в табл. 1. Он функционирует в импульсном режиме и производит сфокусированные пучки атомов водорода и дейтерия с низкой энергией и большой величиной тока, что обеспечивает высокую мощность инъекции для нагрева плазмы.

Таблица 1. Параметры инжектора

Параметр	Значение
Энергия пучка	15 кэВ
Ток пучка	150 А
Длительность импульса	30 мс

Инжектор состоит из ионного источника с генератором плазмы и ионно-оптической системой и вакуумного объема, в котором располагаются нейтрализатор, крионасос, поворотный магнит, приемники ионов, а также подвижный калориметр. Подсистемы обеспечения инжектора включают систему высоковольтного питания 15 кВ и мощностью 2.2 МВт, источники питания сеток и плазменного генератора, систему подачи рабочего газа и ряд других подсистем. Система управления инжектором реализована на базе промышленного компьютера с встраиваемыми модулями ввода-вывода реального времени.

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Вспомогательные подсистемы инжектора включают систему регулировки давления рабочего

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

газа, вакуумную систему, криосистему и водяную систему, которая не описана в данной статье.

Газовый коллектор состоит из монтажной панели на баке инжектора, а также импульсных клапанов плазменного генератора и нейтрализатора, управляемых в процессе инъекции. На газовой панели располагаются балластные объемы, клапаны регулировки давления, манометры и форвакуумный насос. Давление газа требуется регулировать независимо в отдельных каналах плазменного генератора и нейтрализатора с точностью ± 10 мбар.

Объем вакуумной камеры инжектора составляет около 4 м^3 . Вакуумная система включает два инструментальных насоса для разных диапазонов откачки. Спиральный безмасляный насос Edwards XDS35 обеспечивает форвакуум с давлением менее 10^{-1} Па, а турбомолекулярный насос Ebara EBТ1100 позволяет достичь высоковакуумных условий: давление составляет менее 10^{-6} Па. Вакуумный пост также оборудован шиберами и клапанами для осуществления обслуживающих процедур и защиты оборудования и персонала. Мониторинг давления в вакуумной камере осуществляется вакуумметрами Thyracont VSP63/VSH88.

Дополнительную производительность, позволяющую улучшить вакуум до давления менее 10^{-7} Па, обеспечивает крионасос, установленный в вакуумном объеме. Он имеет две криопанели и бак с жидким азотом емкостью 200 литров. Расход жидкого азота криосистемой инжектора составляет около одного бака в день. Это приводит к необходимости регулярной дозаправки, для чего система оснащена линией подачи жидкого азота с криоклапанами и монитором уровня криожидкостей Cryomagnetics LM-510. Для регистрации температуры азотной линии, а также температур криопанелей используется температурный монитор Lake Shore Model-218.

Требования, предъявляемые к автоматике вспомогательных систем инжектора, предусматривают наличие в ее составе программируемого логического контроллера (ПЛК) с интерфейсом оператора или реконфигурируемого интеллектуального модуля, обеспечивающего автономную работу в условиях отсутствия управляющего компьютера в процессе пусконаладочных работ и обслуживания. Система должна осуществлять управление автоматическими клапанами и шиберами, взаимодействовать с приборами, регистрировать давления, температуры, уровни,

реализовывать различные сценарии работы оборудования и гарантировать переход в безопасное состояние в случае возникновения аварийных ситуаций: неисправностей модулей, сбоев в работе установки и протечек в газовой, вакуумной или криосистеме. Для дополнительной защиты в алгоритме ПЛК должны быть предусмотрены настраиваемые сторожевые таймеры. Это позволит остановить текущий процесс на любом этапе при условии превышения отведенного на его выполнение времени. Интерфейс связи в составе ПЛК должен позволять обмен данными на расстояниях больших 50 м для взаимодействия с системой управления инжектором.

3. АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Система автоматизации построена с использованием распределенной архитектуры под управлением ПЛК. Оборудование системы располагается в зоне инжектора в небольшой 19-дюймовой стойке, а также на вакуумном баке, как показано на рис. 1. На уровне полевой шины использован физический интерфейс RS-485, причем каждая подсистема составляет независимый сегмент сети. Уровень представлен модулями удаленного ввода-вывода, а также



Рис. 1. Экспериментальная зона с инжектором.

измерительными приборами. В отдельных случаях использованы преобразователи последовательных интерфейсов.

В качестве ПЛК использован контроллер, который был разработан для решения задач автоматизации вспомогательных систем в предыдущих аналогичных проектах. Он представляет собой модуль в конструктиве 1U для 19-дюймовых стоек, оборудованный 32-битным микроконтроллером с архитектурой ARM Cortex-M4. Модуль имеет четыре независимых канала последовательной связи с заменяемыми платами физического интерфейса, что позволяет составить требуемую конфигурацию физических уровней для каждого из каналов, выбрав между RS-232/RS-485 или оптической линией. На передней панели ПЛК находится символьный дисплей и кнопки меню, что обеспечивает реализацию простого, но достаточного для оперативного персонала интерфейса взаимодействия. Интерфейс связи обеспечивается TCP-каналом 100 Мбит Ethernet Modbus. Контроллер подключается к управляющему компьютеру инжектора по оптической линии для гальванической изоляции.

Алгоритмы ПЛК разработаны с использованием среды LPCXpresso IDE (Free Edition) и загружаются в контроллер с помощью обычного USB-кабеля и драйвера виртуального COM-порта.

На рис. 2 представлена структура системы автоматизации. Архитектура и логика работы подсистем описана далее.



Рис. 2. Структура системы автоматизации.

3.1. Газовая система

Регулировка давления в каждом из трех каналов газового коллектора обеспечивается с помощью цифрового манометра, подключенного к балластному объему, и двух соленоидных клапанов: вводного и сбросного. Вводные клапаны каждого канала подключены к баллону с рабочим газом, в котором поддерживается избыточное давление. Клапаны сброса, в свою очередь, ведут к линии с форвакуумным насосом для откачки.

Управление соленоидными клапанами и регистрацию показаний манометров осуществляют модули удаленного ввода-вывода Advantech в составе:

- одного модуля с релейными выходами ADAM-4168;
- одного модуля аналогового ввода ADAM-4017.

Логика системы представляет собой простой ПИД-регулятор. Когда давление в балластном объеме превышает желаемую уставку, открывается клапан сброса соответствующего канала, и наоборот. Сторожевой таймер алгоритма предотвращает зависание системы в процессе регулирования. Система также обеспечивает возможность подготовительной откачки всего газового коллектора и позволяет проводить сервисное обслуживание с ручным управлением клапанами.

3.2 Вакуумная система

Вакуумная система включает в себя два шибера, один из которых находится между ионным источником и вакуумным баком, другой — на входе турбомолекулярного насоса, и четыре форвакуумных клапана с пневматическим приводом, управляемым соленоидным клапаном. Такая схема вакуумного поста позволяет разделять элементы инжектора для проведения различных процедур обслуживания, например регенерации крионасоса.

Форвакуумный насос XDS35 и турбомолекулярный насос EBT1100, оборудованный контроллером питания ETC1104, управляются с использованием портов удаленного управления.

Три вакуумметра VSP63/VSH88, подключенные к форвакуумной линии, ионному источнику и вакуумному баку инжектора, регистрируют показания давления. Они оборудованы выходами типа “сухой контакт” для индикации корректных вакуумных условий. Эти бинарные сигналы используются в качестве системных защит. Вакуумметры также имеют последовательный интерфейс для передачи показаний.

Часть сигналов защит также передается в систему управления инжектором: это защита по состоянию вакуума и защита по положению шибера ионного источника. Сигналы передаются по оптическим линиям.

Три модуля цифрового ввода-вывода Advantech ADAM-4055 задействованы для управления насосами, соленоидными клапанами (посредством промышленных реле) и мониторинга положений вакуумных шиберов и клапанов. Также они регистрируют состояние бинарных сигналов защит.

В системной логике реализованы алгоритмы для трех различных сценариев работы: независимой откачки ионного источника или вакуумного бака, откачки инжектора как единого целого. В соответствии с выбранным сценарием выполняется последовательность управления оборудованием: данные давлений, состояний насосов, положений вакуумных шиберов и клапанов анализируются конечным автоматом для формирования управляющего воздействия. Дополнительно реализован сторожевой таймер, позволяющий остановить процесс откачки на любом этапе на случай непредвиденных ситуаций в системе.

3.3. Криосистема

Заправка крионасоса жидким азотом осуществляется по подающему трубопроводу с установленными криоклапанами с пневматическим приводом, управляемым электрическими сигналами. В схеме используется вводной клапан, заливной клапан и выводной клапан, который в нормальном состоянии открыт в атмосферу и необходим для предзаправочного захлаживания трубопровода.

Уровень жидкого азота в баке крионасоса измеряется монитором LM-510 и передается системе автоматизации в аналоговом виде. Прибор также имеет выходы типа “сухой контакт” и генерирует бинарные сигналы, указывающие на выход значения уровня в баке за пределы, определяемые оператором.

Монитор Model-218 регистрирует показания температуры в азотном трубопроводе и посредством выхода “сухой контакт” сигнализирует о корректных температурных условиях. Два других канала монитора используются для измерения температур криопанелей насоса. Еще два канала задействованы в реализации механизма

терморегулируемого подогрева газосбросных выводов криосистемы, чтобы предотвратить их перекрытие замерзшей атмосферной влагой. Монитор оборудован последовательным интерфейсом для передачи измеренных температур.

Модули удаленного ввода-вывода Advantech используются для управления соленоидными клапанами через промышленные реле и контроля положения криоклапанов. Также они регистрируют бинарные сигналы защит и аналоговые показания. Всего задействованы три модуля:

- два модуля цифрового ввода-вывода ADAM-4055;
- один модуль аналогового ввода ADAM-4017.

Хотя аппаратная часть автоматики претерпела существенные изменения, основные принципы логики работы системы остались такими же, как описано в [2]. Конечный автомат получает информацию о температуре в азотопроводе, уровне жидкого азота в баке в виде бинарных сигналов защиты, положении криоклапанов и на основе этих данных формирует воздействие для управления процессом. На случай сбоев в работе измерительного оборудования, а также непредвиденных ситуаций в алгоритме управления реализован сторожевой таймер и предусмотрены тайм-ауты для различных этапов цикла заправки.

4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Графический интерфейс пользователя вспомогательных систем, приведенный на рис. 3, разработан в среде проектирования LabVIEW

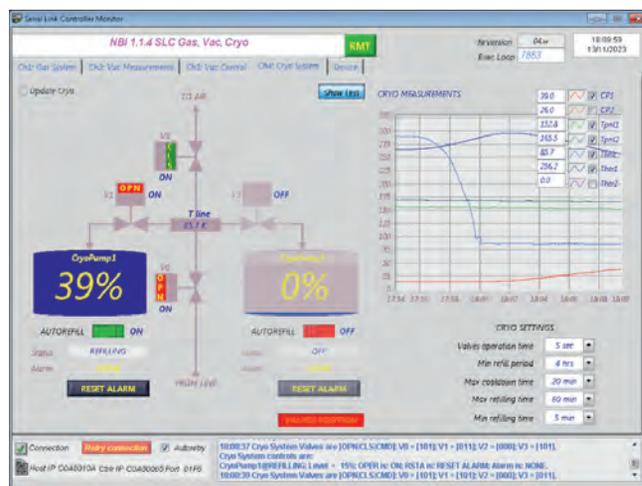


Рис. 3. Интерфейс пользователя.

и обеспечивает обмен информацией с ПЛК. Различные вкладки графического интерфейса относятся к разным каналам контроллера и содержат интерфейсы к разным подсистемам. Все интерфейсы построены по единому шаблону виртуального прибора, что позволяет унифицировать программное обеспечение для однотипных задач. Каждый виртуальный прибор предоставляет оператору индикацию состояния подсистемы, а также набор элементов управления и конфигурирования. Графический интерфейс также содержит журнал сообщений, в котором отображаются важные системные события и регистрируются изменения настроек. Информация из журнала сообщений, а также зарегистрированные показания сохраняются в лог-файлах.

Интерфейс пользователя вспомогательных систем инжектора может быть запущен как независимое приложение, когда это необходимо для нужд обслуживающего персонала. В других случаях он вызывается из программы управления инжектором, что обеспечивает интеграцию в общую систему управления и ее базу данных.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система показала себя простым и эффективным решением для автоматизации распределенного вспомогательного оборудования в установках небольшого размера.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWGM-2022-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейчули П.П., Амиров В.Х., Ахметов Т.Д., Белов В.П., Бруль А.В., Вахрушев Р.В., Горбовский А.И., Давыденко В.И., Дейчули Н.П., Иванов А.А., Капитонов В.А., Колмогоров В.В., Ращенко В.В., Сорокин А.В., Ступишин Н.В. и др. // 50 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному ИСРАФ-2023. Сборник тезисов докладов. М.: АО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2023. С. 127.
<https://doi.org/10.34854/ISRAF.2023.50.2023.1.1.083>
2. Драничников А.Н., Орешонок В.В. // ПТЭ. 2016. № 5. С. 150.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216040224>

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.384.6

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ЗАХВАТА И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ДАТЧИКОВ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН¹

© 2025 г. А. И. Титов^{a, b, *}, С. А. Гаврилов^{a, b}, И. И. Полоник^{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, Московская обл., Институтский переулок, 9*

* e-mail: alexander.i.titov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 02.05.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

За последние несколько лет на линейном ускорителе ИЯИ РАН были установлены флуоресцентный монитор и несколько сцинтилляционных экранов для решения задач по диагностике пучка. Для сбора и обработки изображений пучка, полученных при помощи данных устройств, а также ионизационного монитора поперечного сечения, было разработано многофункциональное программное обеспечение (ПО). Описана работа вычислительного ядра программного обеспечения, которое отвечает за управление камерами машинного зрения, захват и коррекцию полученных изображений. Также обсуждаются особенности ПО, разработанные для конкретных диагностических устройств, и преимущества их использования. Представлены экспериментальные данные с различных датчиков пучка, полученные при помощи реализованного ПО.

DOI: 10.31857/S0032816225070114

1. ВВЕДЕНИЕ

В ускорительных комплексах по всему миру используются профилометры, которые основаны на регистрации оптического излучения от вещества, взаимодействующего с пучком: мониторы свечения остаточного газа, ионизационные мониторы, люминесцентные экраны и экраны переходного излучения. Любой из этих приборов в современном ускорительном комплексе не может функционировать без программного обеспечения (ПО). Именно ПО отвечает за настройку видеокamеры, обработку полученных изображений и анализ измеряемых параметров пучка. Многие ускорительные комплексы разрабатывают ПО этих приборов под свои нужды, что приводит к невероятному разнообразию

программ часто со схожими базовыми функциями. В некоторых случаях различные диагностические приборы, работающие с оптическими сигналами, но установленные в одном ускорительном комплексе, имеют различное ПО [1].

На линейном ускорителе (ЛУ) ИЯИ РАН был выбран следующий подход к созданию программного обеспечения для диагностического оборудования, использующего оптические сигналы: создание единой программной основы для всего многообразия оптической диагностики профиля пучка, которая используется в ускорительном комплексе, и добавление уникальных функций, требующихся в конкретном случае.

Линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН (Москва, Троицк), схема которого приведена на рис. 1,

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



Рис. 1. Схема линейного ускорителя ИЯИ РАН: ФЛУМ – флуоресцентный монитор; ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения; ЛД СПО – люминесцентная диагностика стенда протонного облучения; ЛД КПТ – люминесцентная диагностика; RFQ – резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; P – резонатор.

представляет собой сильноточный резонансный ускоритель, рассчитанный на средние и промежуточные энергии до 602 МэВ, ток пучка до 15 мА, длительность импульса тока до 150 мкс с частотой повторения импульсов до 50 Гц. На нем размещено четыре профилометра, основанных на регистрации оптических сигналов: флуоресцентный монитор (ФЛУМ), установленный на низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов, ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС), находящийся на выходе ускорителя, и два люминесцентных экрана, предназначенных для диагностики пучка после выхода из ионопровода на стенде протонного облучения (ЛД СПО) и комплексе протонной терапии (ЛД КПТ).

2. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Разработанное ПО для всех приборов основано на одинаковой базе, отвечающей за выполнение основных функций. Далее для каждого конкретного случая были созданы дополнительные модули. Все программное обеспечение реализовано на LabVIEW, как и большая часть программного обеспечения системы управления ЛУ ИЯИ РАН.

2.1. Базовое ПО захвата и обработки изображений

Общая для всех диагностических устройств часть программного обеспечения отвечает за сбор, коррекцию, обработку и сохранение изображений, полученных от видеокамеры. Также базовое ПО отвечает за управление настройками самой видеокамеры: выдержкой, усилением и типом синхронизации.

В большинстве случаев для защиты от радиационного воздействия камеры расположены на некотором отдалении от ионопровода ускорителя и под некоторым углом к источнику излучения, что приводит к искажению изображения, регистрируемого камерой. Для получения достоверной информации об одномерных профилях пучка необходима коррекция полученного изображения.

Основная процедура коррекции заключается в геометрическом преобразовании изображения путем задания системы координат на изображении и преобразовании выбранной системы к требуемому виду. Алгоритм работает одинаково для всех диагностических устройств, исключением является выбор точек, по которым проводится коррекция изображения. Процедура коррекции, пример которой приведен на рис. 2,

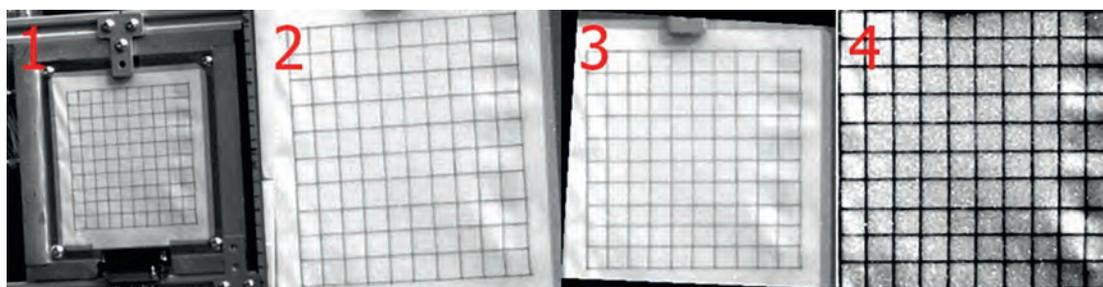


Рис. 2. Процедура коррекции изображения. Цифрами показано изображение экрана на различных этапах корректировки.

выполняется до измерений, после чего создается специальный файл, на основе которого программа проводит коррекцию всех последующих изображений. Вся дальнейшая работа ведется с откорректированными изображениями.

Для исключения паразитных засветок базовая программа включает в себя функцию вычитания фонового кадра. После вычитания фонового кадра изображение подвергается анализу: создаются графики с поперечным сечением и одномерные профили пучка, рассчитываются положение центра масс и среднеквадратичный размер пучка.

Интерфейс программы, практически полностью определяемый базовым модулем, выполнен в виде трех вкладок с различными функциями. На первой вкладке отображается исходное изначальное изображение, на второй – изображение после процедуры коррекции. На третьей вкладке находятся результаты анализа откорректированного изображения и дополнительные модули, разработанные для конкретного устройства. Также на этой вкладке можно управлять настройками видекамеры и суммированием кадров, сделанных камерой.

Программа имеет возможность сохранять отдельные изображения и произвольные по размеру серии кадров. ПО сохраняет изображения в формате PNG, скриншот третьей вкладки программы и данные о профилях пучка. На рис. 3 представлена третья вкладка программы люминесцентной диагностики КПТ.

2.2. Модуль расчета заряда

Многие люминофоры имеют линейную зависимость световыхода от числа частиц, попавших в сцинтиллятор [2]. Данный эффект позволяет использовать люминесцентный экран как измеритель не только профиля пучка, но и суммарного заряда (или числа частиц) в импульсе тока пучка.

Для ЛД СПО был реализован модуль расчета числа частиц в импульсе пучка на основе интенсивности свечения люминофора. Для того чтобы не привязываться к свойствам конкретного люминофора и его качеству, в реализованном ПО необходимо предварительно провести калибровку при помощи какого-либо эталонного измерителя тока, например индукционного датчика тока. Таким образом, программа использует только факт линейности световыхода

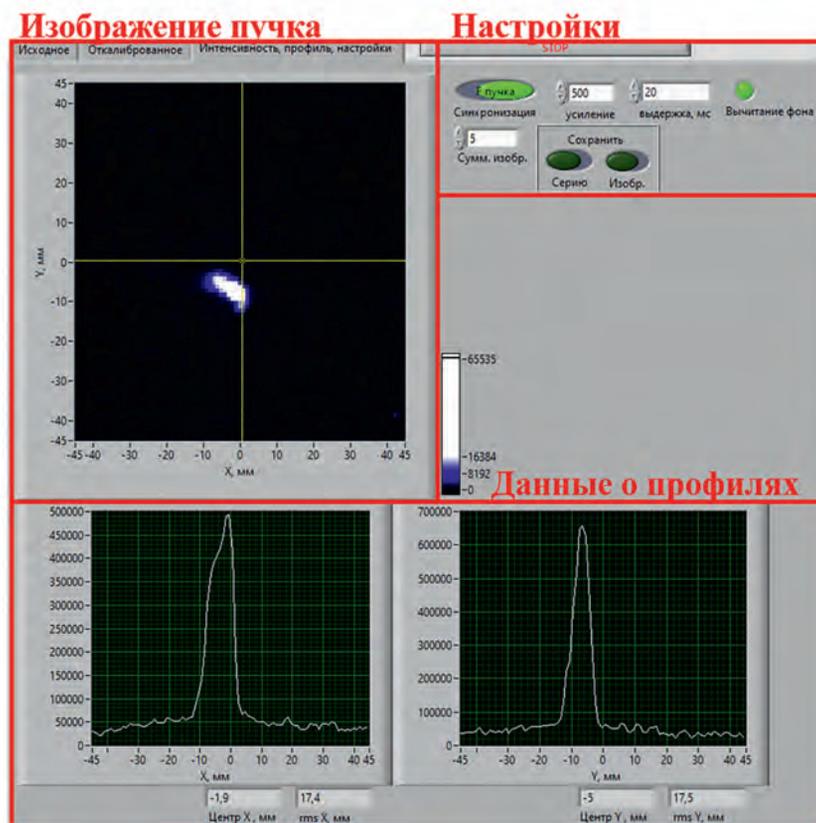


Рис. 3. Вкладка интерфейса программы обработки изображения с люминесцентного экрана КПТ.

люминофора, учитывает зависимость измеренной интенсивности от настроек видеокамеры и количества суммированных кадров. В случае СПО особый интерес представляет плотность числа частиц, поэтому в программе имеется возможность измерить число частиц в заданной пользователем области.

2.3. Модуль обработки области интереса

В случае ИМПС потери пучка в ускорителе приводят к образованию паразитной засветки, связанной с особенностями работы устройства. При учете свечения всего изображения измеряемый профиль пучка становятся некорректными.

Для решения данной проблемы для ИМПС был написан модуль обработки области интереса, который при создании одномерных профилей пучка учитывает только заданную пользователем область, что позволяет минимизировать влияние паразитной засветки. Также в этом модуле настраивается уровень отсечки интенсивности для ликвидации влияния однородной паразитной засветки по всей выбранной области. Подобная функция используется в ПО ФЛУМ, поскольку там могут присутствовать переотражения от стенок камеры и смотрового окна.

2.4. Модуль онлайн-томографии

Модуль онлайн-томографии является реализацией отдельной процедуры по измерению плотности распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях. Изначально данная процедура создавалась как дополнительный модуль для программы обработки изображений ИМПС, но позже вылилась в отдельный процесс вычислений на основе данных с любого профилометра, установленного на ЛУ ИЯИ РАН. Реализация в виде дополнительного модуля включает в себя управление магнитооптикой ускорителя, томографическую реконструкцию и постобра-

ботку полученных данных. Подробное описание работы данного модуля представлено в [3].

2.5. Модуль ранговой фильтрации

Для флуоресцентного монитора был разработан модуль ранговой фильтрации изображения. Небольшая яркость свечения газа приводит к тому, что видеокамеры ФЛУМ работают на пределе чувствительности или с максимальными значениями выдержки и усиления сигнала. Ранговая фильтрация была введена для подавления возникающих шумов и улучшения качества изображения.

Для подбора оптимальных параметров была реализована возможность проводить фильтрацию отдельных кадров и изображения, просуммированного базовым модулем. Во время работы оператор может настраивать размер окна фильтрации и ранг, а также переключить модуль в режим медианной фильтрации.

В табл. 1 приведены данные по использованию конкретных модулей на различных профилометрах, а на рис. 4 представлены интерфейсы отдельных модулей.

3. ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Результаты ФЛУМ

Флуоресцентный монитор был установлен с целью проверки работоспособности подобного устройства. Были проведены исследования оптимальных настроек модуля ранговой фильтрации на основе изображений пучка. Сравнение показало, что оптимумом является применение медианного фильтра до и после суммирования кадров при размере окна фильтрации равном 5 пикселям.

Что касается контроля за пучком, то ФЛУМ обеспечил неразрушающий контроль за размером и положением пучка на канале транспортировки. Это позволило провести оптимизацию

Таблица 1. Данные об использовании модулей на различных профилометрах

Название модуля	ФЛУМ	ИМПС	ЛД СПО	ЛД КПТ
Базовый модуль	+	+	+	+
Модуль расчета заряда	–	–	+	–
Модуль обработки области интереса	+	+	–	–
Модуль онлайн-томографии	–	+	–	–
Модуль ранговой фильтрации	+	–	–	–

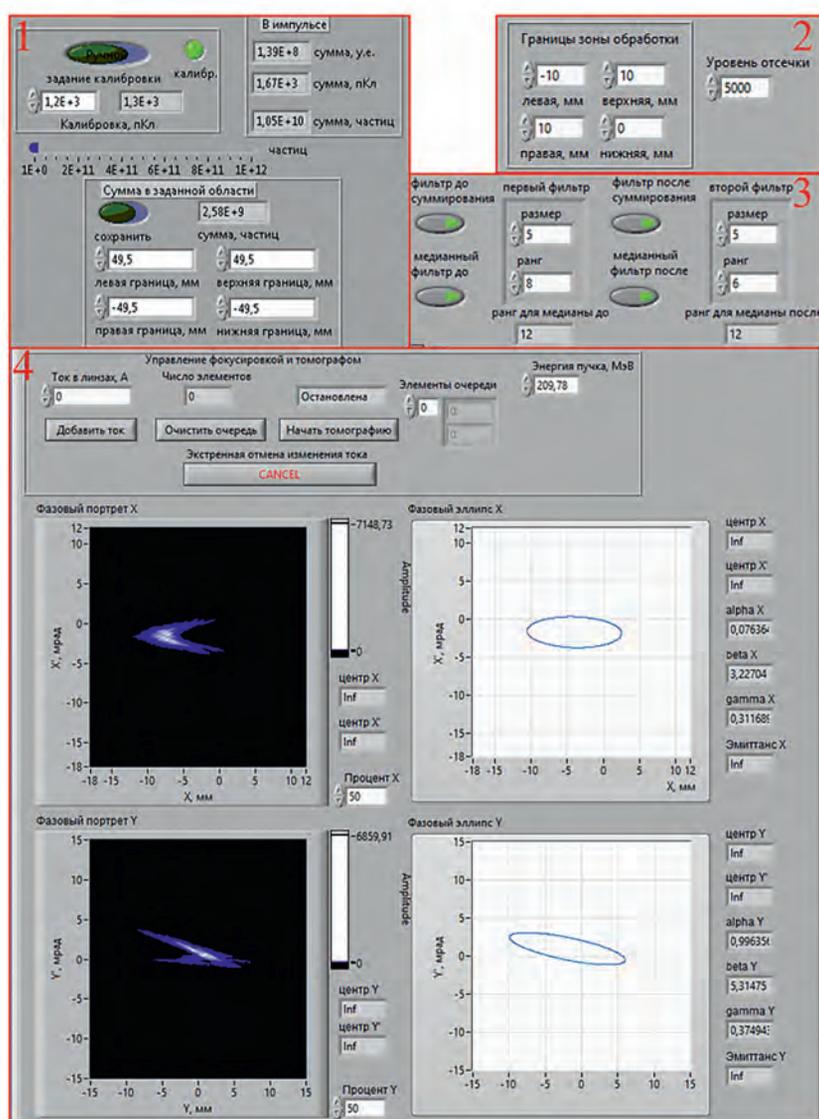


Рис. 4. Интерфейсы дополнительных модулей: 1 – модуль расчета заряда, 2 – модуль выбора области интереса, 3 – модуль ранговой фильтрации, 4 – модуль онлайн-томографии.

динамики пучка на данном участке и отслеживать изменение параметров работы инжектора протонов и элементов магнитооптики канала.

3.2. Результаты ИМПС

Обновление программного обеспечения для системы сбора данных с ИМПС позволило упростить настройку перед сеансами работы ускорителя. Возможность суммировать отдельные кадры позволяет использовать меньшую выдержку видеокамеры, что снижает зашумленность итогового изображения. В остальном ПО дает возможность применять ИМПС для диагностики пучков протонов и отрицательных ионов водорода с разными параметрами (рис. 5).

3.3. Опыт использования ЛД СПО

Способность измерять заряд при помощи люминесцентной диагностики СПО позволила провести исследования во всем заявленном диапазоне работы стенда во время первых сеансов, поскольку количество частиц в импульсе от 10^9 до 10^{11} могло быть точно измерено только люминесцентным экраном. Установленные там же индукционный датчик тока (ИДТ) и многоанодный газовый счетчик (МГС) имели следующие рабочие диапазоны: 10^{11} – 10^{13} и 10^7 – 10^9 частиц в импульсе соответственно.

На данный момент диапазоны ИДТ и МГС пересекаются, поэтому нет необходимости в промежуточном измерителе интенсивности.

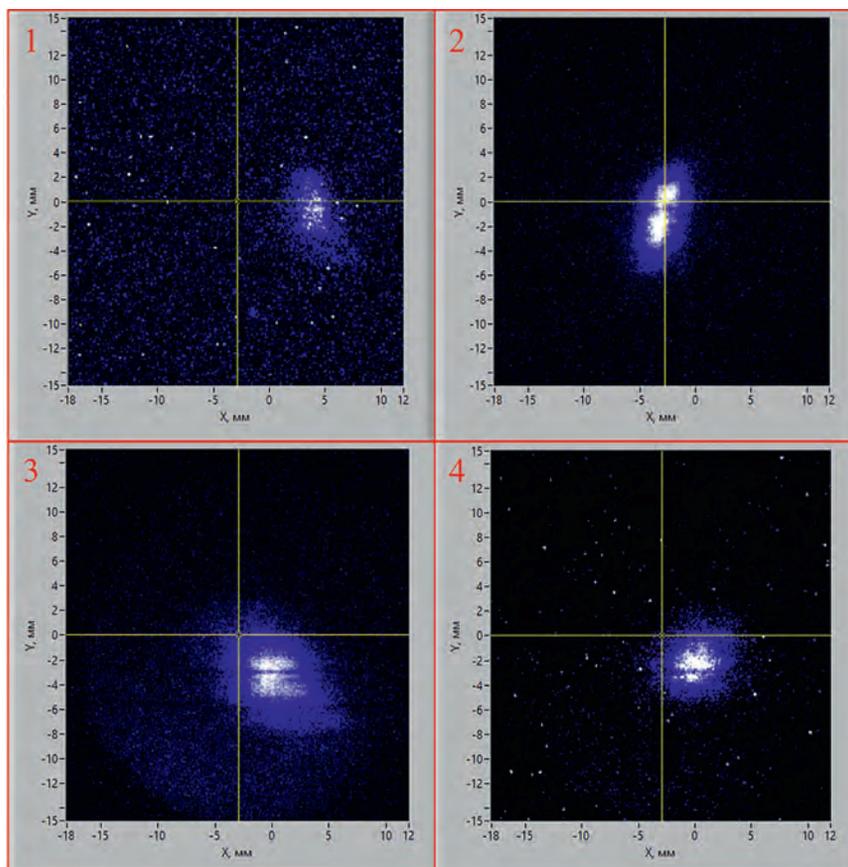


Рис. 5. Изображения пучков с разными параметрами с ИМПС: 1 – пучок H^+ с импульсным током 12 мкА, длительностью 20 мкс, энергией 158 МэВ; 2 – пучок H^- с импульсным током 1.5 мА, длительностью 47 мкс, энергией 100 МэВ; 3 – пучок H^+ с импульсным током 7 мА, длительностью 100 мкс, энергией 267 МэВ; 4 – пучок H^+ с импульсным током 10 мА, длительностью 0.25 мкс, энергией 267 МэВ.

Люминесцентный экран используется как профилометр, а показания модуля расчета заряда используются только для качественной оценки параметров пучка.

3.4. Результаты ЛД КПТ

Люминесцентный экран на выходе ионопровода у комплекса протонной терапии был установлен для улучшения качества проводки пучка в процедурную КПТ и увеличения точности измерений положения и размера пучка. Данная задача возникла после начала исследований в области флэш-терапии сотрудниками КПТ. Использование люминесцентной диагностики в паре с МГС, установленном на оси пучка на расстоянии 1 м от экрана, позволяет провести пучок в процедурную строго в соответствии с запросами комплекса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное обеспечение для обработки данных с оптических измерителей профиля пучка разработано таким образом, что может быть использовано для любого типа оптического измерителя независимо от принципов его работы. Это подтверждается тем, что описанное в данной работе ПО успешно используется на протяжении нескольких лет на четырех профилометрах трех разных типов.

Используемый в разработке подход позволяет использовать успешные наработки, реализованные для одного прибора, на всех остальных устройствах. При необходимости установки дополнительных профилометров, работающих по принципу излучения оптических сигналов, реализованное базовое ПО и дополнительные

модули могут быть в кратчайшие сроки адаптированы для использования с новым прибором.

Результаты, полученные с помощью уже установленных приборов и данного ПО, позволяют осуществлять контроль за параметрами пучка и выполнять поставленные задачи по его проводке.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 “Ядерная и радиационная физика” (НЦФМ 62325-113).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forck P.* Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. Germany, Darmstadt: Joint University Accelerator School, January – March, 2006. P. 71.
2. *Forck P., Andre C., Becker F., Haseitl R., Reiter A., Walasek-Höhne B., Krishnakumar R., Ensinger W.* Scintillation screen investigations for high energy heavy ion beams at GSI // Proc. of DIPAC11. Hamburg, Germany. P. 170.
3. *Титов А.И., Брагин С.Е., Володкевич О.М., Гаврилов С.А.* // ПТЭ. № 1. 2023. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222060209>

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 681.518

ОБНОВЛЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЧ-СИСТЕМЫ ВЭПП-2000¹

© 2025 г. Э. А. Эминов^{a, b, *}, А. И. Сенченко^{a, **}, Ю. А. Роговский^{a, b}, А. П. Лысенко^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, 1

* e-mail: e.a.eminov@inp.nsk.su

** e-mail: a.i.senchenko@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 11.12.202 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

ВЧ-система ВЭПП-2000 успешно работает с момента ввода в эксплуатацию ускорительного комплекса в 2009 году. За это время в систему было внесено несколько доработок. Последнее обновление показало, что некоторые компоненты программного обеспечения не поддерживаются в актуальном состоянии, что в будущем может потребоваться дополнительные усилия по актуализации программного обеспечения со стороны команды разработчиков систем управления ВЭПП-2000. В качестве основного решения рассматривалась разработка с нуля с использованием современных программных технологий. Несколько лет назад было принято решение о переводе программного обеспечения ВЧ-системы на Tango Controls. В статье описывается архитектура новой программной системы и текущий статус.

DOI: 10.31857/S0032816225070122

1. ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 проводятся эксперименты по исследованию процессов электрон-позитронной аннигиляции в широком диапазоне энергий: $2E = 0.3\text{--}2$ ГэВ в системе центра масс [1]. Комплекс ВЭПП-2000 включает в себя бустерный синхротрон БЭП и электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000. Каждое из колец оборудовано высокочастотной системой (ВЧ-системой) ускорения электронов и позитронов, что позволяет осуществлять ускорение пучка вплоть до 1 ГэВ [2, 3]. Используемые системы ускорения пучков разработаны в ИЯФ СО РАН [2–7].

Во время запуска комплекса ВЭПП-2000 было разработано и внедрено инженерное программное обеспечение для управления ВЧ-системами, которое позволяет управлять в ручном

режиме, т.е. когда оператор большинство манипуляций осуществляет вручную или в полуавтоматическом режиме. Используемые на момент запуска комплекса ВЭПП-2000 программные библиотеки и компоненты за последние 15 лет устарели и перестали получать регулярную поддержку и обновления. Кроме этого, за многолетний опыт работы коллектива операторов комплекса были выработаны и прошли проверку временем стандартные процедуры и последовательности действий, требующие внедрения в программный комплекс для управления ВЧ-системами. В частности, автоматизированное включение ВЧ-систем, проведение дегазации вакуумных камер колец БЭП и ВЭПП-2000, изменение напряжения резонатора по произвольно заданной кривой при переходах между режимами работы комплекса.

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

Модификация кодовой базы существующего программного комплекса для управления ВЧ-системами видится неэффективной ввиду отсутствия поддержки программных библиотек, используемых в его работе, со стороны современных версий операционных систем семейства Linux, а также используемого подхода единого, монолитного приложения, где совмещаются логика работы и представление данных.

Новый программный комплекс должен быть создан с применением современной программной базы и модульного подхода на основе распределенной системы управления Tango Controls.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

Ускорительный комплекс имеет 4 режима работы: накопление электронов в БЭП, ускорение накопленных электронов с последующим перепуском в кольцо ВЭПП-2000, накопление позитронов в БЭП, ускорение накопленных позитронов с последующим перепуском в кольцо ВЭПП-2000. Разрабатываемое ПО должно поддерживать хранение и модификацию параметров работы ВЧ-системы для каждого из режимов, а также настройку типа перехода между режимами накопления и ускорения: линейный или по заранее заданной кривой (waveform).

При переходах между режимами работы комплекса от ВЧ-системы БЭП требуется:

- обеспечение согласованности частоты напряжения в резонаторе БЭП с частотой напряжения в накопителе-охладителе инжекционного комплекса в режимах накопления сгустков для обеспечения возможности захвата частиц в БЭП;

- обеспечение согласования частоты и фазы ускоряющего напряжения в резонаторе БЭП с частотой и фазой ускоряющего напряжения в коллайдере ВЭПП-2000 для осуществления перепуска частиц из кольца БЭП в кольцо ВЭПП-2000.

Встречные пучки в коллайдере ВЭПП-2000 сталкиваются на протяжении всего цикла эксперимента при фиксированной энергии. Поэтому при переходах между режимами работы комплекса мощность и частота ВЧ-системы кольца ВЭПП-2000 остаются неизменными.

Разрабатываемое программное обеспечение должно поддерживать следующие типы функционирования ускорительного комплекса ВЭПП-2000:

- коллайдер – основной тип функционирования, при котором проводятся эксперименты со встречными пучками;

- дегазация БЭП – десорбция молекул остаточного газа со стенок вакуумной камеры кольца БЭП за счет синхротронного излучения, испускаемого накопленным пучком;

- дегазация ВЭПП-2000 – десорбция молекул остаточного газа со стенок вакуумной камеры кольца ВЭПП-2000 за счет синхротронного излучения, испускаемого накопленным пучком.

Разрабатываемое ПО должно также поддерживать автоматизированное включение и выключение ВЧ-систем колец БЭП и ВЭПП-2000. Это необходимо для увеличения срока службы генераторных ламп в каскадах усилителях мощности. Срок службы генераторных ламп можно увеличить благодаря медленному поднятию их мощности при включении, что дежурному оператору сделать вручную достаточно затруднительно. Алгоритм включения состоит из следующих шагов:

- задать ограничение по току фидера;
- с заранее заданной скоростью повысить напряжение на резонаторе до напряжения прогрева;
- зафиксировать напряжение прогрева определенное время;
- перейти с напряжения прогрева на рабочее напряжение.

3. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Управление ВЧ-системами БЭП и ВЭПП-2000 осуществляется управляющей программой, исполняющейся на сервере, связанной с управляемой электроникой. Схема взаимодействия сервера с управляемой электроникой представлена на рис. 1. Желтым цветом выделены устройства, с которыми управляющей программе требуется взаимодействовать для управления параметрами ВЧ-системы. Взаимодействие с этими устройствами осуществляется посредством других устройств, выделенных зеленым цветом. Серым цветом обозначены устройства, с которыми управляющая программа непосредственно не взаимодействует.

Системы управления БЭП и ВЭПП-2000 разрабатывались с учетом принципа иерархичности, в котором максимально использован модульный подход, предлагаемый программной

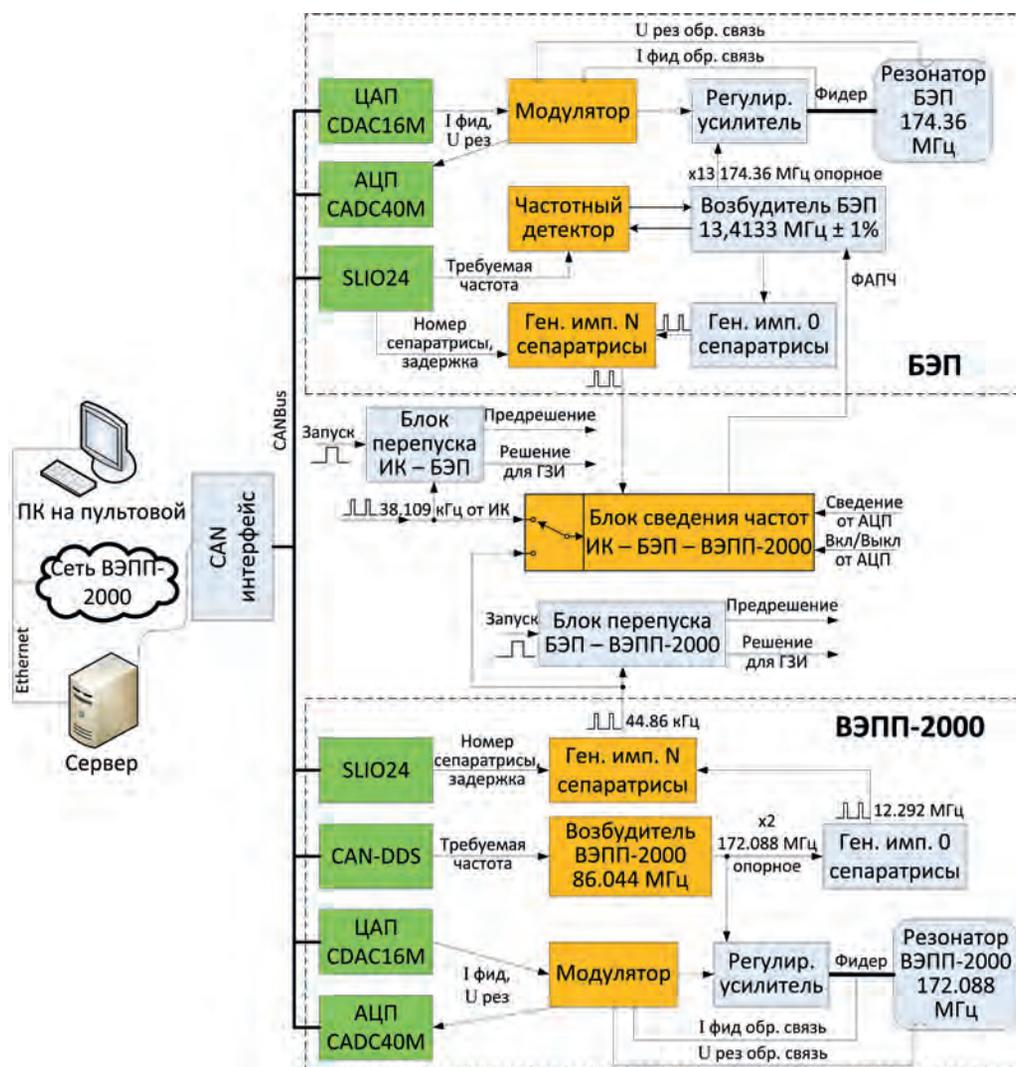


Рис. 1. Схема управления ВЧ-системами от ЭВМ.

платформой Tango Controls. Структура ПО для управления ВЧ-системой БЭП и ВЭПП-2000 схематично представлена на рис. 2.

Согласно модульному подходу, предлагаемого платформой Tango Controls, для каждого управляемого устройства был разработан и протестирован собственный Tango Device Class. В соответствии с принципом иерархичности непосредственная работа с устройствами, подключенными по общей шине CANBus, а именно CANADC40M, CANDAC16M, CAN-DDS, SLIO24, была вынесена в отдельные библиотеки (драйверы).

Каждая библиотека отвечает за правильное формирование управляющих пакетов по CANBus для команд своего управляемого устройства. Программный интерфейс (API) библиотек представляет собой набор функций, соответ-

ствующих поддерживаемым командам управляемого устройства. В ИЯФ утвержден собственный протокол обмена данными по CANBus. Для упрощения работы с этим протоколом ранее была написана библиотека can-wrapper на языке C++, поддерживающая работу с драйверами SocketCAN и Can4linux. Библиотеки для работы с управляемыми ВЧ-устройствами также были написаны на языке C++ и основаны на библиотеке can-wrapper.

Каждый Tango Device, представленный на рис. 2, является экземпляром (instance) соответствующего ему Tango Device Class. Поскольку свойства (properties) конкретного экземпляра устройства хранятся в конфигурационной базе данных Tango, появляется возможность для одного типа устройства, применяющегося в ВЧ-системе БЭП и ВЭПП-2000 (например,

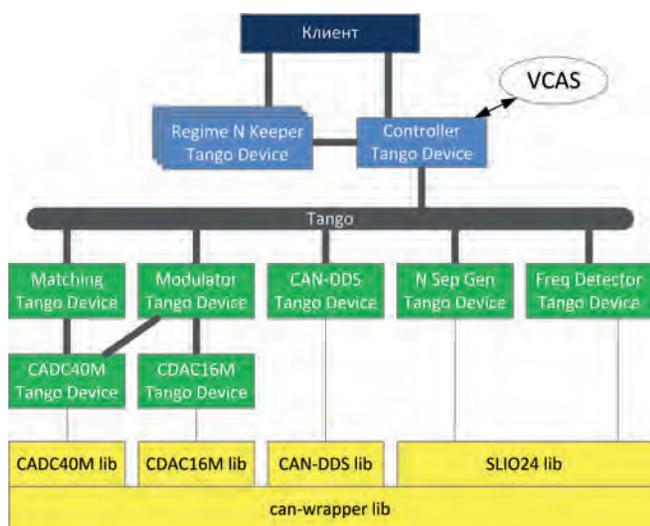


Рис. 2. Структура программного обеспечения ВЧ-системы управления БЭП и ВЭПП-2000.

модулятора), создать один Tango Device Class, а все различия, которые есть между ними, задавать как параметры запуска конкретного экзем-

пляра через свойства. Все Tango Device Class для работы с управляемыми устройствами были написаны на языке C++ с использованием генератора шаблонного кода Pogo. Схема взаимодействия Tango Device с ВЧ-системами управления представлена на рис. 3.

Device Class для модулятора позволяет задавать напряжение резонатора и ограничение по току фидера; отображает текущие значения тока фидера, напряжения резонатора, фазы между током и напряжением, положения сервоприводов; выводит сигнал готовности (блокировки отсутствуют) и сигнал состояния модулятора (включен или выключен); позволяет осуществлять процедуру плавного включения ВЧ-системы по команде от пользователя. Запись значений тока фидера и напряжения резонатора осуществляется через Tango Device для CAN-DAC16M, все остальные операции – через Tango Device для CANADC40M. Для минимизации нагрузки на сеть используется модель издатель-подписчик вместо периодического опроса значений.

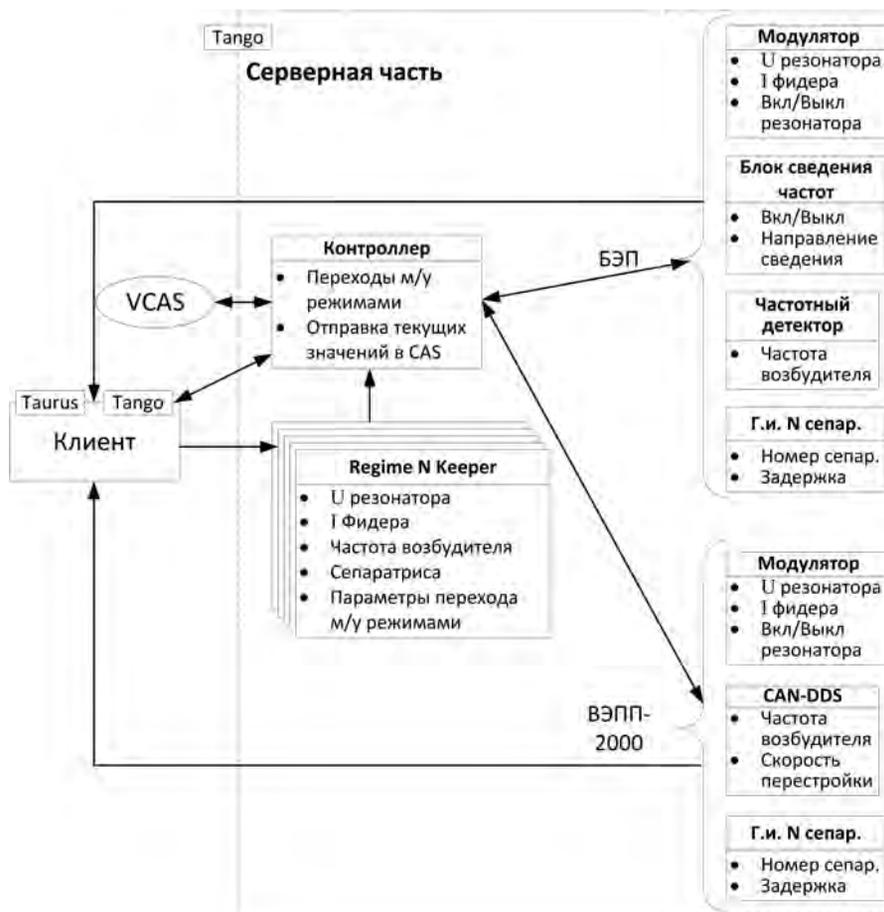


Рис. 3. Схема взаимодействия Tango Device с ВЧ-системами управления.

Device Class для блока сведения частот позволяет задавать направление сведения частоты, осуществлять включение и выключение блока, а также показывать его текущее состояние. Он работает через Tango Device для CANADC40M.

Device Class для генератора импульсов N-сепаратрисы позволяет задавать и отображать текущие значения номера сепаратрисы, а также задержки внутри сепаратрисы.

Device Class для частотного детектора позволяет задавать частоту возбудителя БЭП.

Device Class для CAN-DDS позволяет задавать частоту возбудителя ВЭПП-2000, а также шаг и скорость перестройки частоты.

3.1. Управляющая программа

Для управления всеми Tango Device для ВЧ-системы БЭП и ВЭПП-2000 (кроме CANADC40M и CANDAC16M) используется одна управляющая программа. Она состоит из хранителей параметров режимов работы комплекса ВЭПП-2000 (Regime Keeper) и контроллера, который осуществляет переходы между режимами.

Хранитель параметров представляет собой Tango Device, в котором хранятся параметры конкретного режима работы для конкретного кольца, например, параметры ВЧ-системы БЭП для режима накопления электронов. Всего используется 5 экземпляров хранителей – 4 для работы с каждым из режимов в кольце БЭП и 1 – для кольца ВЭПП-2000. Для ВЭПП-2000 требуется один хранитель, потому что параметры ВЧ-системы ВЭПП-2000 не меняются при переходах между режимами работы комплекса. Хранитель параметров конкретного режима для кольца БЭП хранит в себе напряжение резонатора, ограничение по току фидера, ВЧ-частоту, номер и задержку внутри сепаратрисы. Также в режимах накопления 1 и 3 хранятся параметры для линейного перехода и перехода по кривой, а именно время перехода и вэйвформа соответственно. Хранитель параметров для кольца ВЭПП-2000 хранит в себе: напряжение резонатора, ограничение по току фидера, ВЧ- частоту, номер и задержку внутри сепаратрисы отдельно для инъекции электронов и отдельно для инъекции позитронов. Все параметры, кроме времени перехода и вэйвформы, перед сохранением проходят проверку на корректность. Время перехода и вэйвформа сохраняются в хранителе без про-

верки на корректность, но эта проверка в дальнейшем осуществляется в контроллере. Вэйвформа задается как список, состоящий из точек с абсолютным значением напряжения и задержек по времени в каждой точке, необходимых для того, чтобы ВЧ-система успела выставить требуемое напряжение в резонаторе.

Контроллер решает несколько задач.

1. Агрегирует в себе данные со всех хранителей режимов по модели издатель—подписчик.

2. Проверяет корректность сохраненных времени перехода и вэйвформы. Для проверки корректности времени перехода вычисляется скорость перехода как $\frac{U_{\text{конечное}} - U_{\text{начальное}}}{T_{\text{перехода}}}$ и сравни-

вается с максимально допустимой скоростью, заданной в свойствах. Вэйвформа проверяется по нескольким критериям:

- каждая точка напряжения лежит в допустимом диапазоне;
- задержка по времени в каждой точке больше минимального времени, с которым CANDAC16M может выставлять новое значение на линию;
- разница в значениях напряжений между соседними точками вэйвформы не превышает величины мощности, которую ВЧ-система сможет добавить за заданный промежуток времени.

В случае, если параметры требуемого типа перехода окажутся некорректными, то переход будет осуществляться по линейному закону со стандартной скоростью перехода, которая хранится в виде свойства .

3. Осуществляет переходы между режимами накопления и ускорения частиц как по требованию пользователя, так и от сигнала через программную шину VCAS собственной разработки [8], использующуюся для обмена данными между программами системы управления комплекса ВЭПП-2000.

4. Позволяет пользователю переключаться между режимами работы со встречными пучками (режим коллайдера), осуществляет дегазацию вакуумной камеры кольца БЭП и дегазацию вакуумной камеры кольца ВЭПП-2000.

5. Отправляет в программную шину VCAS для каждого из колец текущие значения параметров напряжения резонатора, тока фидера, фазы между током фидера и напряжением на резонаторе, номера и задержки сепаратрисы, заданной ВЧ-частоты поля, а также направление сведения частоты.

Device Class для контроллера и хранителя режимов были написаны на языке Python с использованием библиотеки PyTango.

На рис. 4 представлен интерфейс прототипа приложения оператора. Окно приложения разбито на 4 блока: блок режима работы комплекса и типов переходов, блок переключения и индикации текущего режима, блок управления ВЧ-системой БЭП, блок управления ВЧ-кольца ВЭПП-2000. Прототип написан на языке Python с использованием фреймворка Taurus, основанного на библиотеке PyQt5.

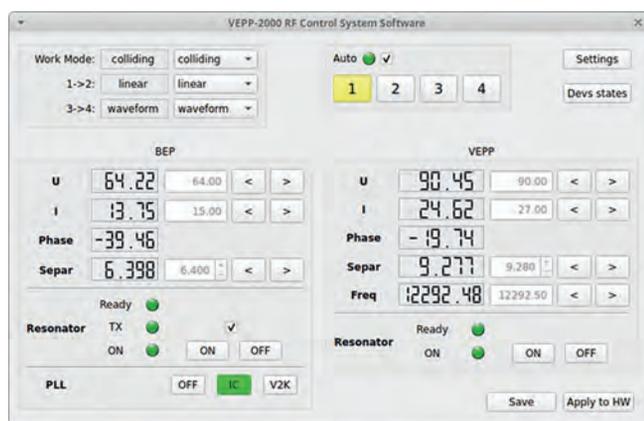


Рис. 4. Интерфейс прототипа приложения оператора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент:

- разработана архитектура комплекса программного обеспечения, базирующаяся на программной платформе Tango Controls, которая предлагает максимально использовать модульность и принцип иерархичности для разрабатываемых на ее основе систем;
- созданы и протестированы библиотеки для работы с управляемыми устройствами по

CANBus: CANADC40M, CANDAC16M, SLIO24, CAN-DDS;

- созданы и протестированы Tango Device Class для каждого управляемого устройства: CANADC40M, CANDAC16M, SLIO24, CAN-DDS, модулятор, блок сведения частот, частотный детектор, генератор импульсов N-сепаратрисы;

- создана управляющая программа, которая осуществляет согласованную работу отдельных компонент ПО в автоматическом и полуполупрограммном режиме;

- создан прототип операторского приложения, которое позволяет оператору настраивать как отдельные параметры каждого режима, так и параметры переходов между режимами.

Тестирование управляющей программы и доработка операторского приложения для комплекса ВЭПП-2000 планировалось осуществить в 2023–2024 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu. M., Evstigneev A.V., Ganyushin D.I. et al.* // Proc. EPAC. Vienna. 2000.
2. *Biryuchevsky Yu. A., Gorniker E.I., Kendjebulatov E.K. et al.* // Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Kharkiv. 2012.
3. *Volkov V.N., Bushuev A.A., Kendjebulatov E.K. et al.* // Proc. EPAC 2000. Vienna. 2000.
4. *Volkov V.N., Bushuev A.A., Fomin N. et al.* // Proc. APAC'01. Beijing. 2001.
5. *Volkov V.N., Bushuev A.A., Kendjebulatov E.K. et al.* // Proc. EPAC'04. Lucerne. 2004.
6. *Arbuzov V.S., Biryuchevsky Yu. A., Bushuev A.A. et al.* // Proc. RuPAC. Dubna. 2004.
7. *Arbuzov V.S., Biryuchevsky Yu. A., Bushuev A.A. et al.* // Proc. Ru-PAC. Novosibirsk. 2006.
8. *Senchenko A.I., Berkaev D.E., Kasaev A.S. et al.* // Proc. PCaPAC 2012. Kolkata. 2012.

КОАКСИАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР В КРУГЛОМ ЗАПРЕДЕЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ НА ЕЕ ПРОВОДИМОСТЬ¹

© 2025 г. З. Н. Нуриахметов^{a, *}, Ю. Д. Черноусов^a, Д. В. Смвж^b

^a *Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3*

^b *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1*

* e-mail: zaur.nuriakhmetov@gmail.com

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 19.05.2024 г.

Принята к публикации 28.05.2024 г.

Представлен резонатор на запертой моде в запердельном волноводе. Резонатор содержит отрезок цилиндра, установленный в круглом волноводе соосно с его внутренней поверхностью. Электромагнитное поле локализовалось вблизи цилиндра, и на частоте 4 ГГц возбуждался резонанс на ТЕМ-моде колебаний. Граничная частота отсечки для низшей TE_{11} -моды в выбранном волноводе составляла около 7 ГГц, поэтому на более низких частотах электромагнитная волна не могла распространяться вдоль волновода, за счет чего реализовывался режим запертой ТЕМ-моды. Основные потери в таком устройстве сосредоточены в цилиндре, что позволяет путем измерения добротности резонатора изучить влияние модификации медной поверхности цилиндра на ее проводимость. В работе описана методика использования резонатора для указанной цели, приведены результаты исследования влияния отжига и покрытия графеном поверхности меди на ее свойства. Графен синтезировался на меди методом химического осаждения из газовой фазы.

DOI: 10.31857/S0032816225070139

1. ВВЕДЕНИЕ

Модификация поверхности металла: легирование, покрытие тонкими пленками, термическая обработка – приводит к изменениям проводимости, устойчивости к окислению и других свойств используемых металлов и, следовательно, характеристик сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств – волноводов, резонаторов. Такие воздействия могут быть направлены как на пассивацию поверхности (процесс, при котором на поверхности металла образуется защитная пленка, препятствующая дальнейшей коррозии и разрушению), что используется для увеличения коррозионной стойкости, так и на

покрытие тонкой пленкой металла с более высокой проводимостью для уменьшения потерь в волноводах и повышения добротности резонаторов. В ускорительной технике также используются покрытия с низким коэффициентом вторичной эмиссии для противодействия развитию вторично-эмиссионного резонансного разряда (мультипактора).

В СВЧ-диапазоне толщина скин-слоя в металле составляет единицы и доли микрон, поэтому любая модификация поверхности вносит изменения в поверхностное сопротивление, тем самым меняя параметры устройств, изготовленных из такого металла. Так, рост оксидного слоя на поверхности меди приводит к уменьше-

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

нию поверхностной проводимости и, следовательно, добротности изготовленных из нее резонаторов [1, 2].

Для измерений разработан коаксиальный резонатор на запертой ТЕМ-моды в запердельном волноводе. Устройство выполнено в виде круглого волновода, в котором соосно с его внутренней поверхностью установлен отрезок цилиндра. Запертая мода характеризуется возникновением такой резонансной моды колебаний, при которой электромагнитное поле не может распространяться во всем устройстве в целом, ограничиваясь некоторой областью устройства. В нашем случае режим запертой ТЕМ-моды реализовывался за счет того, что электромагнитное поле локализовалось вблизи цилиндра и на частоте 4 ГГц возбуждался резонанс на ТЕМ-моды колебаний. Граничная частота отсечки для низшей TE_{11} -моды в выбранном волноводе составляла около 7 ГГц, поэтому на более низких частотах электромагнитная волна не могла распространяться вдоль волновода. В данной работе приведены электродинамические характеристики такого резонатора, описано распределение электромагнитного поля и токов в стенках. Изложена методика использования описанного устройства для изучения влияния модификации поверхности на параметры металлов, приведены результаты исследования влияния покрытия графеном на свойства поверхности меди. Графен синтезировался на меди методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ).

2. ОПИСАНИЕ РЕЗОНАТОРА

При исследовании проводимости металлов с помощью объемного резонатора обычно возникает источник дополнительных потерь – электрический контакт в местах соединения деталей устройства. Если такое соединение находится в месте протекания СВЧ-токов, то величина потерь может быть значительной. Для борьбы с этими потерями необходимо контролировать качество изготовления устройства, использовать по возможности не механическое соединение, а пайку или сварку. Однако полностью избежать потерь в электрических контактах не удастся. Поэтому при разработке устройства для исследования поверхностной проводимости мы руководствовались необходимостью максимального сокращения электромеханических соеди-

нений. Так, в используемом резонаторе образец, поверхность которого подвергается модификации, не имеет электромеханических соединений с внешним корпусом, а основные потери сконцентрированы в нем самом, что позволяет исследовать влияние модификации поверхности на электродинамические характеристики металла.

В работе применен резонатор коаксиального типа на запертой моде колебаний, расположенный в круглом запердельном волноводе, содержащий отрезок медной цилиндрической трубы и установленный в нем резонансный элемент – медный цилиндр (рис. 1). Цилиндр фиксировался в трубе с помощью диэлектрического кольца. Для измерений с помощью коаксиальных электрических зондов, расположенных по оси устройства, в резонаторе возбуждался резонанс ТЕМ-типа с продольными СВЧ-токами в трубе и цилиндре. Размер зондов выбирался таким, чтобы коэффициент связи резонатора по входу и выходу был много меньше единицы.

Длина отрезка медной трубы составляла 100 мм, внутренний диаметр 26 мм, медный цилиндр имел длину 28 мм и диаметр 10 мм. Сквозное отверстие с резьбой М3 по оси цилиндра предназначено для установки образца в печь для проведения технологических операций модификации поверхности. В центре трубы (см. рис. 1) установлено фторопластовое кольцо (фторопласт-4 ПТФЕ) с внутренним диаметром 10 мм для фиксации медного цилиндра в резонаторе. Резонансная частота определялась в основном длиной цилиндра и при выбранных размерах составляла около 4 ГГц на ТЕМ-моды.

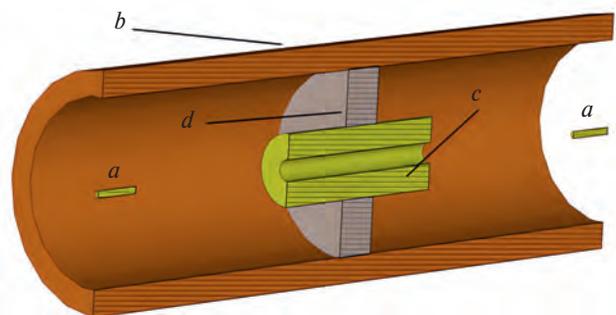


Рис. 1. Устройство резонатора: **a** – элементы ввода СВЧ сигнала коаксиального типа; **b** – внешний цилиндр резонатора; **c** – внутренний проводящий цилиндр, поверхность которого подвергается модификации; **d** – опорное фторопластовое (PTFE) кольцо.

Возбуждение резонанса на ТЕМ-моды в коаксиальном резонаторе осуществляется следующим образом. В круглом волноводе (см. рис. 1а) с помощью электрических зондов возбуждается мода TM_{01} с продольной компонентой электрического поля. Соответствующая этой моде частота отсечки для выбранного диаметра волновода составляет около 9 ГГц, что делает невозможным ее распространение вдоль волновода. В коаксиальном резонаторе за счет продольной компоненты электрического поля зонда возбуждается ТЕМ-мода колебаний, и возникает резонанс, частота которого определяется в основном длиной внутреннего цилиндра.

Низшей (по частоте) модой, распространяющейся в волноводе, является мода TE_{11} . При выбранном диаметре волноводной трубы 26 мм частота отсечки этой моды составляет около 7 ГГц, поэтому и для этой моды на частоте резонанса (4 ГГц) волновод является запертым. ТЕМ-мода в круглом волноводе также не распространяется. Таким образом, за счет выбранной геометрии и метода возбуждения электромагнитных колебаний в устройстве в целом возбуждался резонанс на “запертой” ТЕМ-моды в круглом запертом волноводе. Амплитудно-частотная характеристика устройства в широкой полосе частот представлена на рис. 2. Измерение проводилось с помощью анализатора цепей Agilent N5230A.

Для визуализации детальной структуры поля моды (см. рис. 2) и расчета электродинамиче-

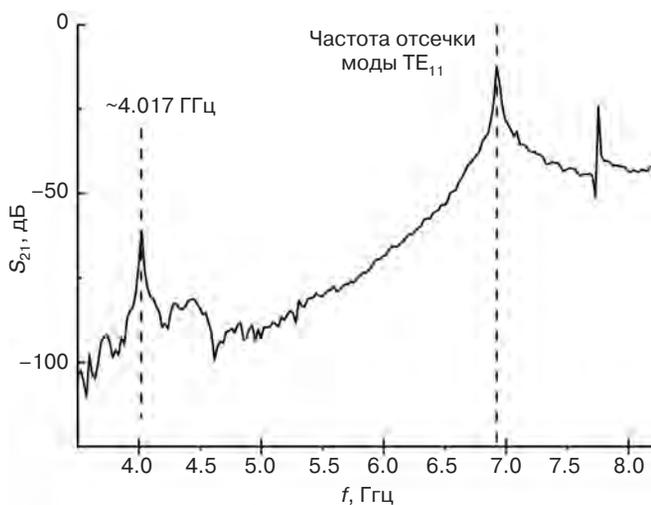


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика устройства в широкой полосе частот. На рисунке отмечена низшая мода устройства, которая находится ниже частоты отсечки устройства (низшей моды TE_{11}) в целом.

ских параметров устройства использовалась программа CST Microwave Studio. Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4. На частоте около 4 ГГц в резонаторе возбуждалась ТЕМ-мода колебаний. На рис. 3 представлена картина полей этой моды в поперечном сечении резонатора. Как видно на рисунке, напряженность электрического поля в центре устройства мала, поскольку в этом месте происходит смена направления вектора электрического поля. Поэтому установка слабо поглощающего диэлектрического кольца точно по середине цилиндра не добавляет значительных потерь. Оно служит для установки проводящего цилиндра в устройство.

Сумма токов через поперечное сечение резонатора должна равняться нулю, поэтому отношение амплитудных значений токов во внешней трубе и внутреннем цилиндре и, соответственно, соотношение потерь определяется отношением диаметров внешней и внутренней жил. Согласно расчетам, при выбранных размерах плотность поверхностных токов во внутреннем цилиндре будет в 2.6 раза больше, чем во внешних стенках резонатора. На рис. 4 представлена картина распределения поверхностных токов. При таком

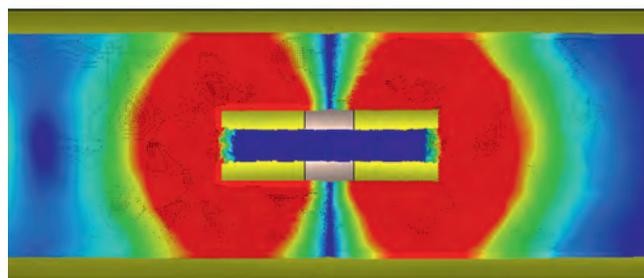


Рис. 3. Расчетное распределение напряженности электрического поля.

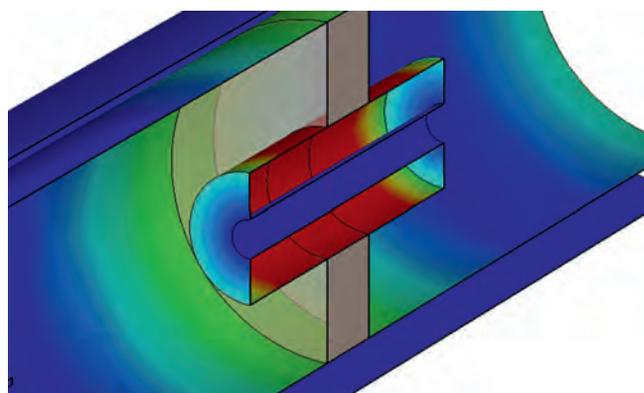


Рис. 4. Распределение абсолютных значений поверхностных токов.

распределении основной вклад в потери в стенках устройства вносят потери в центральном медном цилиндре.

Поскольку внутренний проводник установлен в диэлектрике и устройство в целом не имеет металлических соединений, потери, приходящиеся на места недостаточно плотных контактов, отсутствуют. Такой дизайн позволяет легко заменять внутренний цилиндр с различными модификациями поверхности и избегать ошибок, связанных с неконтролируемыми потерями в металлических соединениях.

Особенности устройства, описанные ранее, дают возможность использовать его для исследования влияния модификации поверхности меди на ее поверхностную проводимость. Методика измерений заключается в следующем. Поверхность внутреннего медного цилиндра подвергается модификации, в данной работе, например, покрытию одним слоем графена по методике ХОГФ (CVD) [3]. После этого образец устанавливается в резонатор, с помощью анализатора цепей по амплитудно-частотной характеристике измеряется нагруженная добротность такого резонатора. Пример амплитудно-частотной характеристики и измерений нагруженной добротности приведен на рис. 5. Для определения проводимости стенок устройства необходимо знать собственную добротность резонатора, которая определяется только потерями в стенках. Нагруженная добротность, кроме

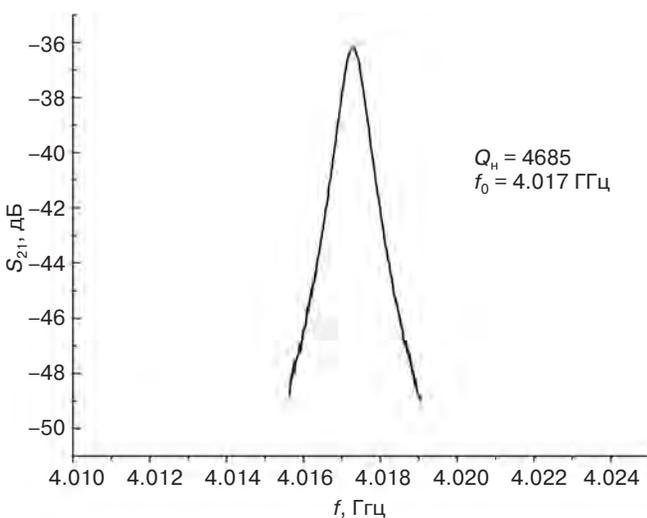


Рис. 5. Пример амплитудно-частотной характеристики описанного устройства для измерения нагруженной добротности: f_0 – резонансная частота, Q_n – нагруженная добротность.

потерь в стенках, определяется также коэффициентами связи резонатора и зависит от собственной добротности в соответствии со следующим соотношением: $Q_n = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_2)$, где Q_n – нагруженная добротность, Q_0 – собственная добротность, β_i – коэффициенты связи устройства. Коэффициенты связи выбирались из условия $\beta_i \ll 1$, поэтому величины нагруженной и собственной добротности практически совпадали. Используемый дизайн позволял с высокой точностью исследовать влияние модификации поверхности на собственную добротность устройства, и, следовательно, сопоставлять проводимость поверхности меди до и после модификации. Добротность резонатора Q зависит от проводимости σ материала, из которого он изготовлен: $Q \propto \sqrt{\sigma}$ [4]. При изменении проводимости всех элементов резонатора величина добротности изменяется в соответствии с соотношением

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta \sigma}{2\sigma}.$$

В нашем случае обработке подвергался только внутренний медный цилиндр, который изменяет свою проводимость, поэтому наблюдаемое изменение добротности несколько меньше. После отжига в атмосфере водорода добротность резонатора увеличивается примерно на 3.5%, что связано с ростом проводимости меди после модификации поверхности. Увеличение же проводимости меди связано с ростом кристаллов одной ориентации и удалением примесей. Покрытие графеном, в свою очередь, не вносит значительных изменений в проводимость, но тем не менее пассивирует поверхность меди, увеличивая ее стойкость к окислению и осаждению примесей из атмосферы. Такая пассивация позволяет сохранить проводимость меди после отжига в течение длительного времени. Более детальное исследование влияния графена на электродинамические характеристики резонатора представлено в работе [3].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен резонатор коаксиального типа на запертой моде в круглом запердельном волноводе, содержащий отрезок медной цилиндрической трубы и коаксиально установленный в ней резонансный элемент – проводящий цилиндр. Такой резонатор можно исполь-

зовать для исследования влияния модификации поверхности на электродинамические характеристики резонатора и на параметры материала центрального проводника. Устройство имеет минимальное количество электромеханических соединений, которые способствуют появлению дополнительных неконтролируемых потерь и вносят ошибки в измерения. Основные потери сосредоточены в центральном проводнике — медном цилиндре. Методика заключается в следующем: поверхность центрального проводника подвергается модификации, затем сопоставляются значения добротности резонатора до и после указанной процедуры, и оцениваются величины изменения проводимости поверхно-

сти. Погрешности метода определяются точностями измерения добротности и позиционирования центрального проводника в резонаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Park J.H., Park J.G.* // SN Applied Sciences. 2020. V. 2. Iss. 5.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2819-8>
2. *Zhuze V.P., Kurchatov B.V.* // Physik. Z. Sowjetunion. 1932. V. 2. P. 453.
3. *Nuriakhmetov Z., Chernousov Y., Sakhapov S., Smovzh D.* // Nanotechnology. 2023. V. 34. № 20.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/acbb7d>
4. *Pozar D.M.* Microwave Engineering. New York: Wiley, 2004.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ МОДУЛЬНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ СТЕНДА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИЯФ¹

© 2025 г. Д. В. Сеньков^{a, b, c, *}, Д. Н. Пурескин^a, А. А. Старостенко^{a, b},
В. А. Докутович^a, К. В. Жиляев^a, А. Ю. Пахомов^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*

^c *Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20*

* *e-mail: D.V.Senkov@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 26.11.2023 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 26.04.2024 г.

Представлены структура и алгоритмы управления модульного сильноточного источника тока, разработанного для работ по прецизионному измерению качества магнитного поля в создаваемых в ИЯФ магнитных элементах для современной ускорительной техники. Развитие ускорительных технологий постоянно повышает требования к качеству поля магнитных линз и поворотных магнитов циклических ускорителей. Появляются новые интегральные линзы со сложными законами изменения поля. Для настройки и контроля качества поля разрабатываемых в ИЯФ СО РАН магнитных элементов используются несколько стендов магнитных измерений. Одним из основных элементов стенда является прецизионный источник тока, позволяющий получить в испытуемом магнитном элементе карту поля на разных уровнях тока с погрешностями порядка 0.002%. Этот источник должен работать, сохраняя качество тока, с выходными токами от нескольких ампер до 1500 А и выходными напряжениями до 100 В при разных индуктивных нагрузках.

DOI: 10.31857/S0032816225070143

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие ускорительных технологий постоянно повышает требования к качеству поля магнитных линз и поворотных магнитов, используемых для циклических ускорителей. Появляются новые интегральные линзы со сложными законами изменения поля. Для настройки и контроля качества поля разрабатываемых в ИЯФ СО РАН магнитных элементов используются несколько стендов магнитных измерений. Представленный источник разработан в рамках работ по модернизации стенда магнитных измерений и предназначен для организации прецизионных

измерений качества магнитного поля разрабатываемых и производящихся в ИЯФ магнитных элементов ускорителей и накопителей электронных и ионных пучков. Область применения накладывает на источник довольно серьезные требования к качеству выходного тока, так как измерения полей магнитов проводится во всем диапазоне допустимых для элемента токов, при положительном и отрицательном направлениях протекания тока. Соответственно, для этих целей требуется дипольный источник тока с высокой (лучше, чем 10^{-5}) долговременной и кратковременной стабильностью выходных параметров с программируемым значением

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

выходного тока и диапазоном выходного тока и напряжения, покрывающим разрабатываемые в ИЯФ магнитные элементы [1].

2. МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

При проектировании источника был выбран модульный принцип построения силовой части с параллельной коммутацией силовых преобразователей. Такой подход позволяет использовать более доступные и, на самом деле, лучшие по характеристикам силовые компоненты. Так, при выбранной величине тока одного канала 250А количество доступных для использования полупроводниковых ключей с 50–100-процентным запасом по току (максимальный рабочий ток 400–500А) от разных производителей, включая российских и китайских, существенно больше двадцати. Если же рассматривать вариант преобразователя с одним выходным каналом, то требуются уже модули с током не менее 2 кА, и выбор сильно сужается. К тому же, и это тоже крайне немаловажный аспект при планировании срока эксплуатации источника (более 10 лет), отсутствие уникальных компонентов существенно уменьшает риск того, что производитель снимет с производства модель, заменив другой, в другом корпусе, который будет невозможно использовать в уже разработанной конструкции. Есть еще один существенный плюс модульного подхода – используя отработанную конструкцию силовой секции, можно наращивать выходной ток и мощность источника, добавляя секции. При этом, безусловно, есть и отрицательные стороны. Главная из них – увеличение сложности схемы и количества компонентов статистически ведет к увеличению вероятности отказа оборудования, и тогда придется принимать специальные меры, чтобы единичные отказы не приводили к выводу источника

из строя и могли бы быть устранены во время обычного обслуживания, не требуя длительного ремонта.

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Как уже было указано выше, используется модульная конструкция на основе силовой преобразовательной секции с максимальным выходным током 500 А и диапазоном допустимых рабочих напряжений до 250 В. В данном источнике максимальное выходное напряжение составляет 100 В и ограничено входным трехфазным выпрямителем. В случае, если требуются напряжения выше, конфигурация обмоток трехфазного трансформатора выпрямителя может быть изменена (входные обмотки перекоммутированы со схемы звезда в схему треугольник) и максимальное выходное напряжение источника может быть увеличено до 150 В ценой увеличения потерь в силовом трансформаторе. На практике эта возможность используется исключительно редко.

Силовая секция представляет собой два независимых прямоходовых мостовых преобразователя с рабочим током 250 А каждый, входы которых подключены к одной батарее емкостей. Выбор полярности выходного напряжения определяется тем, какая из диагоналей транзисторного моста активна (рис. 1).

Сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) управления для силовых транзисторов формируется в цифровом блоке управления секцией. Частота ШИМ-сигнала составляет 20 кГц, при этом фаза сигналов управления для второго преобразователя сдвинута на 180°. Это позволяет получить эффективную частоту секции в 40 кГц, облегчая фильтрацию пульсаций выходного напряжения на нагрузке (рис. 2).

В модуле управления секцией используется микроконтроллер с модулем ШИМ генера-

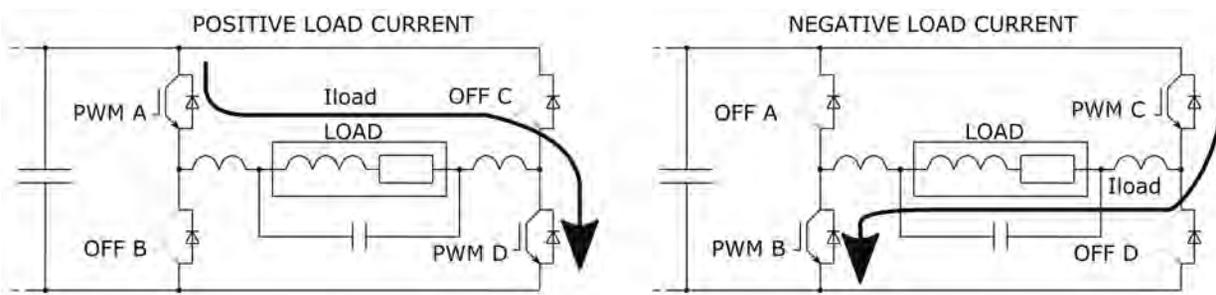


Рис. 1. Выбор полярности выходного напряжения мостового преобразователя.

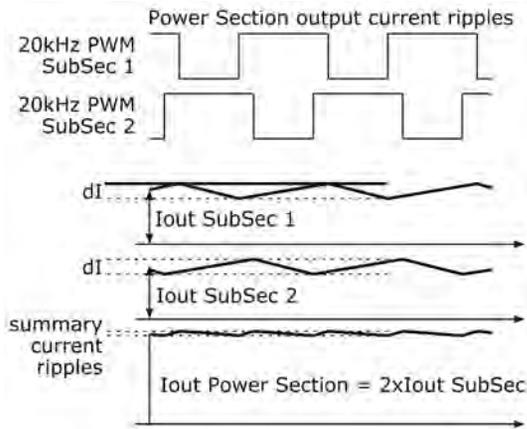


Рис. 2. Уменьшение пульсаций напряжения на нагрузке за счет увеличения эффективной частоты при сдвиге фазы управления преобразователями.

тора с увеличенной точностью (HRPWM) типа Delfino от TI. Объяснение технологии повышения точности ШИМ можно найти в [3], получающаяся временная дискретность ШИМ сигнала составляет примерно 120 пс, что дает эффективную разрядность ШИМ на частоте 20 кГц порядка 18.8 бит, обеспечивая достаточный запас по глубине регулирования на всех возможных режимах работы. На рис. 3 приведена общая блок-схема источника тока.

Напряжение питания для силовых секций формируется диодным выпрямителем, запитанным от понижающего трехфазного трансформатора мощностью 150 кВт. Выбранная конструкция обеспечивает высокий коэффициент мощности (лучше 0.95) на всех режимах работы и довольно компактна. Кроме того, при таком выпрямлении происходит мягкая коммутация тока в обмотках, что существенно снижает шум от трансформатора: при работе он ниже уровня 45 дБ. Выпрямленное постоянное напряжение поступает на три силовые секции, там оно модулируется ШИМ-сигналами управ-

ления для получения нужного уровня выходного напряжения и после сглаживается выходными LC-фильтрами. Все выходы секций подключены к общим выходным шинам, на которых расположены: прецизионный бесконтактный датчик выходного тока, гальванически отвязанный прецизионный датчик выходного напряжения и защитный коротитель, обеспечивающий защиту источника от запасенной в индуктивной нагрузке энергии. Коротитель основан на включенных встречно тиристорах и срабатывает автоматически, замыкая выход источника при превышении выходным напряжением уровня 250 В. При этом ток, протекающий в активно-индуктивной нагрузке будет циркулировать, не возвращаясь в источник, пока вся энергия не рассеется на сопротивлении нагрузки. Выходной ток каждого преобразователя измеряется отдельно для контроля работы и организации локального (на уровне управления секцией) ограничения тока.

Сигналы выходного тока и напряжения поступают в блок управления, выполненный в виде отдельного экранированного модуля. Там они оцифровываются и используются для вычисления с помощью пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора сигнала управления, который передается по цифровому интерфейсу в локальные контроллеры секций.

Весь источник выполнен в виде пыле-влагозащищенного шкафа шириной 1.8 м, глубиной 0.8 м и высотой 2.1 м (рис. 4). Для охлаждения силовых компонентов и обмоток трансформатора используется водяное охлаждение.

4. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Как уже было сказано, в источнике используется полностью цифровое управление. Аналоговые сигналы выходного тока и напряжения

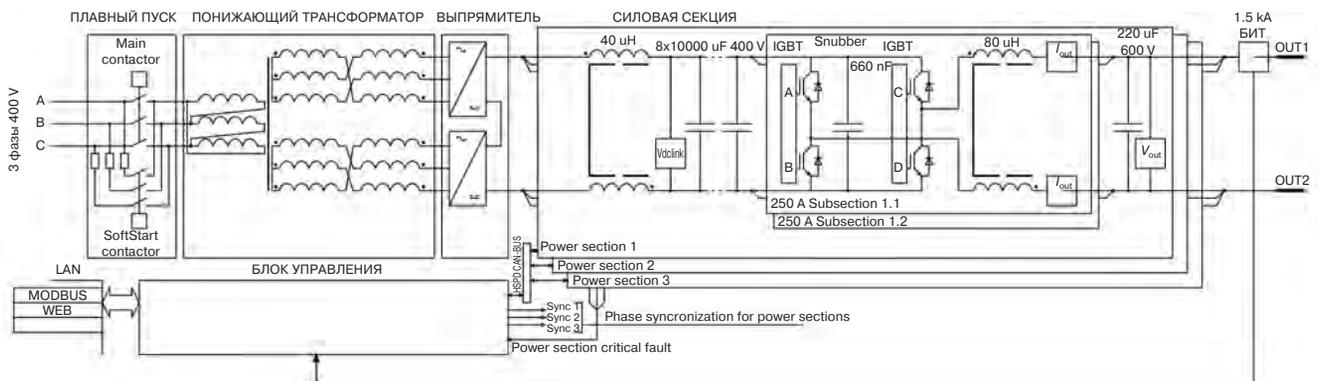


Рис. 3. Блок-схема прецизионного источника тока.



Рис. 4. Внешний вид шкафа источника тока. Показано место под четвертую секцию.

оцифровываются с частотой 20 кГц, при этом частота оцифровки синхронизирована с частотой ШИМ-сигнала, чтобы исключить интерференционные наводки от коммутации силовых ключей. Оцифрованные сигналы поступают в ПИД-регулятор, в котором реализована двухконтурная обратная связь, с основным контуром регулирования по току и дополнительным по выходному напряжению. Полученный сигнал затем передается по цифровому интерфейсу синхронно во все контроллеры секций с частотой 10 кГц. В штатной ситуации полученные данные контроллер секции прямо использует для формирования ШИМ-сигнала на силовые ключи. В случае, если ток в каком-либо преобразователе секции превышает заданный предел, обратная связь для данного преобразователя переключается на локальный уровень и осуществляется попытка стабилизации тока на уровне лимита. Если попытка оказывается неудачной, преобразователь отключается, при этом остальные продолжают работать в общей петле обратной связи.

Для модульной конструкции, конечно, возможен и другой вариант стабилизации тока – когда ток стабилизируется в каждой секции и затем суммируется на выходе. При этом ток гарантировано делится по секциям равномерно, и, кроме того, секция является законченным устройством, которое может применяться как отдельный источник питания. Однако в таком случае требуется использование в каждом локальном контроллере прецизионного датчика тока и прецизионной электроники, что усложняет и удорожает контроллер, так что от такого подхода

при разработке было решено отказаться. Также можно было реализовать работающую постоянно, а не в режиме ограничения тока, обратную связь по току в секциях, но это усложняет алгоритмы управления и требует качественного разделения полос локальной и общей обратной связи. Поэтому ввиду того, что при выбранном подходе с единой петлей ОС неравенство токов в секциях не превышает 10%, было решено выбрать именно его.

5. КАЧЕСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО ТОКА

Источник тока был запущен в работу и используется для задания тока в испытываемых магнитных элементах (поворотных магнитах и линзах) [1, 2]. От источника требуется стабильная работа на широкий спектр индуктивных нагрузок (с постоянными времени от единиц секунд до единиц миллисекунд) во всем диапазоне выходных токов – от ампер до максимальных 1.5 кА. И источник с данной задачей успешно справляется. На рис. 5 показаны графики полученные при тестовых испытаниях источника, подключенного к калибровочному магниту [2]. Вверху значение измеренного

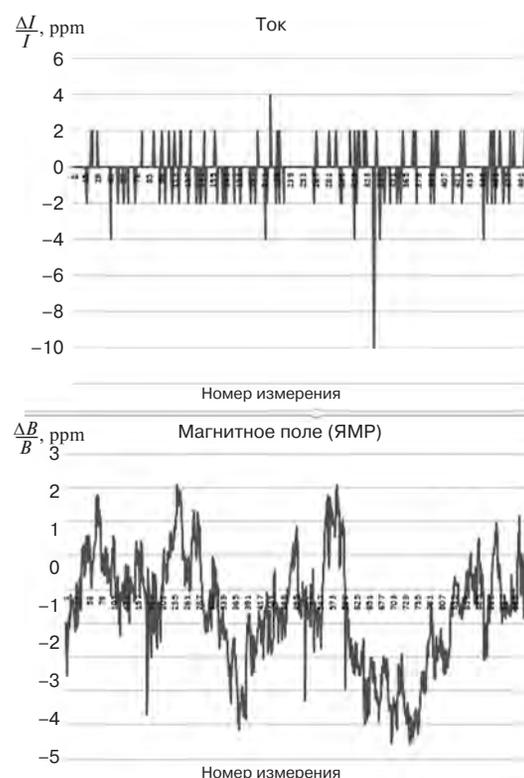


Рис. 5. Измерения качества стабилизации тока.

выходного тока, внизу измерения магнитного поля, получающегося при протекании этого тока в магните абсолютным датчиком магнитного поля (ЯМР-магнитометром).

Полученная относительная точность стабилизации тока – лучше $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ (размах от пика до пика).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источник был испытан и введен в эксплуатацию в 2020 году и используется по настоящее время для магнитных измерений. Нестабильность тока (долговременная и пульсации) составляет менее 10 ppm на токах от 100 до 1500 А и до 0.01% от выходного тока на токах 1–100 А. Модульная конструкция и специальные алгоритмы контроллера позволяют эксплуатировать источник при отключении одной или двух сек-

ций, не останавливая измерения магнитов на время профилактики.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Riabchenko K.K., Pakhomov A. Yu., Rybitskaya T.V., Starostenko A.A., Tsyganov A.S., Zhiliaev K.V.* // Proc. IPAC'21. 2021. Campinas, SP, Brazil. P. 2367. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB364>
2. *Рябченко К.К., Пахомов А.Ю., Рыбичкая Т.В., Старостенко А.А.* // ПТЭ. 2019. № 6. С. 117. <https://doi.org/10.1134/S0032816219060132>
3. *Самоделов А., Игнатов С.* // Силовая электроника. 2012. № 2. С. 54.

КОММЕРЧЕСКИЙ СВ-МАГНЕТРОН В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ¹©2025 г. Ю. Д. Черноусов^{а, *}, И. В. Шеболаев^а^а *Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, Институтская ул., 3*** e-mail: chern@catalysis.ru*

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 14.03.2024 г.

Принята к публикации 26.04.2024 г.

Приведены параметры коммерческих СВ-магнетронов S-диапазона мощностью 1 кВт и оценена возможность их использования в импульсном режиме для ускорительной техники. Коммерческие СВ-магнетроны в стандартном исполнении обладают превосходными импульсными характеристиками: диапазон регулирования импульсной мощности с высоким КПД до 8 кВт, длительность импульса от 0.3 мкс до непрерывного режима, частота следования не менее 1 МГц. Возможен режим формирования последовательностей парных импульсов с регулируемым временным сдвигом от 1 мкс. Параметры имеют место как в режиме автогенерации, так и в режиме синхронизации внешним сигналом. Для измерений применен высоковольтный импульсный источник питания с регулируемыми параметрами. На пассивной резистивной нагрузке источник обеспечивает выходное высокое напряжение 4.0–5.2 кВ, выходной ток до 3 А в импульсном и 0.5 А в среднем режиме, длительность импульса от 0.1 мкс, фронт импульса менее 0.1 мкс, частота следования до 1 МГц.

DOI: 10.31857/S0032816225070159

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнетроны широко используются в быту, промышленности, ускорительной и СВЧ-технике, в научных исследованиях [1–21]. По принципу действия магнетрон является автогенератором с относительно низкой стабильностью частоты. Однако в режиме внешней синхронизации стабильность частоты магнетрона определяется стабильностью частоты инжектируемого сигнала, что приближает его по этому параметру к усиливающим клистроном. Предложено и изучается использование синхронизованных магнетронов, работающих с амплитудным и фазовым управлением, для питания даже высокодобротных сверхпроводящих резонаторов [5–7].

Исследованы методы и устройства сложения СВЧ-мощностей магнетронов [8–13]. Работа автогенераторов и магнетронов в режиме внешней синхронизации изучалась в течение многих лет [14–21]. Наиболее распространены коммерческие неимпульсные (Continuous Wave – CW)

магнетроны S-диапазона мощностью 1 кВт. Исходя из общей численности населения, количество таких устройств можно оценить примерно в 10^8 – 10^9 штук, цена устройства лежит в пределах \$(20–50)\$. Приведенные данные объясняют целесообразность использования коммерческих СВ-магнетронов в научных и технологических целях.

В работе приведены характеристики СВ-магнетронов S-диапазона мощностью 1 кВт в мощном импульсном режиме, изучение которых начато в работах [18, 22], и оценена возможность использования этих устройств в ускорительной технике для создания линейного ускорителя электронов.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНЕТРОНА

Импульсные параметры СВ-магнетронов измерялись на стенде, структурная схема которого представлена на рис. 1 [18, 22]. Приведенные далее данные относятся к серийному

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

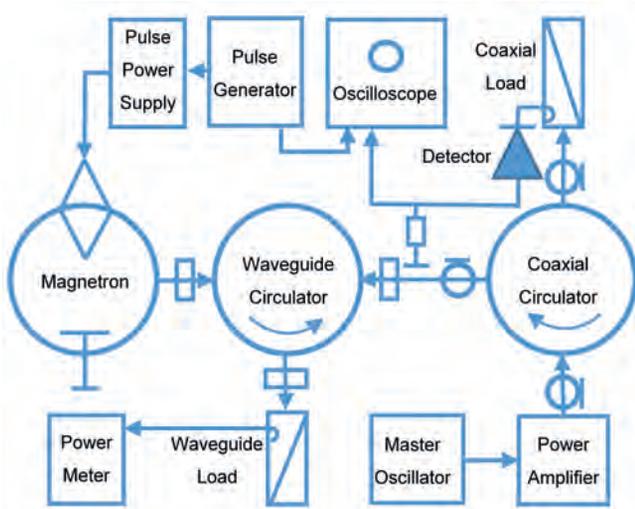


Рис. 1. Блок схема измерительного стенда.

коммерческому СВ-магнетрону 2М246. Магнетрон подключен к измерительной волноводной нагрузке через волноводный циркулятор (VALVO VHU1131). Импульсный источник питания служит для подачи на магнетрон импульсного высокого напряжения и тока накала катода. Управление источником и запуск осциллографа осуществляется генератором импульсов (Г5-56). Синхронизирующий СВЧ-сигнал на магнетрон поступает от задающего генератора (Г4-79) и усилителя мощности через коаксиальный циркулятор.

Коаксиальный циркулятор служит для защиты усилителя мощности, снабжен зондом для регистрации огибающей СВЧ-мощности магнетрона. Усилитель обеспечивал импульсную СВЧ-мощность до 150 Вт. Для измерения уровня СВЧ-мощности магнетрона и формы огибающей волноводная нагрузка оснащена СВЧ-зондом с калиброванным переходным затуханием –60 дБ. СВЧ-мощность измерялась соответствующим прибором (Agilent E4418B). СВЧ-сигнал детектировался и регистрировался осциллографом (Tectronix TDS-2014). Стабильность частоты определялась по анализу формы СВЧ-сигнала, отраженного от измерительного резонатора.

Импульсный источник питания (рис. 2) питает магнетрон током накала катода, импульсами высокого напряжения с регулируемой амплитудой, длительностью и частотой следования и управляется внешним генератором импульсов. Схема источника содержит выходную накопительную емкость, которая с помощью управляемого высоковольтного ключа подключается к нагрузке – катоду магнетрона.



Рис. 2. Высоковольтный источник импульсного питания.

Основные параметры источника: выходное напряжение 4.0–5.2 кВ, выходной ток до 3 А в импульсном и 0.5 А в среднем режиме, длительность импульса от 0.1 мкс, фронт импульса менее 0.1 мкс, частота следования до 1 МГц. Источник оснащен датчиками формы импульса, значений высокого напряжения и среднего тока. Устройство имеет габариты 480 × 520 × 190 мм³ и может быть установлено в стойку стандартных размеров. Вес прибора 14.6 кг.

Зависимости КПД магнетрона от уровня генерируемой импульсной СВЧ-мощности как для коротких, так и для длинных импульсов представлены на рис. 3. Характеристика рассчитывалась как отношение средней мощности

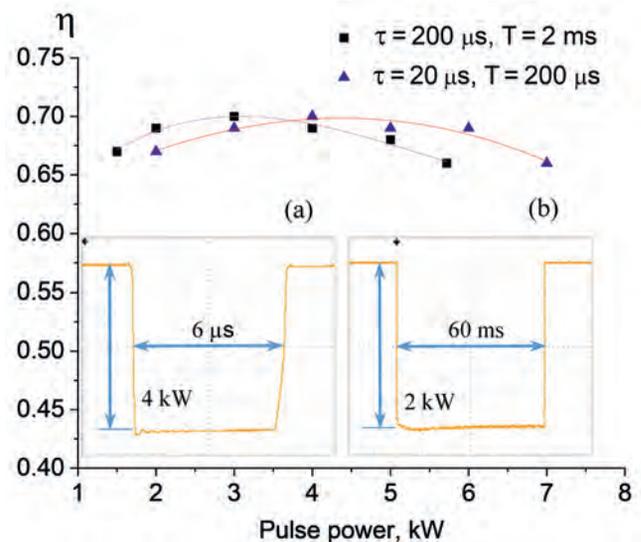


Рис. 3. Зависимость КПД магнетрона η от мощности СВЧ-импульса при постоянной скважности $T/t = 10$ (T – период следования импульсов, t – длительность импульса). На вставках представлена форма огибающей СВЧ-импульсов при коротком (а) и длинном (б) импульсах: а – развертка 1 мкс/дел, длительность импульса $t = 6$ мкс, фронты менее 0.5 мкс, импульсная СВЧ-мощность около 4 кВт; б – развертка 10 мс/дел, длительность импульса $t = 60$ мс, импульсная СВЧ-мощность около 2 кВт.

СВЧ к средней выходной мощности импульсного источника питания. КПД коммерческих СВ-магнетронов близок к 70% как в импульсном (рис. 3), так и в непрерывном [21] режимах.

Типичная форма огибающей СВЧ-импульсов показана на вставке к рис. 3. В возможном диапазоне регулировки длительности импульса от 0.3 мкс до 1 с форма огибающей близка к прямоугольной. Время нарастания СВЧ-импульсов не более 0.1 мкс. При минимальной длительности импульса 0.3 мкс максимальная частота повторения до 1 МГц.

Работа магнетрона с высокой частотой следования парных импульсов продемонстрирована на рис. 4. Возможна настройка как частоты следования пар импульсов, так и временного интервала между ними. В таком режиме парных импульсов магнетрон пригоден для использования в системах таможенного контроля для быстрого переключения энергии ускоренного пучка [23] и для импульсной ЭПР-спектроскопии [24].

Были проведены измерения работы магнетрона в режиме синхронизации внешним СВЧ-сигналом. В работе [18] показано, что экспериментальная зависимость полосы захвата магнетрона в режим синхронизации от мощности сигнала инжекции соответствует теоретической формуле, приведенной в [14, 15, 18].

Стандартным методом определения стабильности частоты СВЧ-сигнала является исследование формы огибающей СВЧ-мощности, отраженной от высокодобротного резонатора [3]. Анализируя форму такого сигнала (рис. 5), можно сравнить стабильность частоты синхронизированного магнетрона и задающего генератора. Добротность измерительного резонатора выбиралась близкой к добротности реальных ускоряющих резонаторов, коэффициент связи резонатора с питающей линией $k \geq 1$.

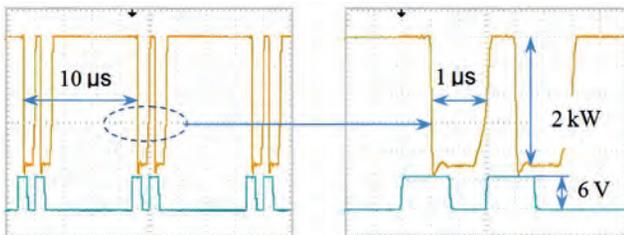


Рис. 4. Последовательность парных импульсов. Импульсная СВЧ-мощность магнетрона около 2 кВт (отрицательные импульсы). Триггерные импульсы 6 В (положительные импульсы): **a** – частота развертки 2.5 мкс/дел; **b** – частота развертки 0.5 мкс/дел.

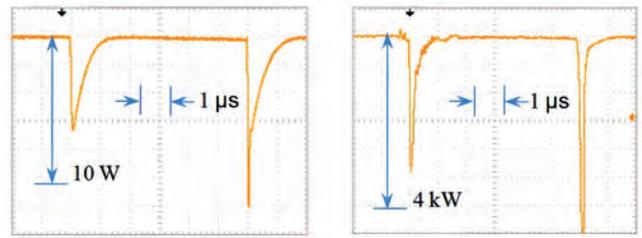


Рис. 5. Форма огибающей микроволновых импульсов, отраженных от измерительного резонатора: **a** – задающий генератор, мощность СВЧ-импульса 10 Вт; **b** – магнетрон в режиме синхронизации внешним сигналом, мощность СВЧ-импульса 4 кВт. Развертка 1 мкс/дел.

3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА СВ-МАГНЕТРОНАХ

Ускоритель электронов может состоять из набора последовательно расположенных высокодобротных резонаторов с нагруженной добротностью $Q = 5 \cdot 10^3$, каждый из которых питается от отдельного магнетрона, синхронизированного внешним СВЧ-сигналом. В регулярной части ускорителя при энергии пучка более 1 МэВ можно использовать идентичные резонаторы оптимизированной формы. Ускоряющее напряжение U резонатора определяется известным соотношением: $U = (2\sqrt{ZPk} - ZI)/(1+k)$, где Z – эффективное шунтирующее сопротивление резонатора, P – входная мощность СВЧ, k – коэффициент связи резонатора с питающей линией, I – ток пучка. Принимая для оценки $Z = 2.5$ МОм, $P = 5$ кВт, $k = 1.5$, $I = 0.01$ А, получаем прирост энергии электронов $eU = 100$ кэВ и прирост мощности пучка $P = UI = 1$ кВт на резонатор.

Как показали исследования, фаза синхронизированного магнетрона слабо (не более нескольких градусов) меняется как в течение импульса, так и от импульса к импульсу [25], поэтому для обеспечения режима ускорения электронов резонаторами необходима только система подстройки фазы колебаний отдельных магнетронов.

На рис. 5 приведены осциллограммы, характеризующие стабильность частоты синхронизированного СВ-магнетрона 2М246. Нагруженная добротность измерительного резонатора составляла $Q = 5 \cdot 10^3$, частота колебаний магнетрона $f_0 \approx 2.47 \cdot 10^9$ Гц, время установления колебаний $\tau = Q/\pi f_0 \approx 6 \cdot 10^{-7}$ с. Как видно на рисунке, переходный процесс установления колебаний в измерительном резонаторе завершается менее

чем за микросекунду. На плато амплитуда отраженного сигнала не меняется, частота генерации магнетрона постоянна. При таких параметрах СВЧ-мощность синхронизованного магнетрона может быть использована для ускорения заряженных частиц в высокодобротных резонаторах с собственной добротностью $Q > 10^4$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коммерческие СВ-магнетроны S-диапазона (2450 МГц) со средней мощностью 1 кВт (например, магнетрон 2М246) показали превосходные характеристики, и в импульсном режиме обеспечивают СВЧ-мощность до 8 кВт, устойчиво работают в широком диапазоне регулировки длительности импульса от 0.3 мкс до непрерывного режима. Такие магнетроны в режиме внешней синхронизации могут быть применены для создания линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) малой энергии.

В то же время требованию по уровню СВЧ-мощности для создания ЛУЭ удовлетворяет, например, промышленный СВ-магнетрон М-117 производства “Торий” (Москва). В соответствии с паспортом выходная микроволновая мощность такого магнетрона составляет 5 кВт в непрерывном режиме на рабочей частоте 2450 МГц. Для получения пучка электронов с энергией 10 МэВ необходимо 100 резонаторов. Соответственно, мощность пучка ЛУЭ на таких магнетронах будет составлять 100 кВт.

В режиме парных импульсов магнетрон удобен для использования в системах таможенного контроля для быстрого переключения энергии ускоренного пучка ЛУЭ.

Приведенные данные показывают, что синхронизованные внешним сигналом коммерческие СВ-магнетроны в импульсном режиме пригодны для использования как в СВЧ-технике, научных исследованиях, так и в ускорительной технике для создания ЛУЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vyas S.K., Verma R.K., Maurya S., Singh V.V. P.* // *Frequenz*. 2016. V. 70. № 9. P. 455.
<https://doi.org/10.1515/freq-2015-0196>
2. *Hoz A., Loupy A.* *Microwaves in organic synthesis*. Weinheim: Wiley-VCH. 2012.
<https://doi.org/10.1002/9783527651313>
3. *Wangler Th. P.* *RF Linear accelerators*. Berlin: Wiley-VCH. 2008.
<https://doi.org/10.1002/9783527623426>
4. *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В., Иванников В.И., Икрянов И.М., Болотов В.А., Танашев Ю.Ю.* // *ПТЭ*. 2019. № 2. С. 136.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020046>
5. *Dexter A.C.* // *Proc. LINAC2014*. Geneva, Switzerland. 2014. P. 751.
6. *Kazakevich G., Lebedev V., Yakovlev V., Pavlov V.* // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*. 2016. V. 839. P. 43.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.09.044>
7. *Read M., Ives R.L., Bui T., Collins G., Marsden D., Chase B., Reid J., Walker C., J. Conant.* // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019. V. 47. № 9. P. 4268.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2932264>
8. *Zhang Y., Huang K., Agrawal D.K., Slawecki T., Zhu H., Yang Y.* // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2017. V. 64. P. 4272.
<https://doi.org/10.1109/TED.2017.2737555>
9. *Liu Z., Chen X., Wan J., Wu P., Yang M., Huang K., Liu C.* // *IEEE Electron Device Lett.* 2018. V. 39. № 9. P. 1425.
<https://doi.org/10.1109/LED.2018.2857808>
10. *Yang B., Mitani T., Shinohara N.* // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2019. V. 66. № 1. P. 709.
<https://doi.org/10.1109/TED.2018.2877204>
11. *Chen X., Yang B., Shinohara N., Liu C.* // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2020. V. 67. № 9. P. 3802.
<https://doi.org/10.1109/TED.2020.3009901>
12. *Lai C., Zhao C., Li K. et al* // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2020. V. 68. № 10. P. 4424.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3006488>
13. *Chen X., Yang B., Shinohara N., Liu C.* // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2021. V. 69. № 4. P. 2267.
<https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3056550>
14. *David E.E.* In *Crossed Field Microwave Devices*. V. 2. New York: Academic Press. 1961. P. 375.
15. *Райнер М.М.* // *Вопросы радиоэлектроники. Серия 1: Электроника*. 1961. № 8. С. 12.
16. *Pengvanich P., Neculaes V.B., Lau Y.Y., Gilgenbach R.M., Jones M.C., White W.M., Kowalczyk R.D. J.* // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98. № 11. P. 114903.
<https://doi.org/10.1063/1.2132513>
17. *Tahir I., Dexter A., Carter R.* // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2006. V. 53. № 7. P. 1721.
<https://doi.org/10.1109/TED.2006.876268>
18. *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В., Икрянов И.М., Болотов В.А., Танашев Ю.Ю., Медведев Л.Э., Воскобойников Р.В.* // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т.46. № 1. С. 36.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.01.48862.18051>

19. *Zarghani M., Mohsenzade S., Kaboli S.* // IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2021. V. 9. № 3. P. 3019. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3006013>.
20. *Mitani T., Shinohara N., Matsumoto H.* // Proc. IEEE Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC). (Kitakyushu, Japan). 2007. P. 1.
21. *Wang H., Plawski T., Rimmer R.A., Neubauer M., Dudas A.* // Proc. IEEE Int. Vac. Electron. Conf. (IVEC). (Monterey, CA. USA). 2016. P. 1.
22. *Chernousov Y.* // IEEE Trans. Electron Devices. 2023. V. 70. № 2. P. 826. <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3225760>
23. *Арлычев М.А., Бельх А.В., Наливаев А.В., Новиков В.Л., Огородников С.А., Шевелев И.Е.* Патент на изобретение RU 2 566 468 С1. Оpubл. 27.10.2015. Бюл. № 30.
24. *Tsvetkov Yu. D., Bowman M.K., Grishin Yu. A.* Pulsed Electron–Electron Double Resonance: Nanoscale Distance Measurement in the Biological, Materials and Chemical Sciences. Springer. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05372-7>
25. *Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В.* // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. С. 1546.

УДК 621.384.665+621.387.332

ГЕНЕРАТОРЫ ПИТАНИЯ УДАРНОГО МАГНИТА ДЛЯ ВЫПУСКА ИОНОВ ИЗ БУСТЕРА В ТРАНСПОРТНЫЙ КАНАЛ НУКЛОТРОНА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA¹

© 2025 г. Д. А. Шведов^{а, *}, О. В. Анчугов^а, Д. И. Бажутов^а, А. А. Фатеев^б, А. В. Тузиков^б

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

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

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

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Для питания быстрого ударного магнита (кикера) выпуска ионов из ускорителя–бустера в канал бустер–нуклотрон ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) были разработаны, изготовлены и испытаны генераторы на основе псевдоискровых коммутаторов ТПИ1-10к/75. Выбор коммутатора был обусловлен уникальностью требований к параметрам выходного импульса и невозможностью использования твердотельных высоковольтных ключей из-за высокого радиоактивного фона в местах перепусков пучков на комплексе. Для обеспечения фронта длительностью 500 нс и ширины плато импульса 500 нс с целью снижения влияния индуктивности проводников магнита в 650 нГн было принято решение о его биполярном “встречном” питании. Благодаря этому были получены токи более 30 кА при зарядном напряжении формирующей линии до 50 кВ. В статье описаны схемы генераторов, приведены результаты их испытаний в ИЯФ СО РАН и непосредственно на рабочем месте на комплексе NICA.

DOI: 10.31857/S0032816225070165

1. ВВЕДЕНИЕ

В ударных магнитах без ферромагнитных сердечников, в отличие от часто используемых ферритовых ударных магнитов с керамической вакуумной камерой, отклоняющее магнитное поле формируется посредством токнесущих проводников и проводящих экранов. Для ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) был разработан подобный ударный магнит для выпуска ионов в канал, соединяющий бустер-синхротрон и экспериментальный ускоритель нуклотрон [1, 2]. Для получения необходимого значения магнитного поля 0.17–0.18 Тл в области выводимого пучка была применена несимметричная конструкция магнита без использования ферромагнитного сердечника.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО МАГНИТА ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА КОМПЛЕКСА NICA

Подробное описание ударного магнита было дано статье [3]. Его основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры ударного магнита выпуска из бустера

Параметр	Значение
Эффективная длина магнита, м	1.6
Максимальная жесткость выводимых частиц, Тл · м	25
Максимальное магнитное поле, Тл	0.18
Максимальный ток в электродах, кА	32
Неоднородность поля в области пучка	±1%
Диаметр рабочих электродов, мм	8

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

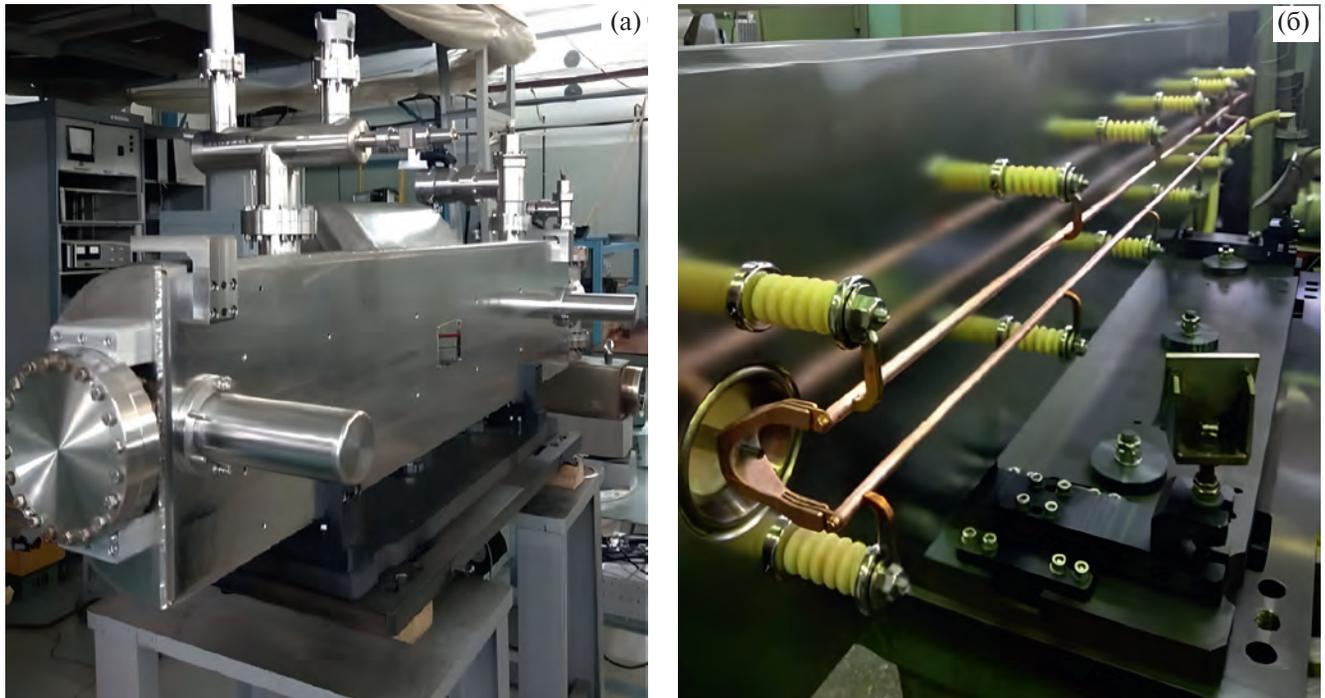


Рис. 1. Фотографии ударного магнита выпуска из бустера комплекса NICA: а – внутренняя часть; б – общий вид в сборе с экранирующей стенкой и тоководами с защитными кожухами.

Ударный магнит представляет собой конструкцию, не содержащую ферромагнитного сердечника, которая состоит из одной пары проводников (рис. 1а), соединенных параллельно, и стального экрана с полукруглым сечением, имеющим плоскую стенку в районе выводимого пучка.

Полная индуктивность пары проводников составляет 650 нГн. В случае однополярного питания зарядное напряжение формирующих линий (ФЛ) превышает 100 кВ, что предполагает существенные трудности при создании импульсного генератора на таком напряжении. Для обеспечения необходимых параметров ударного магнита была выбрана схема питания пары электродов-проводников с помощью двух генераторов с разной полярностью токов выходных импульсов. На рабочие проводники импульсы подаются с противоположных концов через высоковольтные вводы, расположенные на плоской части экрана ударного магнита (см. рис. 1а). При таком подключении эффективная индуктивность ударного магнита снизилась в 2 раза, что позволило получить необходимую скорость нарастания фронта импульса и ширину рабочего “плато” при зарядном напряжении не более 50 кВ.

3. ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ УДАРНОГО МАГНИТА

Общая схема питания ударного магнита приведена на рис. 2.

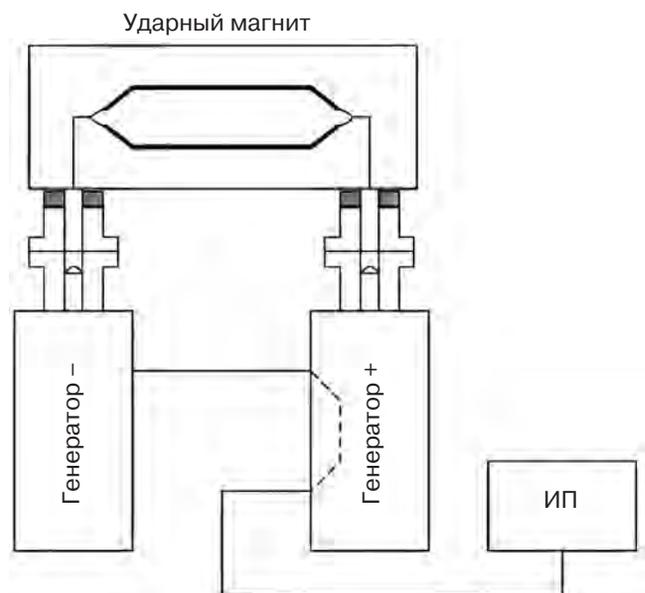


Рис. 2. Общая схема питания ударного магнита.

На рис. 3 представлена принципиальная схема генератора положительной полярности.

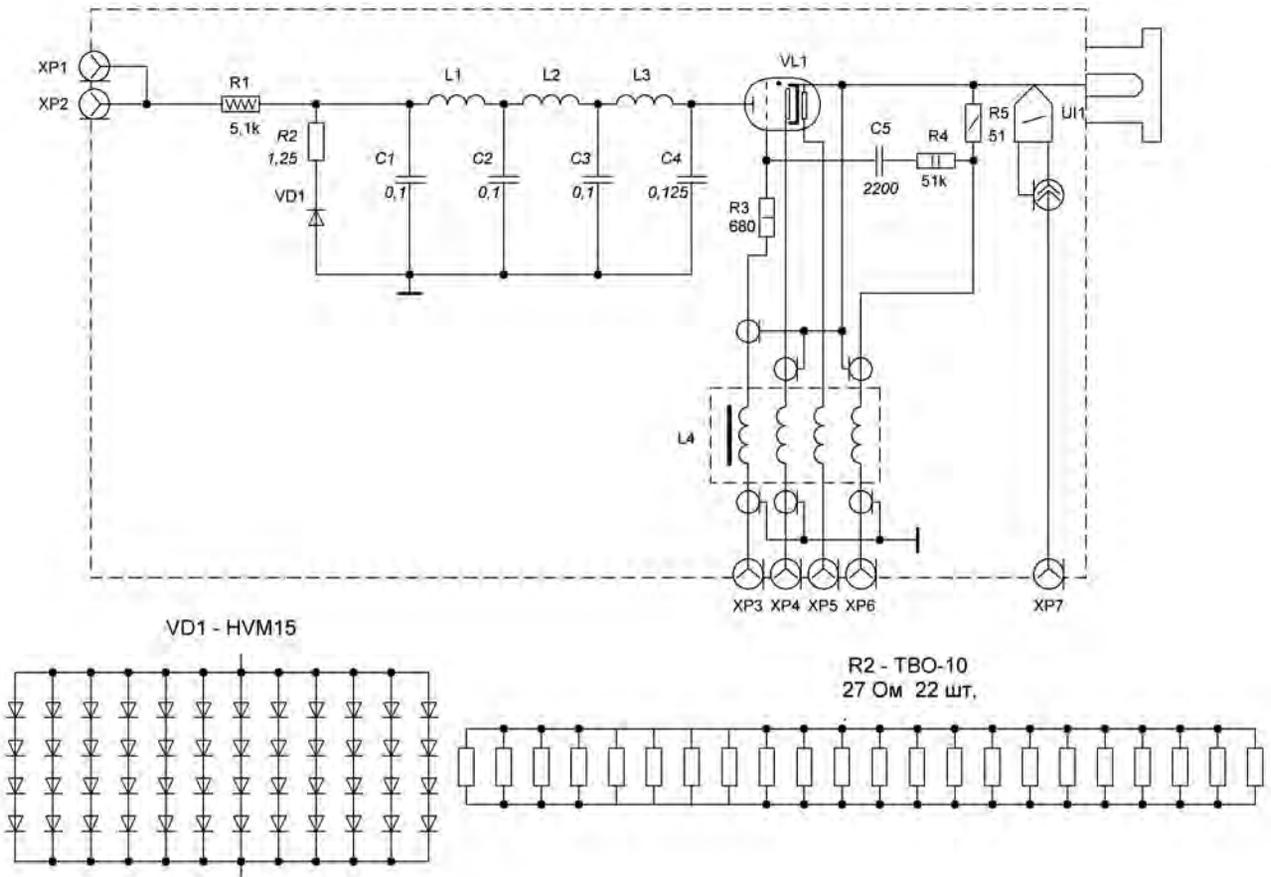


Рис. 3. Принципиальная схема генератора положительной полярности.

Оба генератора включают в себя накопительные ФЛ, каждая из которых состоит из отдельных высоковольтных малоиндуктивных конденсаторов на основе бумажно-пленочных секций, разработанных в ИЯФ совместно с заводом “НЗК” (Новосибирск), и катушек индуктивности. В качестве ключевого элемента используется тиратрон с холодным катодом типа ТПИ1-10К/75. Все элементы генераторов с выходными токовыводами, так же как и входные вводы ударного магнита, заполняются до вакуумной границы элегазом (SF_6) под избыточным давлением до 0.05 МПа для обеспечения электрической прочности конструкции.

Стационарный источник питания (ИП) типа Spellman заряжает формирующую линию с постоянным током до 50 кВ. При срабатывании ключа VL_1 в индуктивности ударного магнита начинает формироваться импульс тока длительностью равной двойной электрической длине ФЛ в 660 нс. Емкость трех конденсаторов ФЛ выбрана по 100 нФ, а конденсатор, ближайший к коммутатору, имеет увеличенную емкость 125 нФ для коррекции формы вершины выходного импульса. Так же в схему введена цепь

поглощения отражений, следующих за основным выходным импульсом при работе на индуктивную нагрузку: R_2 – согласующая активная нагрузка величиной 1.25 Ом, равная волновому

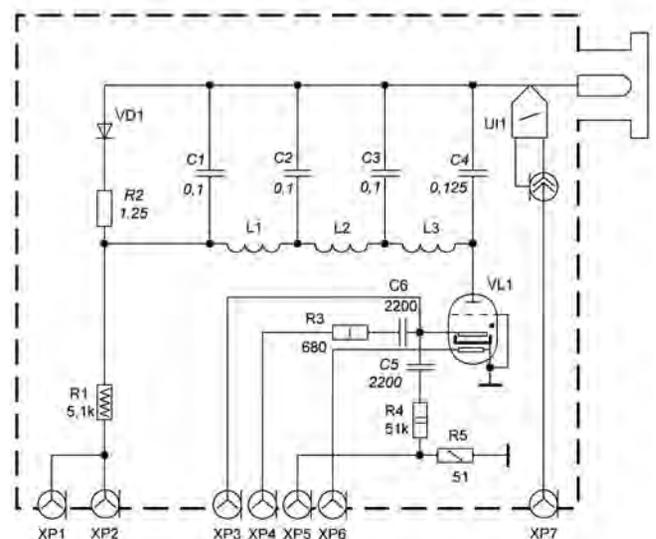


Рис. 4. Принципиальная схема генератора отрицательной полярности (R_2 и VD_1 аналогичны генератору положительной полярности).

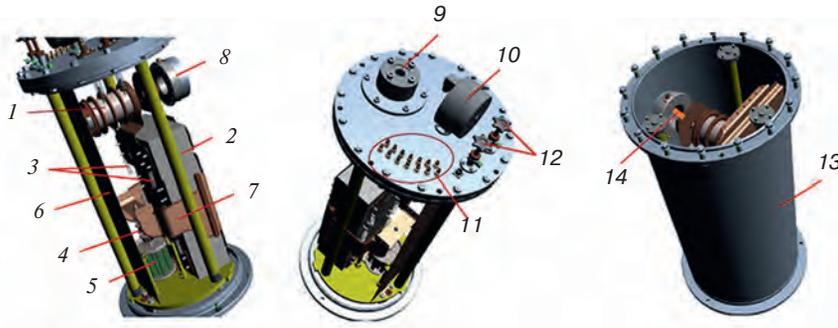


Рис. 5. Основные конструктивные узлы генератора отрицательной полярности: 1 – тиратронный коммутатор ТПИ1-10к/75; 2 – конденсаторы ФЛ; 3 – катушки индуктивности ячеек ФЛ; 4 – диодная сборка; 5 – внутренняя согласующая нагрузка; 6 – шина земляная; 7 – токоведущая шина; 8 – пояс Роговского; 9 – газовая защитная мембрана; 10 – контрольный манометр; 11 – разъемы запуска и контроля рабочих параметров тиратрона; 12 – газовые вентили; 13 – газонаполненный бак; 14 – токовывод на ударный магнит.

сопротивлению ФЛ; VD_1 – параллельно-последовательная диодная сборка.

Как следует из схемы, в генераторе с положительной полярностью тока (см. рис. 3) один полюс ФЛ заземлен, а другой через изолированный высоковольтный коммутатор подключается к ударному магниту. В генераторе отрицательной полярности (рис. 4) наоборот: один полюс ФЛ изолирован относительно земли через индуктивность ударного магнита, а другой подключается к тиратрону, у которого катод заземлен. Поэтому при запуске коммутатора в таком включении в нагрузку протекает ток отрицательной полярности.

Основные параметры генераторов выпуска из бустера представлены в табл. 2.

На рис. 5 показана конструкция основных узлов генератора отрицательной полярности.

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов с поясов Роговского (UI_1 на схемах), снятые



Рис. 6. Выходные импульсы генераторов с положительной и отрицательной полярностью.

Таблица 2. Основные параметры генераторов ударного магнита выпуска

Параметр	Значение
Максимальный ток нагрузки, кА	37
Номинальный ток нагрузки, кА	32
Максимальное выходное напряжение, кВ	55
Ширина “плато” импульса на уровне $\pm 3\%$ от максимума амплитуды, нс	500
Длительность переднего фронта импульса, нс	500
Временной джиттер от импульса к импульсу, нс	± 5

в канале бустер–нуклотрон при работе ударного магнита в номинальном режиме. Зарядное напряжение 47 кВ и амплитуда тока 32 кА.

В настоящее время при невысокой интенсивности захвата ионов углерода допускается более пологий фронт импульса (более 500 нс). Ширина плато на вершине (см. рис. 6) на уровне примерно 3% от максимальной амплитуды несколько меньше, порядка 400 нс. Длительность переднего фронта импульса около 600 нс.

Для выпуска ионов с высокой интенсивностью, где требуются более жесткие требования к данным параметрам, были проведены работы по расширению “плато” импульса. На рис. 7, 8 приведены осциллограммы импульсов после корректирования индуктивностей звеньев ФЛ. На рис. 9 показаны фотографии генераторов в канале на своем рабочем месте. Было изменено количество витков катушек индуктивности

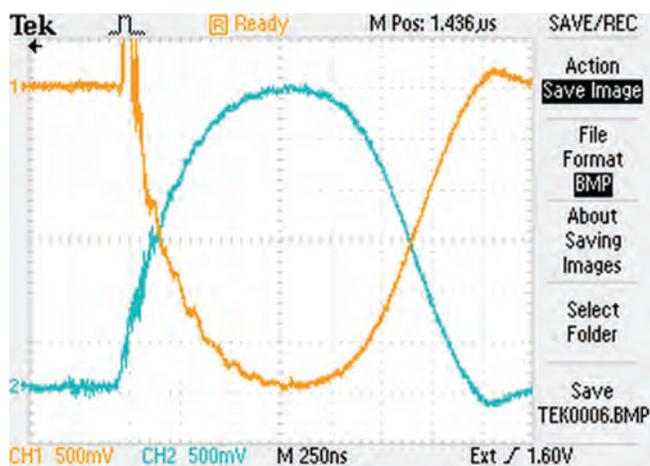


Рис. 7. Осциллограмма импульса после корректировки катушек индуктивности. Временной масштаб по горизонтальной оси 250 нс/дел.

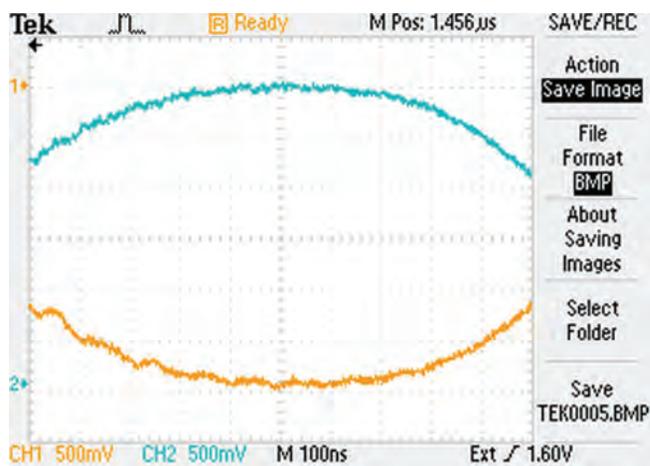


Рис. 8. Осциллограмма импульса после корректировки катушек индуктивности. Временной масштаб по горизонтальной оси 100 нс/дел.

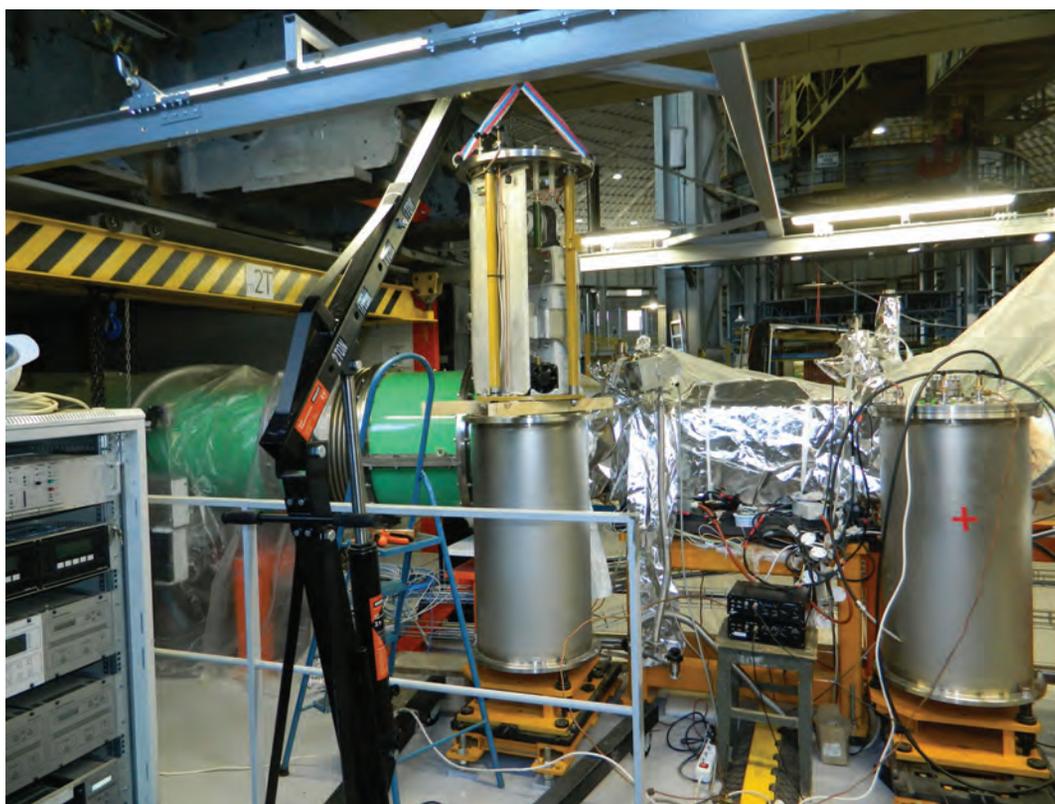


Рис. 9. Генераторы, подключенные к ударному магниту, на своем рабочем месте в канале бустер–нуклотрон комплекса NICA.

ячеек и получена оптимальная форма вершины и фронта импульса: 500 нс на уровне 3% от максимальной амплитуды импульса. Длительность переднего фронта – 500 нс, что и требовалось в техническом задании. Также проводились работы по экранированию контрольных цепей поясов Роговского с целью снижения влияния высоковольтных наводок на эти цепи для получения адекватной формы импульса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время генераторы включены в работу на комплексе NICA для выпуска пучка ионов из бустера в транспортный канал нуклотрона, а также один генератор с отрицательной полярностью временно питает сразу две секции инжекционного ударного магнита. Они вполне обеспечивают управление пучками

на впуске и выпуске указанных выше ускорителей, что позволяет использовать аналогичные устройства и далее для инъекции ионных пучков как в строящемся коллайдере NICA, так и в других подобных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alexandrov V.S., Gorbachev E.V., Tuzikov A.V., Fateev A.A.* // Phys. of Particles and Nuclei Letters. 2012. V. 9. Iss. 4. P. 425.
<https://doi.org/10.1134/S1547477112040073>
2. *Trubnikov G., Agapov N., Brovko O., Butenko A., Donets E., Eliseev A., Fimushkin V., Gorbachev E., Govorov A., Ivanov E., Karpinsky V., Kekelidze V., Khodzhbagiyani H., Kovalenko A., Kozlov O. et al.* // Proc. of 4th International Particle Accelerator Conference IPAC'13. Shanghai, China. 2013. P. 1343.
3. *Анчугов О.В., Шведов Д.А., Киселев В.А., Журавлев А.Н., Сияткин С.В., Бажутов Д.И., Тузи-ков А.В., Фатеев А.А., Петухов А.С.* // ПТЭ. 2022. № 3. С. 100.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040024>

ИНЖЕКТОР СТАЦИОНАРНОГО ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЛЯ ТАНДЕМНОГО УСКОРИТЕЛЯ¹

© 2025 г. А. А. Гмыря^а, *, Ю. И. Бельченко^а, А. Л. Санин^а,
С. С. Савинов^а, С. Ю. Таскаев^а, И. М. Щудло^а

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

* e-mail: anatoliigmyrya@gmail.com

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Представлены результаты работы нового инжектора стационарного пучка отрицательных ионов водорода, введенного в эксплуатацию в 2022 году на ускорителе-тандале с вакуумной изоляцией в ИЯФ СО РАН. В инжекторе используется поверхностно-плазменный источник с пеннинговским разрядом с массивными термостойкими электродами и внутренней магнитной системой на постоянных магнитах. Системы питания источника обеспечивают обратную связь и автоматизированный контроль работы источника по выбираемому оператором сценарию. Источник позволяет получать стационарные пучки отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и энергией до 32 кэВ. В низкоэнергетичном тракте инжектора установлена дополнительная магнитная линза; для уменьшения обдирки пучка отрицательных ионов усилена откачка низкоэнергетичного тракта.

DOI: 10.31857/S0032816225070174

1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН разработан и активно используется ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) с ускорением первичного пучка отрицательных ионов в тандале с вакуумной изоляцией (ВИТА) [1]. С 2006 по 2021 г. на тандале успешно работал разработанный в ИЯФ экспериментальный стационарный источник отрицательных ионов поверхностно-плазменного типа, который обеспечивал инжекцию в тандал пучка отрицательных ионов током до 10 мА [2]. В 2022 г. схема инжекции отрицательных ионов в тандал была усовершенствована. В новой схеме инжекции был установлен более мощный поверхностно-плазменный источник (ППИ) с пеннинговским разрядом, позволяющий получать стационарные пучки отрицательных ионов водорода с током до 15 мА и энергией до 32 кэВ [3]. Системы питания ионного источ-

ника обеспечивают обратную связь и автоматизированный контроль работы источника. В низкоэнергетичном тракте инжектора установлена дополнительная магнитная линза для улучшения прохождения пучка через тракт. Улучшена откачка низкоэнергетичного тракта дополнительными насосами для уменьшения обдирки пучка отрицательных ионов.

2. КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

Общая схема нового инжектора представлена на рис. 1. Основными компонентами инжектора являются источник отрицательных ионов, пристыкованный с помощью юстировочного узла к камере с дифференциальной откачкой, внутри которой установлена первая линза на постоянных магнитах.

Камера с дифференциальной откачкой и линзой пристыкована к низкоэнергетичному тракту тандала, содержащему внешнюю регули-

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

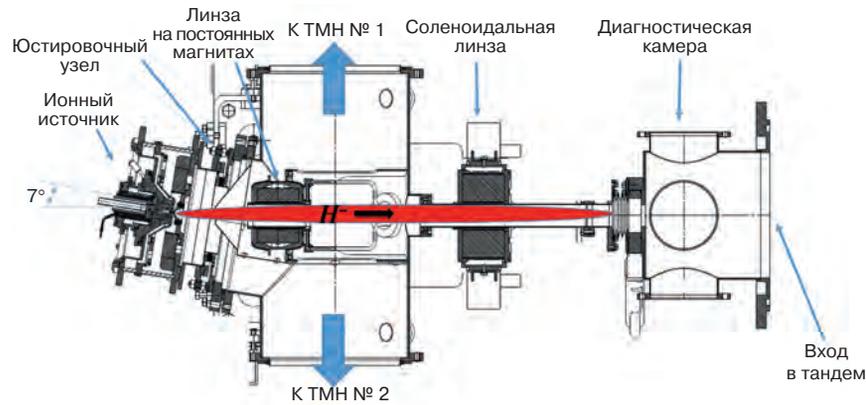


Рис. 1. Схема инжектора на тандеме БНЗТ. Ионный источник, камера с дифференциальной откачкой и линзой на постоянных магнитах, канал транспортировки ЛЕВТ с соленоидальной линзой. На входе в тандем установлена диагностическая камера. Красными линиями показаны траектории ионного пучка с энергией 32 кэВ при транспортировке от источника токов на вход ускорителя (расчеты COMSOL).

руемую соленоидальную линзу, которая дополнительно фокусирует ионный пучок. За соленоидальной линзой установлена пара корректоров для регулирования угла вхождения пучка в тандем (на рис. 1 не показаны). Для дифференциальной откачки выходящего из источника водорода применяется конус из нержавеющей стали с входной апертурой диаметром 40 мм, который разделяет две ступени откачки, на каждую из которых поставлен турбомолекулярный насос со скоростью откачки по водороду 2200 л/с. При стационарном напуске водорода со скоростью примерно $0.1 \text{ л} \cdot \text{Торр}/\text{с}$ насосы поддерживают вакуум около $2.2 \cdot 10^{-5}$ Торр в первой, примыкающей к источнику ступени, и около 10^{-5} Торр в транспортной камере ЛЕВТ. На вход тандема поставлен дополнительный турбомолекулярный насос со скоростью откачки 2000 л/с. В качестве диагностик пучка используются установленные в диагностическую камеру осциллирующий проволочный сканер и измеритель эмиттанса компании DPace. Красными линиями на рис. 1 показаны траектории ионов пучка с энергией 32 кэВ при движении от источника ионов на вход ускорителя (расчеты COMSOL).

3. ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

По сравнению с первоначальным вариантом источника [1], работавшего на тандеме в 2006–2021 гг. в новом инжекторе установлен источник с массивными термостойкими электродами газоразрядной камеры и ионно-оптической системы (ИОС) для вытягивания и формирования пучка. Для формирования магнитного поля применяется расположенная в вакууме внутренняя маг-

нитная система на постоянных магнитах [3]. Для увеличения интенсивности генерации ионов магнитное поле источника в области пеннинговского разряда было усилено, для чего были установлены дополнительные постоянные магниты из NdFeB. В новом инжекторе ось источника ионов расположена почти горизонтально (под углом 7° к горизонтали), тогда как ось цезиевой печи (на рис. 1 не показана) ориентирована почти вертикально. В газовой системе источника используется двухканальная система подачи водорода: для поджигания пеннинговского разряда сделана импульсная повышенная подача водорода, а после поджига стационарный разряд поддерживается при пониженной подаче.

4. ТРАНСПОРТИРОВКА ИОННОГО ПУЧКА НА ВХОД ТАНДЕМА

Для проводки выходящего из источника пучка с энергией 30 кэВ на вход тандема использовалась вакуумная линия, состоящая из камеры с дифференциальной откачкой и пристыкованным к ней низкоэнергетичным трактом, содержащим внешнюю регулируемую соленоидальную линзу и корректоры (рис. 1). Магнитное поле источника и поле первой линзы ЛЕВТ формировалось с помощью постоянных магнитов, а оптимальное прохождение ионного пучка через рассеянное поле источника регулировалось за счет установки на выходе источника стального корректирующего кольца, ослабляющего магнитное поле (см. рис. 2).

Расчеты магнитного поля в источнике и линзе на постоянных магнитах, а также прохождение ионного пучка через низкоэнергетичный тракт

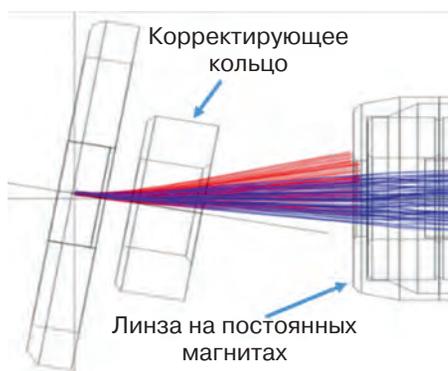


Рис. 2. Влияние корректирующего магнитное поле кольца на поворот пучка с энергией 30 кэВ перед входом в первую линзу. Красные линии – траектории без корректирующего магнитного кольца, синие линии – траектории с кольцом оптимальной толщины (угол поворота пучка 7°).

LEBT проводились с помощью кода COMSOL. Влияние корректирующего кольца на расчетные траектории ионного пучка на участке от источника до входа в линзу на постоянных магнитах показано на рис. 2. В отсутствие корректирующего кольца ионный пучок отклоняется на больший угол и не попадает в апертуру магнитной линзы (красные линии на рис. 2). При установке корректирующего кольца оптимальной толщины (определенной расчетами в COMSOL) периферийное магнитное поле источника убывает быстрее и обеспечивает необходимый угол поворота пучка 7° , а сам ионный пучок полностью пролетает через магнитную линзу (синие линии на рис. 2).

Для фокусировки пучка на вход в низкоэнергетичный тракт LEBT в камере дифференциальной откачки источника была установлена линза, состоящая из двух NdFeB-колец, намагниченных параллельно центральной оси. Магнитное поле колец направлено навстречу друг другу. Магнитный поток колец собирается внешним ярмом, выполненным из магнитомягкой стали. Максимальное продольное магнитное поле на оси линзы равно 0.3 Тл, а минимальный размер пучка с энергией 32 кэВ достигается на расстоянии 700 мм от центра линзы. Внутри колец вставлена охлаждаемая водой трубка с внутренним диаметром 50 мм.

Результаты расчетов транспортировки пучка с энергией 32 кэВ через LEBT с фокусировкой первой линзой (на постоянных магнитах) и соленоидальной линзой LEBT показаны на рис. 3. Как видно на рисунке, ионный пучок хорошо проходит через LEBT и фокусируется на вход в тандем.

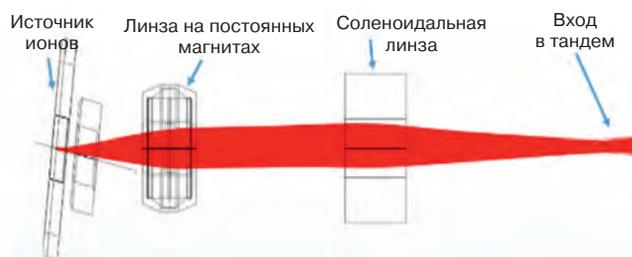


Рис. 3. Расчетные траектории ионного пучка с энергией 32 кэВ при транспортировке от источника на вход тандема.

5. ЭМИТТАНС ПУЧКА

Измерение эмиттанса пучка проводилось с помощью коммерческого измерителя эмиттанса фирмы D-Pace [4]. На рис. 4 представлены фазовый XX' -портрет и X -профиль пучка отрицательных ионов водорода с током 7 мА и энергией 28 кэВ, измеренного на расстоянии 1200 мм от выхода из источника. За счет фокусировки соленоидальной линзой пучок сходится и на фазовой плоскости XX' имеет средний угол наклона $+10.8$ мрад. В обозначенной красным эллипсом области расчетный нормализованный RMS-эмиттанс имеет величину 0.26 мм·мрад. По координате X пучок имеет колоколообразную форму и на полувысоте (FWHM) полную ширину 11 мм.

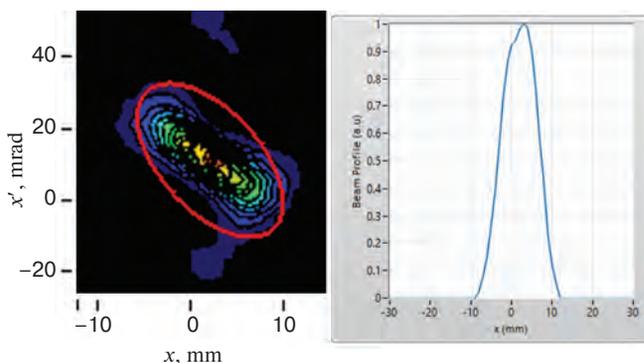


Рис. 4. XX' -портрет на фазовой плоскости и X -профиль ионного пучка.

6. ЗАПУСК И РАБОТА ИНЖЕКТОРА НА ТАНДЕМЕ

Инжектор отрицательных ионов был установлен на тандеме ускорительного источника нейтронов для БНЗТ в ИЯФ СО РАН (рис. 5).

С февраля 2022 г. по июль 2023 г инжектор отработал 176 смен, с интегральной наработкой 844 часов. При запуске инжектора на вход тан-

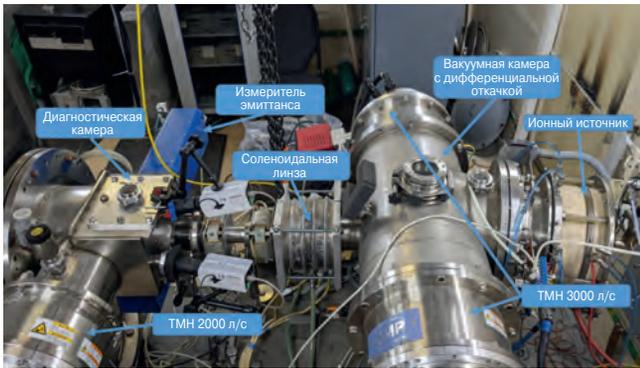


Рис. 5. Инжектор отрицательных ионов на тандеме БНЗТ.

дема был проведен ионный пучок с током 4.5 мА и энергией 28 кэВ, протонный ток на выходе из тандема составлял 2.3 мА, а ток на литиевой мишени – до 1.9 мА. После оптимизации источника с введением дополнительного охлаждения катода и поворота цезиевой печки источника в вертикальное положение ток протонов на выходе из тандема был увеличен до 3.4 мА, на литиевой мишени – до 2.9 мА, что было достаточно для проведения экспериментов на установке БНЗТ в 2023 г.

7. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ

Для проведения экспериментов по генерации нейтронов в реакции ионов дейтерия с литием $D^+ + Li$ рабочий газ источника был заменен на дейтерий, а источник был перенастроен на работу с дейтериевым пучком. Специальная оптимизация ионного источника в работе с дейтерием не проводилась.

Для транспортировки более тяжелых отрицательных ионов дейтерия через рассеянное магнитное поле источника и низкоэнергетичный тракт ЛЕВТ энергия отрицательных ионов дейтерия была понижена до 14 кэВ, для чего было вдвое уменьшено напряжение ускоряющего электрода. Расчетные траектории удовлетворительного прохождения пучка ионов дейтерия

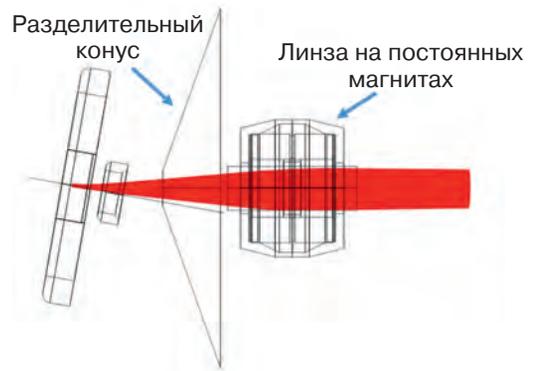


Рис. 6. Расчетные траектории прохождения пучка ионов дейтерия с энергией 14 кэВ через разделительный конус дифференциальной откачки и через линзу на постоянных магнитах.

с пониженной до 14 кэВ энергией через разделительный конус дифференциальной откачки и линзу показаны на рис. 6.

В табл. 1 представлено сравнение режимов ионного источника при работе при водороде и дейтерии в рабочих циклах 2023 г.

Как показано в табл. 1, проведенный на литиевую мишень ток ускоренных протонов на мишени при работе с дейтерием был в 1.3 раза ниже, чем при работе с водородом, что хорошо соответствует наблюдавшемуся ранее изотопическому эффекту по генерации пучка ионов водорода и дейтерия в импульсном пеннинговском ППИ [5]. Максимальный ток отрицательных ионов дейтерия на входе в тандем был равен 3 мА, а ток протонов на литиевой мишени достигал 1.5 мА. В цикле ежедневных экспериментов источник стабильно работал на дейтерии по 6–8 часов в день.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и запущен модернизированный инжектор отрицательных ионов для тандемного ускорителя. Получен и ускорен в тандеме сфокусированный пучок отрицательных ионов водорода и дейтерия; отлажена работа ионного источника по сценариям от ПК. В моде с малой

Таблица 1. Сравнение режимов работы ионного источника

Тип газа	Разряд			Параметры ИОС				На мишени
	U_d , В	I_d , А	Поток газа, отн.ед.	U_1 , кВ	U_2 , кВ	I_1 , мА	I_2 , мА	I_r , мА
Дейтерий	87	6	97	1.3	13	15	3	0.96
Водород	90	6	104	1.3	27	9	5	1.25

подачей цезия получены пучки отрицательных ионов водорода и дейтерия с током 7–8 мА и 3 мА соответственно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A.A., Sanin A., Belchenko Yu. et al.* // AIP Conference Proceedings. 2021. V. 2373. P. 070002. <https://doi.org/10.1063/5.0057441>.
2. *Sanin A., Belchenko Yu., Gusev I. et al.* // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2052. P. 050012. <https://doi.org/10.1063/1.5083766>.
3. *Belchenko Y.I., Gorbovsky A., Ivanov A. et al.* // AIP Conference Proceedings. 2013. V. 1515. № 1. P. 448. <https://doi.org/10.1063/1.4792815>.
4. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Kolesnikov Ia. A. et al.* // Instruments and Experimental Techniques. 2018. T. 61. № 5. С. 713. <https://doi.org/10.1134/S0020441218050159>.
5. *Belchenko Y.I., Kupriyanov A.S.* // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics. 1992. V. 287. № 1. P. 255. <https://doi.org/10.1063/1.44788>.

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.81;53.087

МЕТОД ИМПУЛЬСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
МНОГОПОЛЮСНЫХ ОНДУЛЯТОРОВ¹

© 2025 г. Ф. П. Казанцев^{а, *}, А. В. Брагин^а, А. А. Волков^{а, б}, А. И. Ерохин^а,
А. В. Зорин^а, П. В. Каноник^а, Н. А. Мезенцев^{а, б}, А. Н. Сафронов^а, А. А. Седов^а,
О. А. Тарасенко^а, С. В. Хрущев^{а, б}, В. М. Цуканов^{а, б}, В. А. Шкаруба^{а, б}

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

^б *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, Никольский пр., 1*

* e-mail: f.p.kazantsev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 17.04.2024 г

Рассмотрен метод измерения магнитных полей вигглеров и ондуляторов на основе проволоки с импульсным током в качестве скоростной альтернативы холловским измерениям. Описана экспериментальная установка для измерений на 154-полюсном ондуляторе на постоянных магнитах с периодом 32 мм, получены экспериментальные данные. Применены алгоритмы коррекции исходных данных для устранения влияния дисперсии проволоки и шумов электроники. Обсуждаются полученные результаты и дальнейшая работа.

DOI: 10.31857/S0032816225070189

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вигглеры и ондуляторы широко используются в качестве источников синхротронного излучения. К структуре магнитного поля предъявляются серьезные требования, такие как малые фазовые ошибки (актуально только для ондуляторов) и малые интегралы поля. Поэтому магнитные измерения являются очень важным направлением для работы и исследований. Традиционные измерения с помощью датчика Холла имеют ряд недостатков, таких как низкая скорость измерения и необходимость иметь достаточно большой вертикальный межполюсный зазор ондулятора, чтобы в него мог поместиться датчик Холла с кареткой. Импульсный проволочный метод лишен этих недостатков. В данном методе короткий (1–100 мкм) импульс тока подается на натянутую проволоку, на которой, под дей-

ствием магнитной структуры ондулятора, формируется изгибаемая волна, которая затем распространяется вдоль проволоки. Вне ондулятора установлен датчик, фиксирующий поперечное смещение проволоки. Полученные необработанные данные представляют собой смещение проволоки во времени, пропорциональное первому или второму интегралу поля, в зависимости от длительности импульса [1, 2].

В прошлой серии измерений, проведенной на 128-полюсном сверхпроводящем ондуляторе в поле 1.2 Тл, после окончания полезного сигнала наблюдался некий “хвост”, имевший такой же период, что и у основного сигнала, однако с меньшей амплитудой, порядка 25% от основного сигнала. Было высказано предположение о том, что этот “хвост” является частичным отражением полезного сигнала. Температура внутри измерительной камеры составляет примерно 50 К, однако она напрямую связана с атмосфер-

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

ным воздухом. При такой температуре практически все основные газы, входящие в состав атмосферы, кристаллизуются, и те кристаллы, которые образуются на поверхности проволоки, вызывают частичные отражения сигнала от них. Чтобы проверить эту гипотезу, были проведены испытания на “теплом” ондуляторе с постоянными магнитами.

2. ТЕОРИЯ

Ключевые характеристики магнитного поля вигглера и ондулятора – его первый и второй интегралы, которые определяются следующим образом [1]:

$$I_1^x(y) = \int_0^y B_z(y') dy',$$

$$I_2^x(y) = \int_0^y dy' \int_0^{y'} B_z(y'') dy''.$$

Здесь и далее x и y – горизонтальные поперечная и продольная координаты соответственно, z – вертикальная координата, L – общая длина магнита, B_z – вертикальная составляющая поля.

Чтобы вигглер не влиял на орбиту пучка заряженных частиц, оба его интеграла должны быть равны нулю. Однако в реальных условиях иметь строго нулевое значение интеграла невозможно. При взаимодействии с магнитным полем вигглера заряженный пучок приобретает следующие отклонения координаты x и угла x' :

$$x(y) = \frac{e}{\gamma mc} \int_0^y dy' \int_0^{y'} B(y'') dy'',$$

$$x'(y) = \frac{e}{\gamma mc} \int_0^y B(y') dy'.$$

3. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИМПУЛЬСНОГО ПРОВОЛОЧНОГО МЕТОДА

В сравнении с измерениями датчиком Холла импульсный метод имеет следующие преимущества [3, 4]:

- скорость получения данных. Процесс однократного измерения занимает не более 1 секунды, тогда как датчику Холла требуется около 1 часа для прохождения двухметрового магнитного устройства. Это позволяет построить систему настройки ондулятора, работающую в оперативном режиме;
- возможность проводить измерения при малом вертикальном межполюсном зазоре

ондулятора. Минимально возможная апертура ондулятора определяется суммой толщины проволоки и величины ее провисания и обычно составляет около 1 мм.

Недостатки и ограничения импульсного метода:

- дисперсионные свойства проволоки, обуславливающие зависимость скорости распространения волны от ее частоты. Следовательно, это вызывает искажения сигнала. Однако существуют алгоритмы коррекции;
- внешние вибрации. Экспериментальная установка с импульсной проволокой чрезвычайно чувствительна к различным вибрациям. Необходимо изолировать проволоку от вибраций здания и акустического шума. В плохом случае можно получать данные с отношением сигнал/шум около 1 или даже меньше;
- провисание проволоки [5]. На современном этапе развития импульсного метода эта проблема считается незначительной, поскольку в случае измерения z -компоненты магнитного поля (направленной вдоль силы тяжести), в провисающей проволоке будут возбуждаться дополнительные колебания в zy -плоскости, к которым датчик положения проволоки нечувствителен. Однако влияние этого эффекта требует подробного изучения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Проволока натягивается вдоль апертуры ондулятора (ось y), т.е. так, чтобы повторять траекторию пучка заряженных частиц. Рядом с местами закрепления проволоки установлены демпферы для подавления отражений волн. Кроме того, общая длина проволоки была выбрана таким образом, чтобы избежать наложения отражений на исходный сигнал. Датчик положения проволоки устанавливается как можно ближе к ондулятору. Силу натяже-

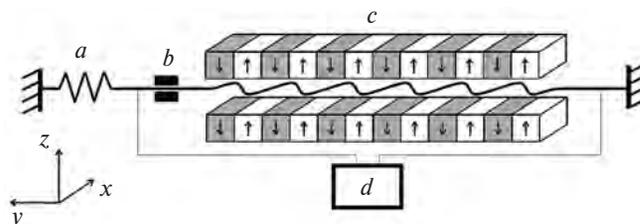


Рис. 1. Схема установки: a – система натяжения проволоки, b – датчик положения проволоки, c – ондулятор, d – генератор коротких импульсов.

ния проволоки можно регулировать с помощью специальной системы.

На рис. 2 представлены теоретические расчеты провисания проволоки, использованной в экспериментах. Согласно этому расчету, провисание проволоки диаметром 200 мкм внутри ондулятора составляет около 1.8 мм. Такое значение нежелательно, однако для текущих сценариев измерений это можно игнорировать. Провисание проволоки можно уменьшить, например увеличив натяжение.

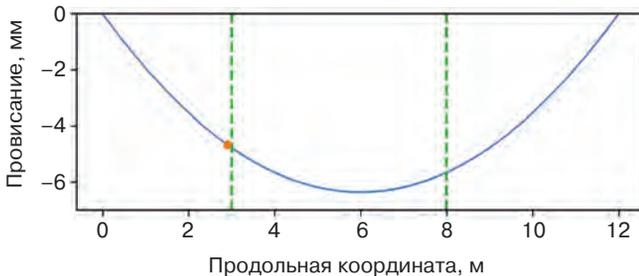


Рис. 2. Математическое моделирование провисания проволоки диаметром 200 мкм. Зеленые пунктирные линии показывают положения фланцев ондулятора, оранжевая точка показывает расположение датчика положения проволоки.

5. МЕТОДИКА

Измерения проводились на ондуляторе на постоянных магнитах с неизвестными нам параметрами. Известна лишь общая длина — 5.0 м. Зазор между верхней и нижней частями магнитной структуры регулируется примерно от 7 до 20 мм и был установлен на уровне 10 мм.

Для измерений использовалась латунная проволока диаметром поперечного сечения 200 мкм и общей длиной 12 метров. Если не указано

иное, ширина и амплитуда импульса составляют 10 мкс и 18 А соответственно.

Исходные данные с датчика положения проволоки пропорциональны первому интегралу магнитного поля. Сигнал подвергался коррекции дисперсии и фильтрации шумов. Алгоритм коррекции был разработан независимо, но в целом он соответствует алгоритму, предложенному в работе [1].

Выходные данные датчика положения проволоки представляют собой изменяющееся во времени напряжение. Значения вертикальной оси не подвергались преобразованию в значения интеграла магнитного поля (Тл·м), поскольку на текущем этапе развития импульсного метода в этом нет необходимости. Можно нормировать данные на результаты измерений датчиком Холла, однако существенной пользы на данном этапе это не принесет.

Исходные значения по горизонтальной оси были преобразованы в значения координаты. Нетрудно провести такое преобразование, зная групповую скорость распространения волны c_0 , которая рассчитывается следующим образом:

$$c_0 = \sqrt{T/\rho},$$

здесь T — сила натяжения проволоки, а ρ — масса проволоки на единицу длины. Значение c_0 проволоки, использованной в экспериментах, составляет 174 ± 2 м/с.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 показан первый интеграл магнитного поля ондулятора. Сигнал не подвергался коррекции. На координате, соответствующей 5–5.4 м, видны некоторые искажения. Это вызвано дисперсионными свойствами про-

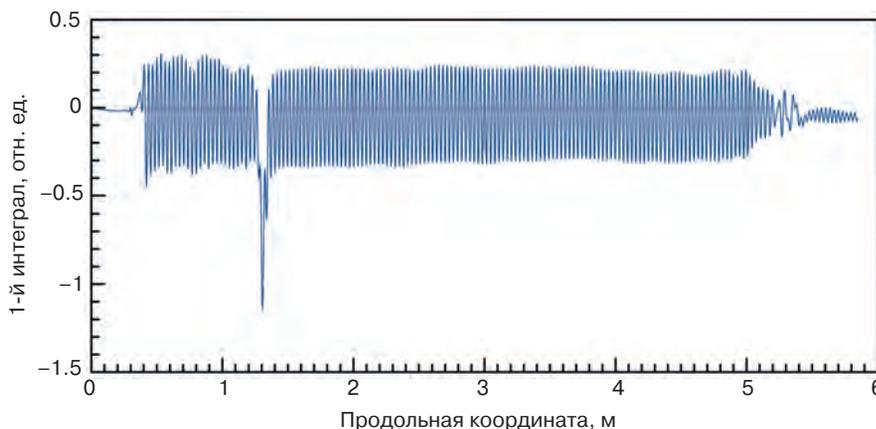


Рис. 3. Картина первого интеграла магнитного поля ондулятора. Исходные данные.

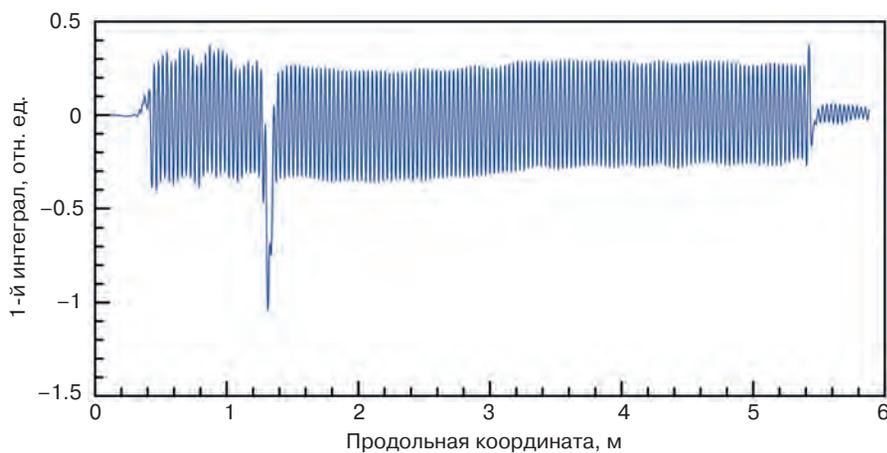


Рис. 4. Картина первого интеграла магнитного поля ондулятора. Сигнал после восстановления.

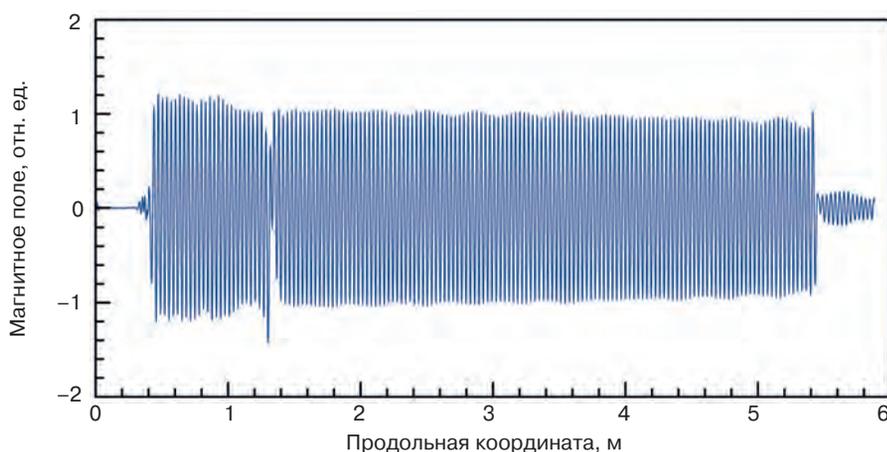


Рис. 5. Картина магнитного поля ондулятора, рассчитанная из первого интеграла.

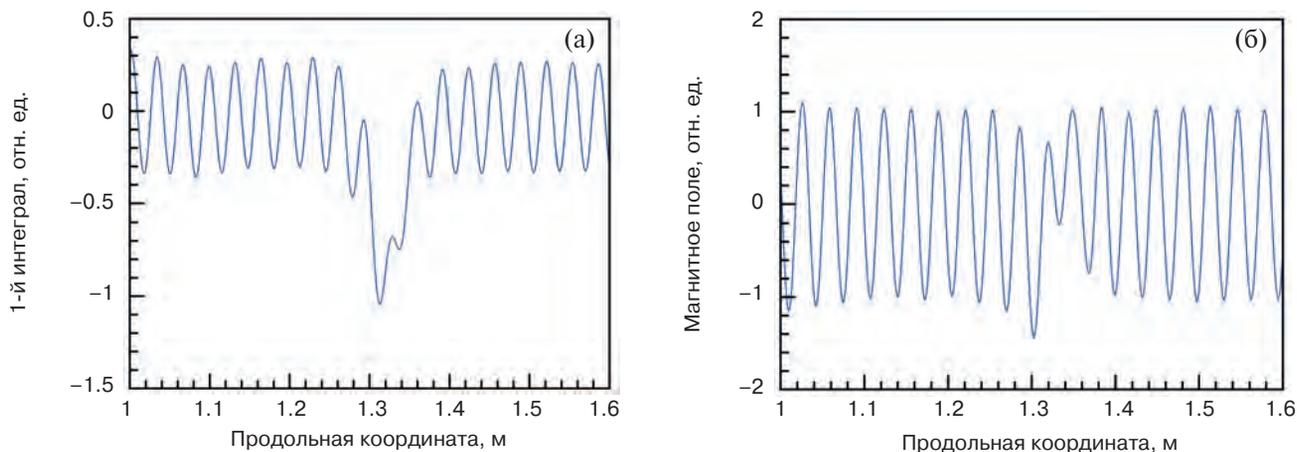


Рис. 6. Дефектная часть ондулятора: а – магнитное поле, б – первый интеграл.

волокни, когда более высокочастотные составляющие волнового пакета распространяются быстрее, чем низкочастотные.

На рис. 4 показан результат математической обработки сигнала. Применен алгоритм коррекции сигнала от влияния дисперсионных свойств проволоки.

Нетрудно получить зависимость магнитного поля от продольной координаты, необходимо проинтегрировать данные с датчика положения проволоки. На рис. 5 продемонстрирован результат такого преобразования.

На координате, соответствующей 1.3 м, виден излом в сигнале. Это дефект магнитной струк-

туры ондулятора. Помимо этого, можно заметить, что неоднородность амплитуд поля, равно как и интеграла, находящихся левее излома, выше, чем у остальной части ондулятора. Это также объясняется тем, что эта часть ондулятора не настроена.

На рис. 6 показан дефектный участок ондулятора более подробно.

7. ВЫВОДЫ

Измерения, проведенные на ондуляторе на постоянных магнитах, показали, что сигнал имеет такие же искажения, как и при измерениях на сверхпроводящем холодном ондуляторе (“фантомный хвост”). Следовательно, характер этого искажения не связан с градиентом модуля упругости (за счет градиента температуры) проволоки или намерзших кристаллов газов атмосферы внутри камеры пучка ондулятора. Требуются дальнейшие работы в этом направлении.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного зада-

ния Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arbelaez D., Wilks T., Madur A., Prestemon S., Marks S., Schlueter R.* A dispersion and pulse width correction algorithm for the pulsed wire method // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 2013. V. 716. P. 62. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.02.042>
2. *Warren R.W.* Limitations on the Use of the Pulsed Wire Field Measuring Technique // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 1988. V. 272. P. 257. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90233-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90233-1)
3. *Varfolomeev A.A., Bouzouloukov Y.P., Ivanchenkov S.N., Khlebnikov A.S., Osmanov N.S., Tolmachev S.V.* Wire method for magnetic field measurements in long undulators // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 1995. V. 359. P. 93. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01359-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01359-4)
4. *Bousine P.V., Tolmachev S.V., Varfolomeev A.A.* Detailed analysis of pulsed-wire technique accuracy // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* 1997. V. 393. P. 414. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00536-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00536-6)
5. *Mezentsev N., Tsukanov V., Zorin A.* Magnetic measurements of superconducting insertion devices by stretched wire with direct current // *Physics Procedia.* 2016. V. 84. P. 67. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.012>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.384.64

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КАНАЛА
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ¹

© 2025 г. И. В. Кильметова^{а,*}, Г. Н. Кропачев^а, Т. В. Кулевой^а, А. И. Семенников^а,
О. С. Сергеева^а, В. С. Скачков^а, Е. Р. Хабибуллина^а, А. С. Борисков^б, А. М. Опекунов^б

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^б Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ)
Россия, 607188, Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37

* e-mail: irina.kilmetova@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ разрабатывается импульсный линейный ускоритель тяжелых ионов с энергией 4 МэВ/нуклон и током до 10 мА. В низкоэнергетическом канале транспортировки (LEVT) ионного пучка сразу после лазерного источника предусматривается рафинирование целевой фракции ионов с отношением $A/Z = 4-8$ из первично сформированного пучка с широким спектром по зарядности и согласование поперечных характеристик пучка при инъекции в ускоряющую секцию RFQ. Представлены результаты моделирования улучшенных конструкций импульсного соленоида и двух постоянноточных отклоняющих электромагнитов с углом поворота 60° . Оптимизация конструкций осуществлена с учетом результатов динамических расчетов, выполненных путем моделирования движения ионов в 3D- распределении магнитного поля на всем протяжении канала LEVT от его входа до выхода, и коррекции режимов электропитания.

DOI: 10.31857/S0032816225070196

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработанные конструкции элементов магнитной оптики каналов ЛУ2 [1]: LEVT [2] и DTL прошли стадию проверки и подтверждения качества пространственного распределения магнитного поля путем непосредственного 3D-моделирования динамики пучка на всем протяжении ускорителя от лазерного источника ионов до обдирочной мишени. На основе результатов динамических расчетов решено принять полученные конструкции магнитных элементов ЛУ2 в качестве основы для технического проектирования на предприятии-изготовителе.

2. ОТКЛОНЯЮЩИЕ МАГНИТЫ

Отклоняющий магнит ВМ LEVT, расчетная модель которого показана на рис. 1а, является составным элементом начальной части LEVT,

осуществляющей сепарацию ионов штатной зарядности ионного пучка. Для обеспечения независимости монтажа магнита и установки ионпровода конструкция отклоняющего магнита предусматривает его многократную разборку на две составные части.

В табл. 1 представлены характеристики отклоняющего магнита LEVT. Размер области, где выполняется допуск на неоднородность магнитного поля (Good Field Region, GFR), обеспечивает прохождение пучка размером до $\pm 40/\pm 30$ мм. В строке “Габариты $W \times H \times L$ ” дана длина L отрезка средней линии магнита (окружность радиуса, равного требуемому радиусу поворота пучка) в плоскости поворота пучка в пределах между входным и выходным торцами, а также ширина W и высота H магнита. Количество поворотных магнитов этого типа на канале LEVT – два.

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

Таблица 1. Расчетные параметры VM LEVT

Параметр	Значение
Количество частей разъемной конструкции	2
Угол поворота пучка	60°
Радиус поворота пучка, мм	400
Межполюсный зазор, мм	108
Ширина полюса, мм	300
Схема обмотки катушки: слоев × витков в слое	3 × 20 = 60
Число витков в обмотке	120
Сечение провода (шинка с каналом охл.), мм ³	12 × 12 × Ø6
Интегральный ток, кА/катушку	10.5
Номинальный ток возбуждения, А	175
Материал магнитопровода	Сталь 3408
Поле: в центре зазора, в сердечнике, в ярме, Тл	0.25, 0.6, 1.6
Интеграл магнитного поля вдоль продольной оси, Тл·м	0.13
Допустимая неоднородность поля (в GFR), $\Delta B/B$, %	0.3
Электрическое сопротивление обмотки, мОм	32
Напряжение на обмотке при номинальном токе, В	5.6
Мощность рассеяния, Вт	980
Охлаждение линзы	Водяное
Габариты: ширина × высота × длина, мм ³	560 × 770 × 480

Продольное распределение поля и интеграл от него, показанные на рис. 1б, рассчитаны вдоль средней линии магнита.

Объединяющий магнит CBM LEVT, расчетная модель которого показана на рис. 2, выводит пучок на оптическую ось ускорительной секции RFQ. Он вслед за VM LEVT осуществляет более глубокую сепарацию ионов штатной зарядности ионного пучка.

Положение области, отведенной для прохождения ионного пучка, выделено синим цветом;

оранжевая линия на этой области – средняя линия пучка. Оранжевый шестиугольник – профиль полюса магнита, выведенный в медианную плоскость.

На рис. 3 показана ориентация плоскостей торцов относительно линии падения/вылета пучка на плоскость входного/выходного торцов магнита, причем:

- на входном торце пучок (красная стрелочка в нижнем правом углу рисунка), двигаясь вдоль средней линии, подходит к входному торцу так,

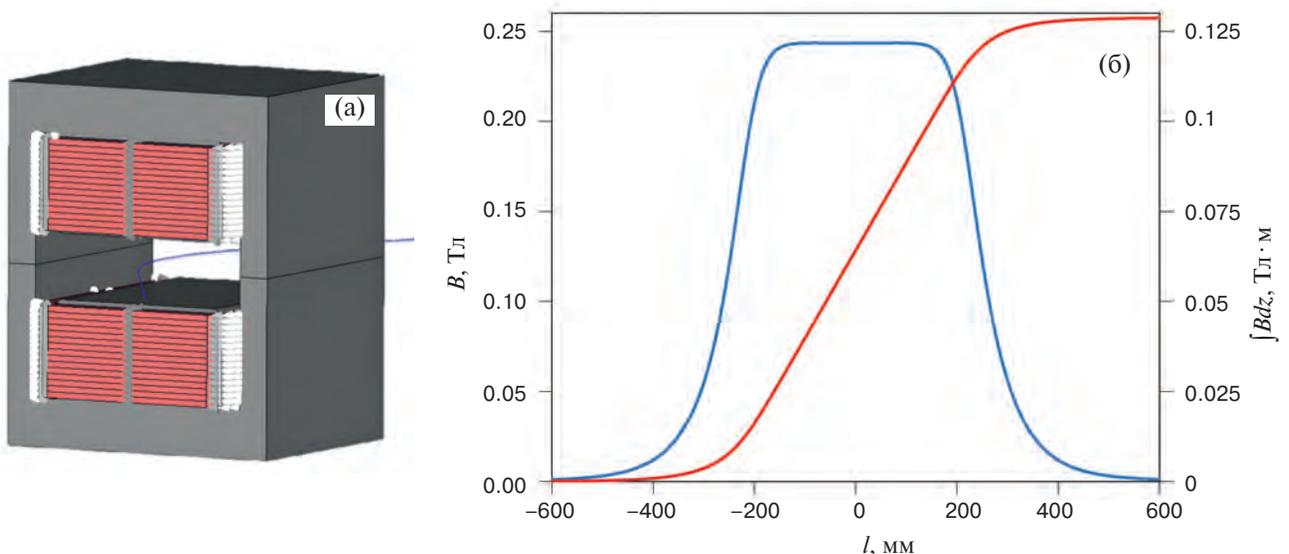


Рис. 1. Отклоняющий магнит VM LEVT: а – расчетная модель в сборе, б – продольное распределение поля и интеграла поля вдоль средней линии магнита.

что линия его движения и нормаль к плоскости входного торца образуют угол 30° , называемый углом скоса торца;

- на выходном торце магнита пучок (красная стрелочка вблизи системы координат), уже повернутый на заданный угол поворота 60° , направлен под прямым углом к плоскости выходного торца. Здесь угол скоса торца равен нулю.

В табл. 2 представлены характеристики объединяющего магнита СВМ LEVT. Размер области, где выполняется допуск на неоднородность магнитного поля, обеспечивает прохождение пучка размером до $\pm 40/\pm 30$ мм, а также дополнительную свободу подстройки поперечного положения магнита в пределах до ± 2 мм. Интеграл магнитного поля вычислен вдоль средней линии магнита, показанной на рис. 2 и 3.

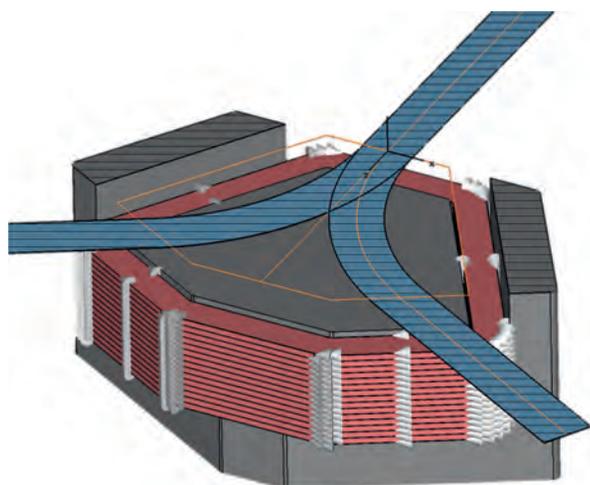


Рис. 2. Вид объединяющего магнита LEVT ЛУ2 (верхняя половина магнита снята).

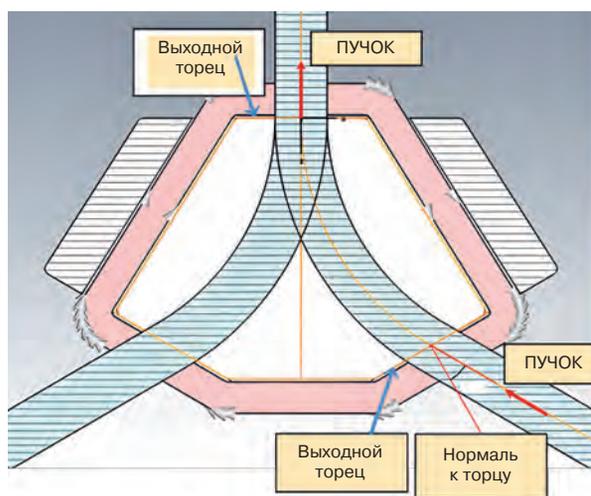


Рис. 3. Определение угла скоса торцов объединяющего магнита LEVT ЛУ2.

Таблица 2. Расчетные параметры СВМ LEVT

Параметр	Значение
Количество частей разъемной конструкции	2
Количество поворотных магнитов	1
Радиус поворота пучка, мм	400
Угол поворота пучка	60°
Угол наклона средней линии к нормали торцов в точках влета/вылета иона	$30^\circ/0$
Межполюсный зазор, мм	108
Ширина полюса на выходном торце, мм	200
Схема обмотки катушки: слоев \times витков в слое	$3 \times 15 = 45$
Число витков в обмотке	90
Сечение провода (с каналом охл.), мм ³	$12 \times 12 \times \varnothing 6$
Интегральный ток, кА/катушку	11
Номинальный ток возбуждения, А	245
Материал магнитопровода	Сталь 3408
Поле в центре зазора, Тл	0.25
Интеграл магнитного поля вдоль средней линии, Тл \cdot м	0.129
Good Field Region (GFR), ширина/высота, мм	$\pm 100/\pm 50$
Допустимая неоднородность поля (в GFR), $\Delta B/B$, %	0.3
Электрическое сопротивление обмотки, мОм	25
Напряжение на обмотке при номинальном токе, В	6
Мощность рассеяния, кВт	1.5
Охлаждение магнита	Водяное
Габариты: ширина \times высота \times длина, мм ³	$784 \times 708 \times 480$

Распределение поля и интеграла поля в собирающем магните СВМ LEVT вдоль средней линии магнита аналогично соответствующим распределениям в магните VM LEVT (рис. 1б).

В табл. 3 представлены результаты теплового расчета для условий питания, указанных в табл. 2.

Таблица 3. Режим охлаждения СВМ LEVT

Параметр	Значение
Схема соединения катушек по воде	параллельное
Длина канала охлаждения в катушке, м	73.3
Перепад давления, атм (кПа)	4.6 (466)
Скорость протока воды в канале, м/с	1.6
Расход воды на обмотку, л/мин	5
Перепад температуры хладагента, К	4

3. СОЛЕНОИД LEVT

Соленоиды LEVT являются элементами сепарирующей и согласующей частей этого канала. На рис. 4 показаны распределения поля и его продольного интеграла, использовавшиеся при расчетах динамики протонного пучка как на выходе ионного источника, так и на участке ввода пучка в секцию RFQ. В табл. 4 показаны результаты электромагнитных расчетов соленоида и соответствующих параметров разрядного контура для импульсного питания соленоида. Параметрами вариации при расчетах были схема намотки, размеры шинки и емкость нако-

Таблица 4. Параметры соленоида LEVT

Параметр	Значение
Число штатных соленоидов в LEVT	3
Режим питания	Импульсный
Магнитная апертура, мм	150
Длина, мм	400
Поперечные размеры обмотки, мм ²	150 × 247
Ярмо, мм ³	248 × 288 × 400
Поле в центре рабочей области, Тл	1.03
Интеграл поля в продольном направлении, Тл · м	0.41
Схема намотки: слоев × витков в слое = всего	4 × 40 = 160
Шинка медная (с каналом охлаждения), мм ³	10 × 10 × Ø6 = 70
Условие охлаждения	Водяное
Электрические параметры, R · L · C, мОм · мГн · мкФ	23 · 1.7 · 250
Импульсное питание соленоида: $I_{\text{ном}} \cdot U_c \cdot \langle P \rangle$, А · кВ · Вт	2070 · 5.4 · 100
$T_{\text{имп}}$ (полусинусоида), мс	2
Частота повторения, Гц	1

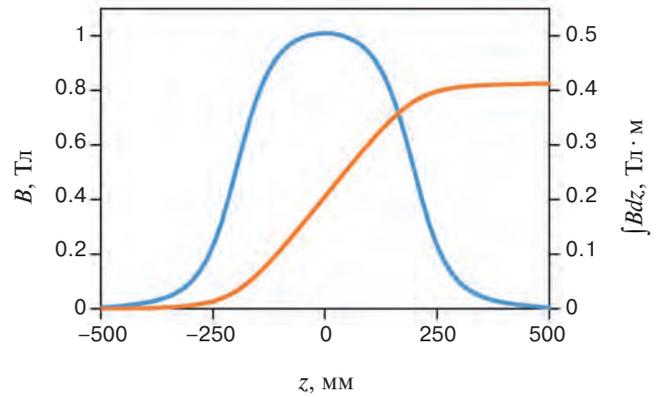


Рис. 4. Продольное распределение поля и его интеграла вдоль оптической оси соленоида LEVT.

пителя разрядного контура. Задачей расчетов было получение удобного для практики режима импульсного питания при заданных значениях: 1) величины поля в максимуме импульса тока питания — 1 Тл, 2) ампервитков — 330 кА·вит, 3) средней мощности рассеяния — около 100 Вт при частоте повторения импульсов — 1 Гц.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные элементы LEVT рассчитаны в режиме исследования зависимости основных характеристик ионного пучка от выбора типов элементов магнитной оптики, а также от схемы их расстановки в канале и настройки их режимов функционирования. Для повышения эффективности транспортировки и обеспече-

ния требуемых выходных кинематических параметров ионного пучка предпринята стратегия интенсивного отделения целевой фракции от многокомпонентного по зарядности первичного сгустка и постадийной оптимизации настройки режимов. В результате получен весьма компактный и плотно упакованный канал, обеспечивающий требуемую инжекцию в RFQ глубоко рафинированного пучка штатной фракции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кулевой Т.В., Завьялов Н.В., Кропачев Г.Н. и др.* Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) // ПТЭ. 2025. № 8 (S).
2. *Хабидулина Е.Р., Кропачев Г.Н., Кулевой Т.В. и др.* Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов // ПТЭ. 2025. № 8 (S).

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 52.624

ДИПОЛИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ДЛЯ ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹

© 2025 г. И. В. Кильметова^а,*, Т. В. Кулевой^а, О. С. Сергеева^а, В. С. Скачков^а

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: irina.kilmetova@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

Обсуждаются возможные конструкции ондуляторной структуры на постоянных магнитах с переменным полем. В качестве материала был выбран редкоземельный (Rare Earth Permanent Magnet – REPM) сплав Nd-Fe-B, который имеет значительно более высокую остаточную намагниченность по сравнению со сплавом Sm-Co и способен обеспечить повышенную коэрцитивную силу. Среди наиболее эффективных конструкций, помимо гибридного дипольного магнита, на практике предпочтительно использовать неявный мультиполь как секторного, так и стержневого типа, а также изготовленный по технологии QSM. В работе представлены спектры распределения продольного поля в регулярной части различных ондуляторных структур.

DOI: 10.31857/S0032816225070207

1. ВВЕДЕНИЕ

В НИЦ “Курчатовский институт” планируется создать источник синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения с лазером на свободных электронах (СИЛА) [1]. Установка СИЛА представляет собой многопользовательскую междисциплинарную установку класса мегасайенс для исследований в ряде областей физики, химии, кристаллографии, материаловедения, биологии и медицины. Разрабатываемая ускорительная установка по своим характеристикам превосходит существующие в настоящее время накопители электронов: она предполагает чрезвычайно низкий горизонтальный эмиттанс (порядка 75 пм · рад) пучка с энергией 6 ГэВ. При длине сгустка 3.4 мм это обеспечит минимальный размер источника СИ с высокой степенью когерентности и яркости, а расходимость составит всего около 1 мкрад.

В экспериментальном зале источника СИЛА предполагается разместить исследовательские станции и лаборатории. Основным типом

источников, планируемых для экспериментальных станций, являются ондуляторы *in-air* на редкоземельных постоянных магнитах (REPM) с периодом структуры $\lambda_u = 27\text{--}45$ мм. Для некоторых станций потребуются ондуляторы *in-vacuum* с короткими периодами около 14–18 мм, а также вигглеры с высоким полем и короткие поворотные магниты. В табл. 1 приведены параметры основного типа ондуляторов на постоянных магнитах.

Таблица 1. СИЛА: параметры ондулятора U-27 [1]

REPM	Nd-Fe-B
Межполюсный зазор D_{ap} , мм	12
Количество периодов N_{per}	59
Период λ_u , мм	27
Поле в максимуме B_{max} , Тл	0.556
Энергия СИ, кэВ	6.386
Длина структуры L_u , мм	1593

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

2. АНАЛИЗ REPM-СИСТЕМ

Постоянный магнит из сплава Nd-Fe-B, который имеет значительно большую остаточную намагниченность $\mu_0 I$ по сравнению со сплавом Sm-Co, способен обеспечить также и повышенную коэрцитивную силу, что и определило наш выбор его в качестве материала для магнитных элементов ондулятора.

Среди наиболее эффективных конструкций, помимо гибридной системы, включающей в себя полюса из магнитомягких материалов, предпочтительно использовать неявнополюсную систему секторного или стержневого типа Split-pole семейства [2–5]. Разновидностью конструкций этого типа является система с бесконечным числом полюсов, вытянутая вдоль двух прямолинейных последовательностей магнитов [6]. Рассматриваемые здесь диполи выполнены по QSM-технологии [7].

В качестве объекта сравнения выбрана общеизвестная структура, внешний вид которой схематично представлен на рис. 1, где показаны пять периодов, построенных чередованием пар магнитов, образующих простейший диполь. (Стрелки обозначают правило изменения намагниченности в цепочках элементов магнитной структуры.) В такой системе возможно применение железного ярма снаружи, хотя в рамках системы Split-pole с ростом числа магнитов на период его эффективность быстро падает.

Ширину магнитных элементов в этой структуре в целях наращивания поля обычно выбирают в несколько раз больше, чем межполюсный зазор. Такой подход приводит к возрастанию поперечного размера ондулятора, а эффективность использования постоянных магнитов на их краях, удаленных от рабочей области, оказывается низкой. Высокая дискретность таких систем в продольном распределении намагниченности является причиной появления в фурье-разложении поля гармоник более высокого порядка. Поэтому более высокая эффективность REPM-структуры в виде цепочки одинаковых магнитов с периодически чередующейся намагниченностью в продольном направлении проявляется в отсутствие требования моногармоничности спектра. В этом случае присутствие обертонов поля либо некритично, либо является неотъемлемым целевым параметром ондулятора.

При дискретности структуры, равной двум REPM-магнитам на период, и небольшом зазоре

D_{IM} между магнитами, фурье-разложение поля содержит, помимо доминирующей гармоники $n = 1$, еще и гармонику более высокого порядка частоты $n = 3$. Ее величина составляет порядка 1–2% от амплитуды основной, а пятая гармоника практически пренебрежимо мала.

Периодические структуры на упомянутых сосредоточенных диполях, включая систему QSM, весьма компактны. У них, в отличие от, например простейшей (рис. 1), источники магнитного поля окружают рабочую область вплоть до медианной плоскости. Однако они суще-

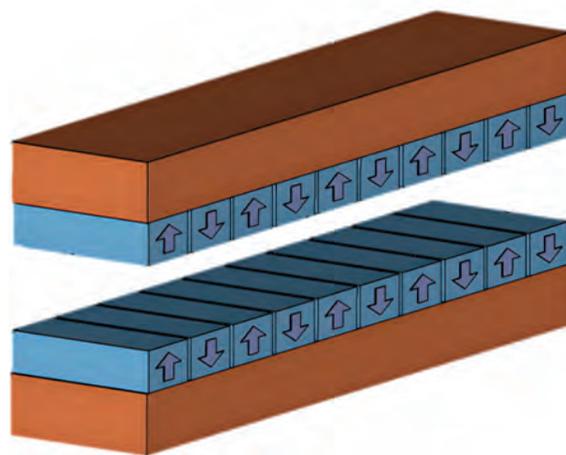


Рис. 1. Схема ондуляторной структуры на простейших диполях.

ственно усложняются для практики, когда необходимо обеспечить более плавное распределение намагниченности в продольном направлении из-за большого числа изменений геометрии магнитных элементов и в целом дипольной сборки. Исключением является стержневая система, которая благодаря унификации ее магнитных элементов еще сохраняет способность достаточно эффективно аппроксимировать плавное продольное распределение “силы” диполя.

3. СЕМЕЙСТВО КОНСТРУКЦИЙ QSM

Рассмотренные ниже REPM-диполи и примеры коротких секций периодической структуры на таких диполях рассчитаны и проанализированы в предположении, что концевые магниты ондулятора удалены и не дают своего вклада в поле, а период структуры принят в соответствии со спецификацией ондулятора U-27 установки СИЛА (табл. 1). Параметры расчетных моделей даны в табл. 2.

Таблица 2. Общие параметры REPM-диполей

Параметр	Значение
$\mu_0 I$, Тл	1.3
D_{ap} , мм	14
D_{IM} , мм	1
$L = \lambda_u/2 - D_{IM}$, мм	12.5

Обобщенное уравнение профиля ярма QSM $r_p(\varphi)$ произвольной мультипольности $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ и магнитного поля B , возбуждаемого диполем в случае $k = 1$, в цилиндрических координатах имеют вид:

$$\frac{1}{k} \frac{b_0}{\mu_0 I} r_p^k \sin k\varphi = r_p \cos(\varphi - \psi) + C,$$

$$B = \mu_0 I \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где b_0 – масштабный коэффициент, C – константа интегрирования, α и ψ – углы, которые профиль и намагниченность составляют с осью x соответственно.

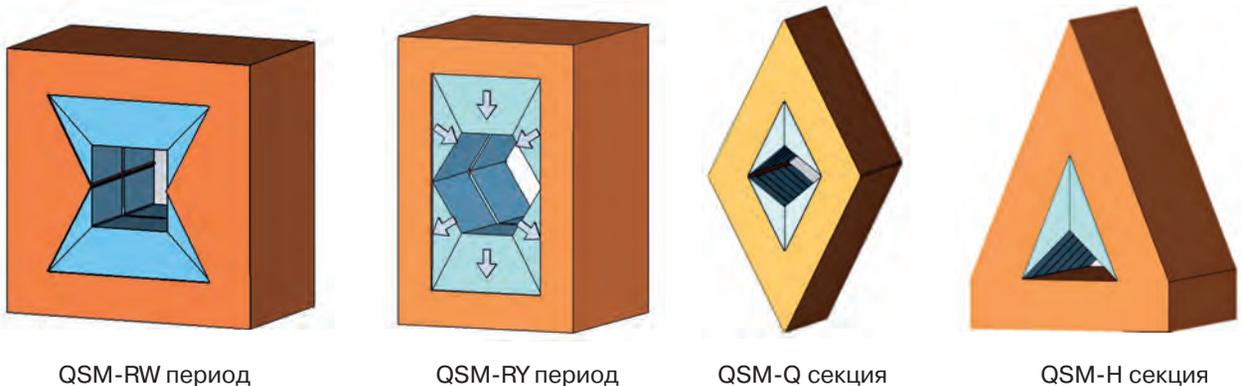
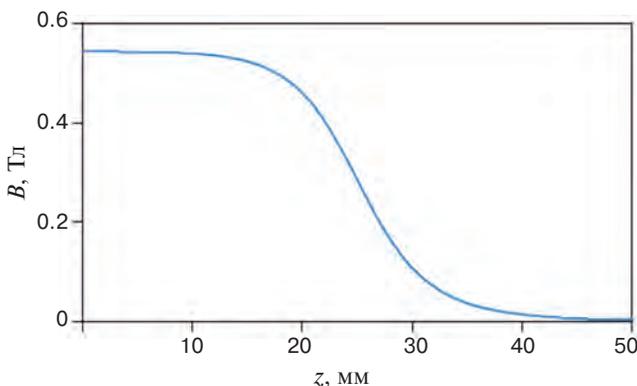
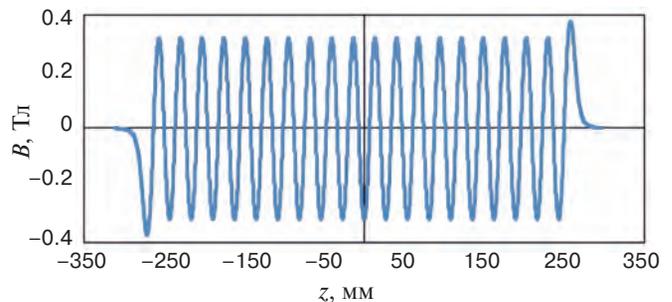
На рис. 2 показаны лишь некоторые исполнения периодических структур на магнитных

системах QSM. Все диполи этого семейства в случае бесконечной длины возбуждают идеальное однородное поле (1) во всем пространстве внутри ярма, окружающего снаружи постоянные магниты [7]. Так в центре одиночного диполя QSM-Q конечной длины при апертуре $D_{ap} = 14$ мм может быть достигнуто поле, близкое к однородному, величиной $B_{max} = 0.55$ Тл, а при длине магнита 50 мм оно распределено в продольном направлении, как показано на рис. 3.

Существенное отличие этих систем от наиболее распространенных, простейших, показанных на рис. 1, в том, что магнитный материал окружает рабочую область со всех сторон и только отношение D_{ap}/λ_u является фактором, ответственным за снижение поля в экстремумах.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯ ОТ ДЛИНЫ ПЕРИОДА И ШИРИНЫ СТРУКТУРЫ

Так в периодической структуре $N_{per} = 20$, $L_u = 540$ мм с теми же диполями QSM-Q распределение поля имеет вид, показанный на рис. 4; $B_{max} = 0.32$ Тл.

**Рис. 2.** Разновидности периодических структур на магнитах QSM-системы.**Рис. 3.** Типичное распределение поля в одиночном QSM-диполе конечной длины.**Рис. 4.** Типичное распределение поля в ондуляторной секции QSM-Q-диполей.

Если фиксировать ширину рабочей области в медианной плоскости, то экстремальное поле на оси ондулятора с QSM-диполями падает с уменьшением периода, особенно когда $\lambda_u/2 \sim D_{ap}$. На рис. 5 эта зависимость показана в диапазоне изменения периода $\lambda_u = 20\text{--}60$ мм.

Напротив, если при фиксированном D_{ap}/λ_u уменьшать ширину w рабочей области в медианной плоскости, то экстремальное поле на оси ондулятора с QSM-диполями возрастает, особенно когда $\lambda_u/2 \sim w$. На рис. 6 эта зависимость показана в диапазоне изменения ширины $w = 10\text{--}30$ мм.

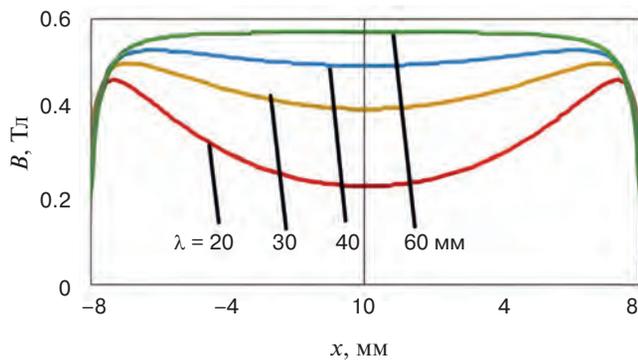


Рис. 5. Падение максимума осевого поля ондулятора при уменьшении периода.

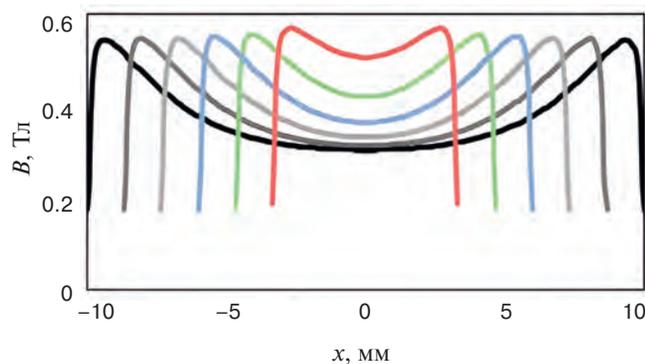


Рис. 6. Возрастание осевого поля в экстремуме по мере сужения ширины рабочей области w .

Экстремум поля, возникающий вблизи $x = 0$, имеет форму седла, причем полный перепад величины поля в рассмотренном диапазоне составляет не менее чем полтора раза. Этот механизм позволяет противостоять снижению поля в окрестности седла при уменьшении периода, причем непостоянство поля здесь составляет менее 0.02% в пределах площади шириной $\Delta x = \pm 100$ мкм (примерно 5-кратный диаметр пучка e^-).

5. ГАРМОНИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Гармонические спектры идеализированных моделей простых и ондуляторных QSM-структур схожи и содержат короткий список гармоник высших порядков: кроме доминирующей первой, а также третьего обертона на уровне 1–2% от первой, присутствуют лишь следы других гармоник высшего порядка.

Отклонение поля периодической структуры на QSM-диполях от точного синусоидального поведения амплитуды B_{max} индицирует появление около 1–2% несовершенства, являющегося вкладом гармоник более высокого порядка (рис. 7).

Сравнение спектра амплитуд поля на оси структуры с QSM-диполями, изображенного левыми столбиками на рис. 8, со спектром поля простейшей структуры, показанной на рис. 8 (правые столбики) показывает их полную идентичность.

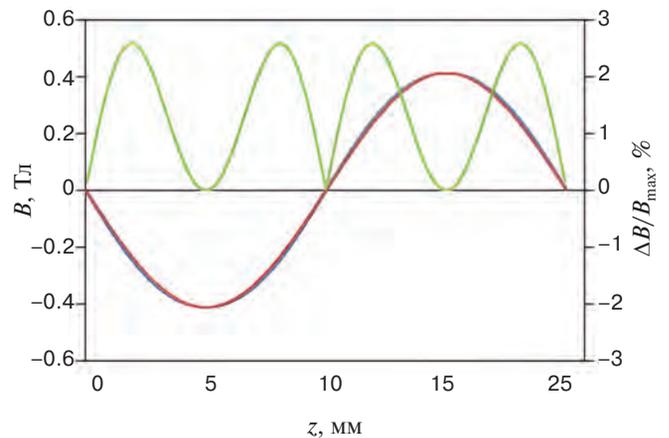


Рис. 7. Типичное распределение поля на периоде QSM-ондулятора и отклонение от строго синусоидального правила.

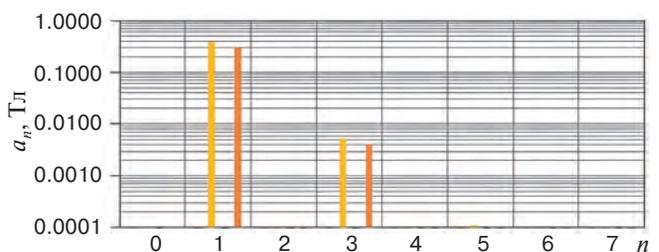


Рис. 8. Спектры структур на QSM-RWR-диполях и на простейших диполях.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Периодическая структура ондулятора с QSM-диполями обладает компактностью. Благодаря гибкости конструкции QSM-диполя возможно оптимизировать структуру ондулятора по величине поля в окрестности седла, либо укоротить период структуры λ_u . При длине периода $\lambda_u = 27$ мм можно обеспечить поле до $B_{\max} = 0.5$ Тл и более. Вариация поля в окрестности седла периодической QSM-структуры составляет менее 0.01% от B_{\max} благодаря малому сечению электронного пучка. Содержание гармоник высшего порядка неоптимизированных QSM-структур – такого же порядка, что и у простых структур с дискретностью, равной 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kovalchuk M.V., Blagov A.E., Marchenkov N.V., Senin R.A., Targonski A.V.* // J. Cryst. 2022. V. 67. P. 726.
<https://doi.org/10.31857/S0023476122050071>
2. *Герберг А.Н., Мухо С.Б., Рабинович Я.Д., Скачков В.С.* // ПТЭ. 1980. № 1. С. 49.
3. *Скачков В.С.* // ПТЭ. 1980. № 3. С. 34.
4. *Скачков В.С.* // ПТЭ. 1980. № 3. С. 37.
5. *К. Halbach.* // NIM. 1980. V. 169. P. 1.
6. *Halbach K., Chin J., Hoyer E., Winick H., Cronin R., Yang J., Zambre Y.A.* Permanent Magnet Undulator For SPEAR, PAC-1981.
7. *Skachkov V.S.* // NIM A. 2003. V. 500. № 1-3. P. 43.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01991-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01991-5)

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.5

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ
ФИНАЛЬНОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ¹

© 2025 г. С. С. Козуб^а, *, А. И. Агеев^а, Р. В. Антонец^а, А. П. Орлов^а,
М. Н. Столяров^а, А. С. Власов^а

^а Институт физики высоких энергий им. А.А. Логонова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино, Московская обл., ул. Победы, 1

* e-mail: sergey.kozub@ihep.ru

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 23.03.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

НИЦ “Курчатовский институт”—ИФВЭ разработал сверхпроводящие квадрупольные магниты для системы финальной фокусировки пучков тяжелых ионов коллаборации HED@FAIR международного ускорительного комплекса ионов и антипротонов FAIR в Дармштадте, Германия. Для исследования этих магнитов в различных режимах работы создан стенд, оснащенный системой контроля и управления. Система обеспечивает контроль и управление температурой, давлением в емкостях и трубопроводах, величиной изоляционного вакуума, уровнем и расходом жидкого гелия и азота — всего 46 каналов. Все параметры стенда записываются в архив испытаний и хранятся в формате .xls таблиц и .tdms файлов на пульте оператора.

DOI: 10.31857/S0032816225070217

1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта HED@FAIR НИЦ “Курчатовский институт”—ИФВЭ создает четыре квадрупольных магнита с уникальным сочетанием внутреннего диаметра сверхпроводящей обмотки 260 мм и градиента магнитного поля 37.5 Тл/м (рис. 1). Номинальный ток магнита равен 5.73 А, максимальное поле в сверхпроводящей обмотке 5.87 Тл, запасенная энергия 1.08 МДж [1–4]. Двухслойная сверхпроводящая обмотка сжата воротниками из нержавеющей стали, вокруг которых расположен магнитопровод. Длина и наружный диаметр вакуумного сосуда составляют 2.4 м и 1.4 м соответственно. Холодная масса магнита весом 6.5 т охлаждается потоком гелия, имеющим температуру 4.5 К. Общий вес квадруполя равен 10 т. Гелиевый сосуд с холодной массой при помощи системы подвесок крепится к вакуумному сосуду, между стенками вакуумного сосуда и стенками гелие-

вого сосуда находится тепловой экран, охлаждаемый потоком гелия с температурой 50 К.

2. ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Схема стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольных магнитов представлена на рис. 2. Основу стенда составляют холодильная гелиевая установка (ХГУ) производительностью 150 л/ч, сателлитный рефрижератор производительностью до 400 Вт при температуре охлаждающего гелия от 4.5 до 280 К и его расходе до 40 г/с [5]. Рабочее давление гелия в ожижителе и рефрижераторе 20–23 бар.

Основными измеряемыми параметрами стенда являются:

– температуры в переохладителе ($T_{21}-T_{24}$), распределительном боксе ($T_{31}-T_{33}$) и на внешних стенках гелиевых и азотных трубопроводов (T_{14}, T_{15}, T_{34}), всего 10 термометров;

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

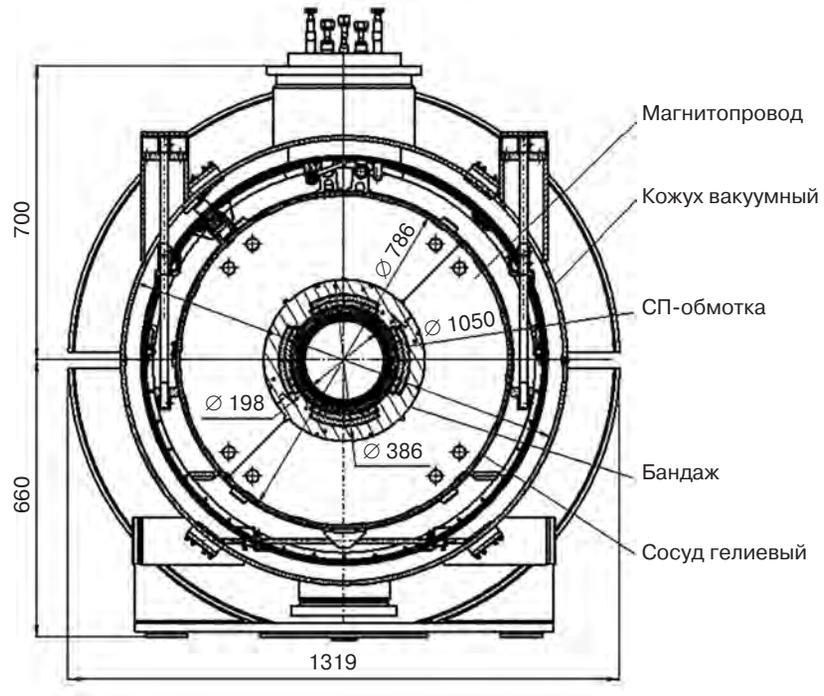


Рис. 1. Поперечное сечение квадруполя системы финальной фокусировки пучка ионов.

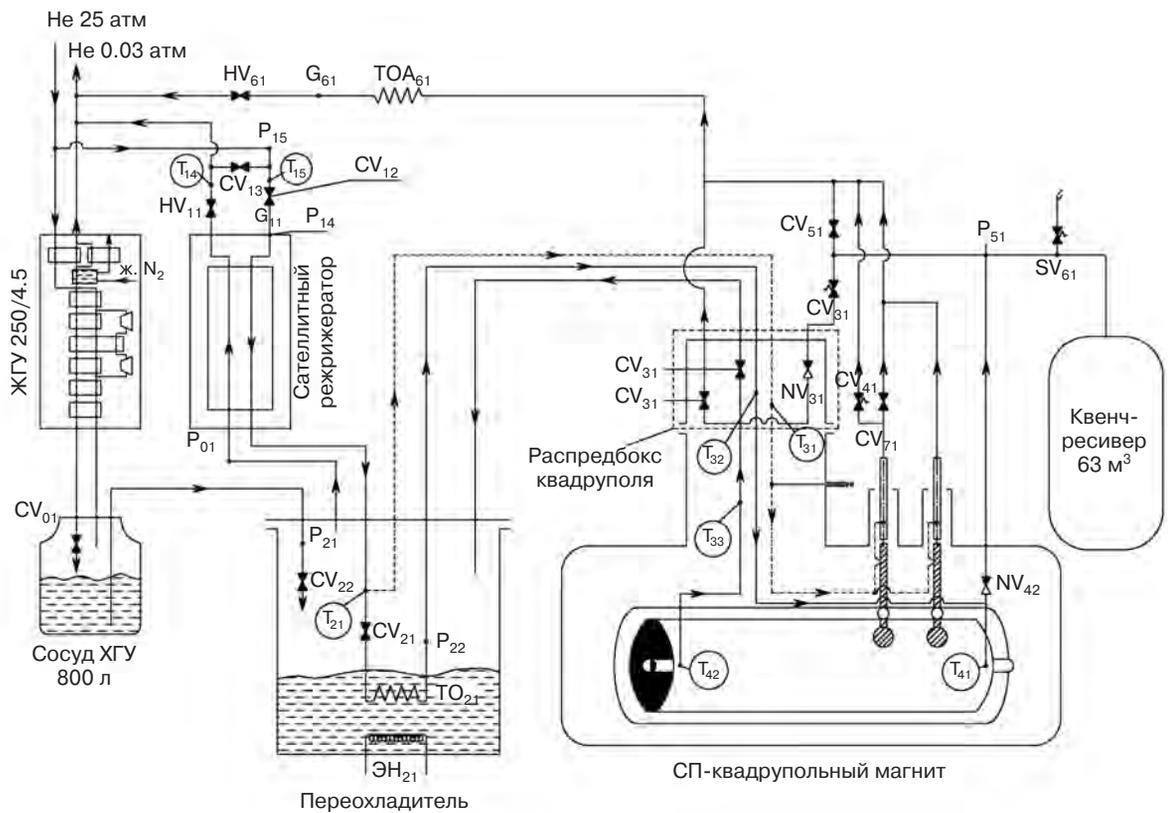


Рис. 2. Схема стенда для исследований сверхпроводящих квадруполей: *CV* – дистанционно управляемые вентили, *T* – термометры сопротивления, *P* – датчики давления, *G* – расходомеры, *SV* – предохранительные клапаны, *HV* – вентили с ручным управлением, *NV* – обратные клапаны, *TO* – теплообменники.

- уровень жидкого гелия и уровень жидкого азота в переохладителе, всего два;
- уровень газгольдера;
- давление на различных участках трубопровода и емкостях стенда ($P_1, P_{14}, P_{15}, P_{21}, P_{22}, P_{51}$), всего 6;
- вакуум в емкостях и секциях трубопроводов, всего 16;
- расход гелия G_{11}, G_{61} и азота G_{31} , всего 3.

Общее количество измерительных каналов 37. В качестве устройств управления выступают дистанционно управляемые вентили с электропозиционерами $CV_{12}, CV_{13}, CV_{21}, CV_{22}, CV_{32}, CV_{33}, CV_{51}$ и электроклапаны: CV_{01} и CV_{71} . Количество каналов управления 9.

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ

Устройства, входящие в измерительную часть системы, должны выполнять преобразования амплитуд аналоговых сигналов всех приведенных в описании технологических параметров исследуемых магнитов в числовые выражения двоичного кода. Для постоянных и медленно меняющихся во времени параметров выполняются одноразовые преобразования непосредственно по требованию ЭВМ. При измерениях остальных параметров, которые отражают динамические процессы в магните и где требуется построение временных диаграмм, преобразование амплитуды каждого аналогового сигнала должно выполняться периодически через определенные промежутки времени, с начала и до завершения контролируемого процесса. В связи с относительно небольшим количеством измеряемых показателей, а также большой удаленностью датчиков стенда от пульта оператора решено по возможности использовать оборудование с унифицированным токовым сигналом 4–20 мА.

На рейке DIN_1 стойки управления стенда расположены элементы питания для датчиков давления, на DIN_2 – модули сбора сигналов с платиновых термометров, датчиков давления и расходомеров, DIN_3 отвечает за питание и управление электроклапанами CV_{01} и CV_{71} . На рейке DIN_4 расположено шасси Compact RIO, отвечающее за управление и контроль дистанционно управляемых вентилях стенда. Блок IT_{16} , обрабатывающий показания термометров ТВО установлен в отдельном крейте, расположенном внизу стойки. Для обработки полученных сигналов с датчиков и генерации управляющих

воздействий используется оборудование отечественной фирмы ОВЕН, в частности модули аналогового ввода MB_{110} , модули дискретного вывода MU_{110} , преобразователи интерфейсов AC_4 и блоки питания постоянного тока.

Управление электропозиционерами вентилях обеспечивается через модули аналогового вывода сигналов NI 9219 и модули ввода NI 9212 (обратная связь) шасси National Instruments Compact RIO. Данное шасси обладает повышенной помехоустойчивостью и защитой от отключения питания, что позволяет обезопасить работу стенда в случае внештатной ситуации. Модули ввода аналоговых сигналов MB_{110} -8А обрабатывают информацию, полученную со следующих устройств стенда: датчиков давления “Метран-150” избыточного и абсолютного давления; датчиков давления ПД-100; расходомеров YOKOGAWA; платиновых термометров, установленных на внешней поверхности трубопроводов; гелиевых и азотных уровнемеров, подключаемых через модуль LM-500. Данные устройства подключены по интерфейсу “токовая петля” 4–20 мА и 0–5 мА в зависимости от типа устройства. Для обеспечения питания датчиков давления и расходомеров в схему подключения встроены блоки питания автоматики постоянного тока. Связь с пультом оператора обеспечивается через интерфейс RS485, которым снабжены все модули. Непосредственно у пульта расположены преобразователи интерфейса RS485-USB которые передают информацию на ПК.

Для измерения вакуума используются следующие датчики: ПМТ-4М (диапазон измерения $5 \cdot 10^{-1} - 10^{-4}$ мм. рт. ст.); Edwards APG-100XLC (диапазон $10^3 - 10^{-4}$ мбар); Edwards WRG-S (диапазон $10^3 - 10^{-9}$ мбар). Сигналы с них передаются на промежуточные устройства отображения, в случае с ПМТ это МЕРАДАТ-ВИТ16Т3 (одноканальные), для датчиков EDWARDS – контроллеры TIC-3 и TIC-6 (на 3 и 6 каналов, соответственно). После предварительной обработки, информация с датчиков поступает на пульт контроля изоляционного вакуума стенда. Передача от контроллеров до пульта осуществляется по стандарту RS-485.

Модуль дискретного вывода MU_{110} используется в системе для осуществления управления электроклапанами CV_{01}, CV_{71} модели ASKA PRO142. Особенностью данных модулей является питание переменным током 36 В, что несвойственно устройствам автоматики. Для

решения этой проблемы были использованы понижающие трансформаторы 220/36.

Открытие/закрытие клапанов проводится командой оператора с пульта управления стендом. Также индикация текущего состояния клапана отображается индикацией на самом модуле. Шасси Compact RIO обеспечивает управление электропозиционерами Siemens и Samson, установленными на дистанционно-управляемых вентилях стенда. Управляющий сигнал регулировки степени открытия вентилей поступает от пульта оператора по отдельному каналу Ethernet через четырехканальные модули выхода NI 9265, установленными в шасси. Обратная связь с ЭВМ о текущем состоянии вентилей осуществляется через модули аналогового ввода сигналов NI 9219. В случае пропажи питания шасси сохраняет последнее заданное положение вентилей, либо переводит их в безопасное для работы установки положение в зависимости от указанных настроек.

Непосредственно у пульта оператора расположены преобразователи интерфейсов RS 485 и CAN, необходимые для вывода данных на ПК. Там же установлен лабораторный источник питания EA-PS 2042-20В, через который осуществляется управление мощностью нагревателя, смонтированного на дне переохладителя. Источник имеет два режима управления: ручной – посредством регулирования напряжения и силы тока на приборе – и дистанционный – на мнемосхеме пульта оператора путем ввода необходимого значения мощности, что возможно благодаря встроенному в источник интерфейсу USB.

4. ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ

Программная часть стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольных представляет собой мнемосхему с интерактивными графическими элементами, физически расположенную на компьютере (пульт оператора), и доступную в режиме чтения по протоколу RDP пользователям, находящимся вне стенда. Таким образом, заинтересованные лица могут наблюдать за текущими процессами в реальном времени удаленно.

Мнемосхема позволяет осуществлять как ручное управление вентилями и клапанами стенда, так и вести автоматический режим регулировки ряда показателей в зависимости от уставок, назначенных оператором. За динамикой про-

исходящих процессов можно наблюдать при помощи графиков, вынесенных в правую часть интерфейса. На пульте оператора эти графики вынесены на отдельный дисплей, а для удаленного пользователя отображаются на объединенном экране. Элементы интерфейса для просмотра дополнительной информации по датчикам и конечным устройствам вынесены на отдельные вкладки мнемосхемы. Для оператора данная информация была бы излишней, поэтому она вынесена на отдельную вкладку мнемосхемы.

Управление уровнем азота, поступающего в испаритель, производится автоматически. Для этого используется функционал дистанционно управляемого электроклапана CV_{71} , который расположен на выходе азотного трубопровода и в зависимости от текущей температуры в распорядительном боксе и уровне расхода на участке “квенч–рессивер” производит открытие/закрытие, регулируя поток выходящего газа.

Все автоматические режимы при желании оператора могут быть отключены, после чего стенд переходит в режим ручного управления. Это полезно в случаях проведения испытаний нового оборудования, а также при наладке новых режимов регулирования охлаждения/отопления. Все параметры стенда записываются в архив испытаний и хранятся в формате .xls-таблиц вида дата–параметр–значение на пульте оператора. В дальнейшем планируется организовать резервное сохранение данных на удаленный сервер-архив.

Программа написана на LabView 2014 developer edition с использованием библиотек, предоставляемых производителями для дистанционно управляемых вентилей WEKA и лабораторного источника питания EA-PS 2042-20В. Выбор LabView обусловлен разнообразием используемых на стенде приборов и элементов управления, что при выборе более узкоспециализированного языка вызвало бы задержки в проектировании.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана система контроля и управления параметрами стенда для исследования сверхпроводящих квадрупольных магнитов системы финальной фокусировки пучка ионов. Она имеет 37 каналов для измерения температуры, давления, вакуума, уровня и расхода жидкого гелия и азота в узловых точках стенда и 9 кана-

лов для их регулировки. Система позволяет осуществлять как ручное управление вентилями и клапанами стенда, так и вести автоматический режим регулировки ряда параметров. За динамикой происходящих процессов можно наблюдать при помощи графиков, вынесенных на компьютер. Все параметры стенда записываются в архив испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tkachenko L., Ageyev A., Altukhov Y., et al. // Proc. RUPAC'18. Protvino, Russia. 2018. P. 78. <http://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WESBMH03>
2. Tkachenko L., Ageev A., Altukhov Yu., Bogdanov I., Kashtanov E., Kozub S., Varentsov D., Zinchenko S. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. V. 941. P. 162323. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.064>
3. Ageev A.И., Алтухов Ю.В., Богданов И.В., Каиштанов Е.М., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Ткаченко Л.М. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 4 (105). С. 28.
4. Tkachenko L., Altukhov Y., Bogdanov I., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32. № 4. P. 4000105. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3141979>
5. Ageev A.I., Altukhov Yu. V., Stolyarov M.N., Kozub S.S. // Cryogenics 2021 online. Proceedings of the 16th IIR International Conference, October 5–7. 2021. <http://doi.org/10.18462/iir.cryo.2021.0003>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.626:538.945

ПРОТОТИП СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОНДУЛЯТОРА
С ПЕРИОДОМ 12 мм И ПОЛЕМ 0.7 Тл¹

© 2025 г. С. В. Хрущев^{a, b, *}, Н. А. Мезенцев^{a, b}, А. Н. Сафронов^a,
В. А. Шкаруба^{a, b}, В. М. Цуканов^{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, Никольский пр., 1

* e-mail: S.V.Khruschev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.

После доработки 29.02.2024 г.

Принята к публикации 17.04.2024 г.

В Институте ядерной физики СО РАН разработан прототип сверхпроводящего ондулятора с периодом 12 мм и полем 0.7 Тл. Вертикальная апертура для пучка составляет 5 мм при межполюсном зазоре 7 мм. В статье обоснован выбор параметров ондулятора, описана его конструкция, основанная на горизонтальном рейстреке с нейтральными полюсами, приведены расчетные характеристики ондулятора и генерируемого им излучения.

DOI: 10.31857/S0032816225070229

1. ВВЕДЕНИЕ

Для генерации синхротронного излучения с необходимыми характеристиками в настоящее время на накопительных кольцах широко используются вигглеры и ондуляторы. Использование сверхпроводящих магнитов позволяет значительно уменьшить период устройства и, соответственно, разместить больше полюсов на той же длине при сохранении величины магнитного поля по сравнению с аналогичными устройствами на основе постоянных магнитов. Ниже описан прототип одного из сверхпроводящих ондуляторов с минимальным периодом.

2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОНДУЛЯТОРА

Наиболее востребованными для экспериментов с СИ являются длины волн ондуляторного излучения порядка одного ангстрема ($\epsilon =$

$= 12.4$ кэВ), которые при малом периоде ондулятора (~ 12 мм) генерируются на гармониках 1–3–5. Это снижает требования к величине фазовой ошибки, которая определяется геометрической точностью изготовления полюсов ондулятора, так как большая фазовая ошибка снижает амплитуду излучения только на более высоких гармониках.

Для обеспечения таких требований к спектру излучения для энергии электронов $E = 3$ ГэВ требуется период ондулятора в диапазоне 11–13 мм и магнитное поле 0.7–1 Тл. Величина магнитного поля для периодической структуры зависит как от межполюсного зазора, так и от длины периода. Величина межполюсного зазора определяется условиями движения электронов в накопителе. В современных источниках синхротронного излучения допускается уменьшение вертикальной апертуры для пучка электронов до 5–6 мм, что дает возможность уменьшить межполюсный зазор до 7–8 мм, что в свою оче-

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

редь позволяет увеличить уровень магнитного поля. Использование же для изготовления электромагнитных полюсов ондулятора обмоток из сверхпроводящего провода NbTi, работающего при криогенных температурах, дает возможность еще больше увеличить уровень магнитного поля даже при одновременном уменьшении геометрических размеров катушек, что позволяет разместить на доступной длине большее количество магнитных полюсов. Использование сверхпроводящих материалов дает значительные преимущества для получения более высокого поля по сравнению с постоянными магнитами.

3. РАСЧЕТ ПОЛЯ ОНДУЛЯТОРА

Конструкция сверхпроводящего ондулятора основана на схеме с нейтральными полюсами [1–3]. Для расчетов магнитного поля был выбран коммерчески доступный на сегодняшний день сверхпроводящий провод диаметром 0.55 мм с предельно возможными характеристиками (критическим током не менее 240А в поле 7 Тл), изготовленный в научно-исследовательском институте неорганических материалов им. А.А.Бочвара (ВНИИНМ). Основные параметры провода приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сверхпроводящего провода

Параметр	Значение
Диаметр провода с изоляцией и без, мм	0.55/0.50
Отношение NbTi/Cu	1.4
Число нитей NbTi в проводе	312
Диаметр нитей NbTi, мкм	37
Критический ток в поле 7 Тл, А	240

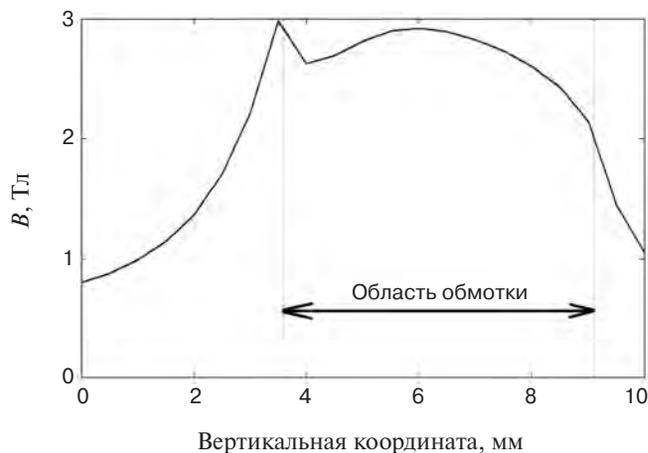


Рис. 1. Распределение поля в обмотке по вертикали.

В расчетах ниже период ондулятора выбран равным 12 мм, а межполюсный зазор принят равным 7 мм. Максимальное поле в ондуляторе определяется критическими токами сверхпроводящего провода. Для определения критического тока в обмотке рассматривается распределение поля по вертикали в области максимального поля (на внутренней части радиусного закругления обмотки типа рейстрек). На рис. 1 представлена величина магнитного поля при сканировании обмотки по вертикали.

На рис. 2 представлено положение точек, характеризующих поле и ток в обмотке, относительно критических кривых выбранного сверхпроводящего провода для температур 4.2 и 3.5 К. Критический ток в обмотке при температуре 4.2 К равен 710 А, что соответствует полю в медианной плоскости 0.77 Тл, при температуре 3.5 К равен 775 А, что соответствует полю в меди-

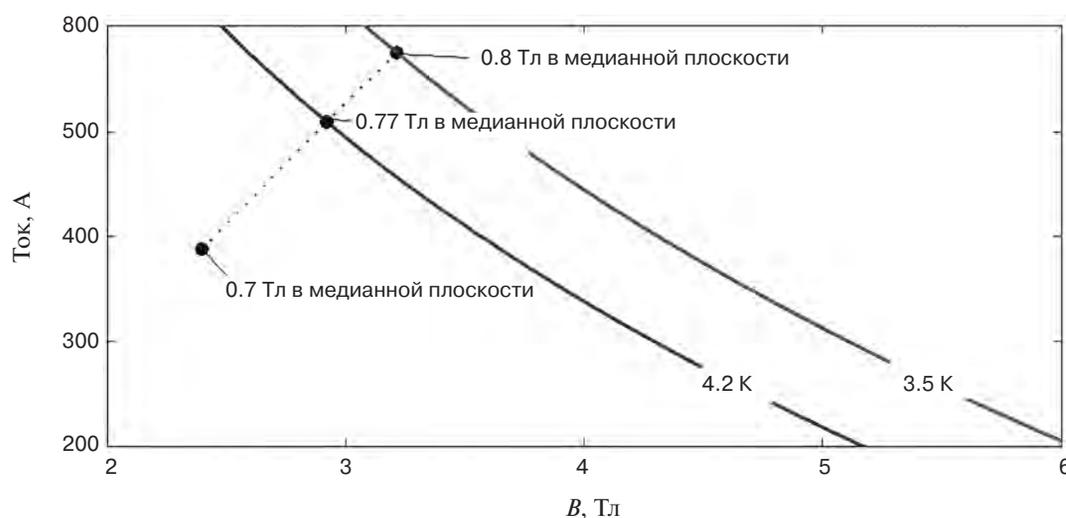


Рис. 2. Точки, характеризующие поле и ток в обмотке, относительно критических кривых выбранного сверхпроводящего провода.

анной плоскости 0.8 Тл. При этом мы можем считать допустимым рабочим полем 0.7 Тл, при котором ток в обмотке составляет 588 А.

4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОНДУЛЯТОРА

Важной характеристикой динамики пучка является однородность распределения магнитного поля в поперечном направлении. Эта характеристика зависит от поперечного размера магнитных полюсов. Обычно требования к поперечной однородности предполагают изменение поля в пределах 0.5% при поперечном отклонении от оси в пределах 10 мм. На рис. 3 представлено поперечное распределение поля вблизи орбиты пучка электронов. Можно видеть, что обычные требования выполняются с большим запасом. Основные параметры ондулятора приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры ондулятора

Параметр	Значение
Период, мм	12
Магнитный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Номинальное магнитное поле, Тл	0.7
Число слоев в обмотке основного полюса	3
Число витков в слое обмотки основного полюса	10(9)
Номинальный ток в основных обмотках, А	588
Критический ток обмотки при 4.2К, А	710
Критический ток обмотки при 3.5К, А	775
Магнитное поле, соответствующее критическому току в основной обмотке, Тл	0.77

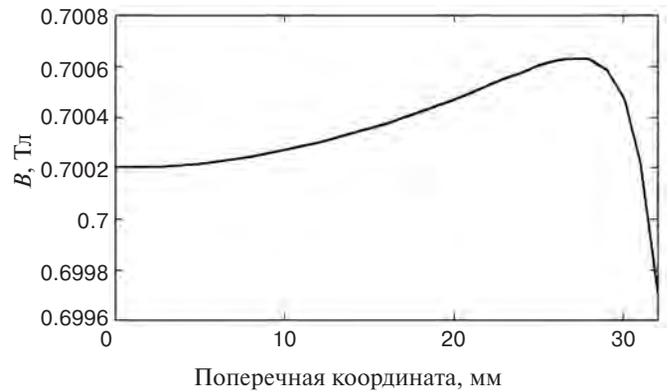


Рис. 3. Поперечное распределение магнитного поля.

Для расчетов была выбрана модель ондулятора, состоящая из 10 основных периодов и дополнительных боковых полюсов с полем 1/4 и 3/4 от основных полюсов. На рис. 4 представлено распределение магнитного поля относительно продольной оси ондулятора.

Характер излучения из ондулятора также сильно зависит от орбиты пучка в ондуляторе. Поэтому для замыкания орбиты пучка, пролетающего через магнитное поле ондулятора, необходимо минимизировать величины первого и второго интегралов магнитного поля вдоль продольной координаты.

Расчетные угол отклонения орбиты и поперечное отклонение пучка электронов в ондуляторе относительно продольной координаты для энергии пучка 3 ГэВ приведены на рис. 5 и 6.

Период ондулятора равен 12 мм, следовательно, при полноразмерной технологически доступной для изготовления магнитной системе длиной около 2 м в ондуляторе будет содер-

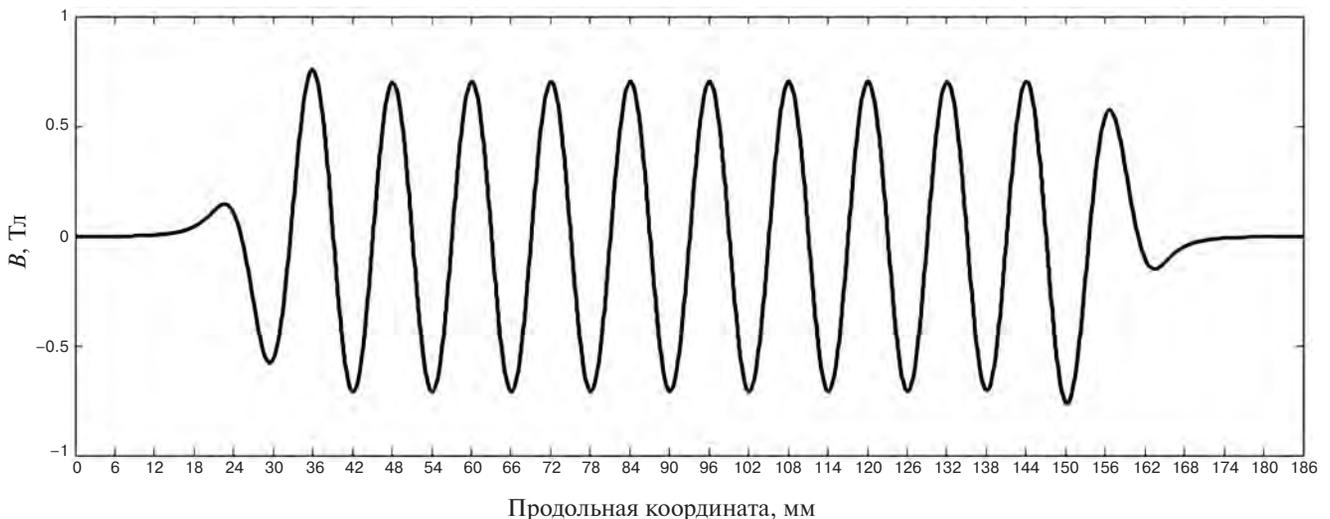


Рис. 4. Продольное распределение магнитного поля.

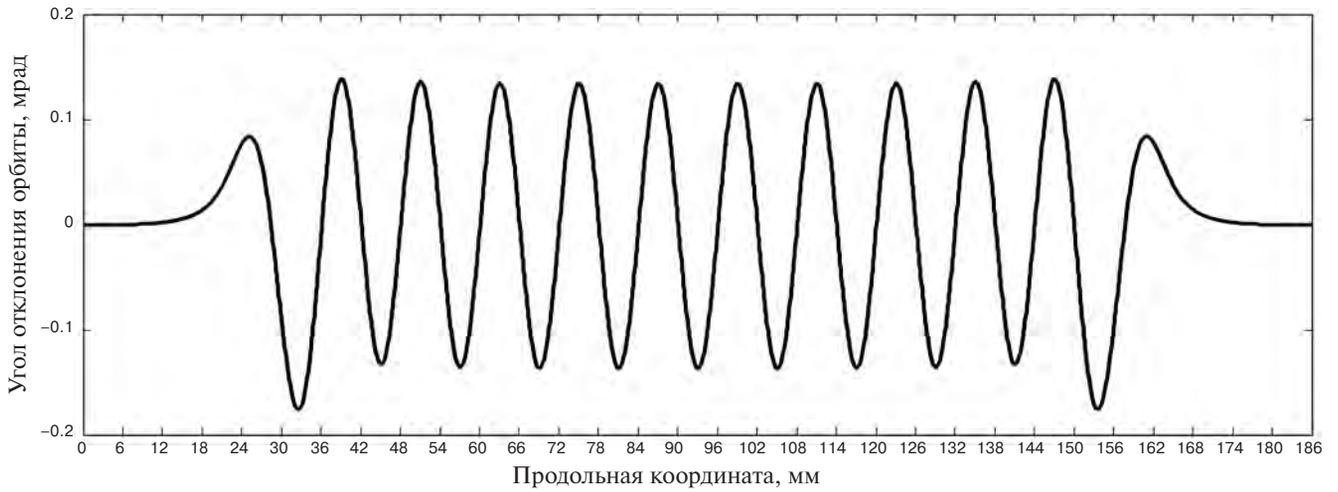


Рис. 5. Распределение угла отклонения орбиты вдоль продольной оси.

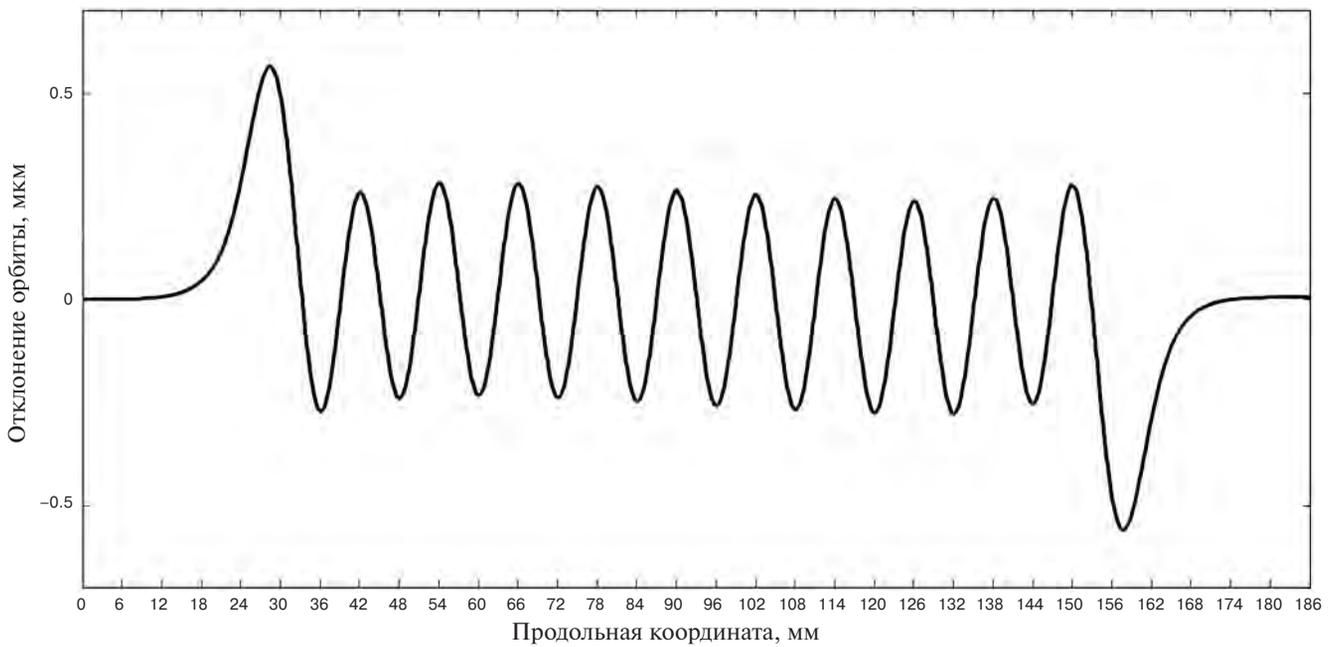


Рис. 6. Поперечное отклонение пучка электронов от продольной оси.

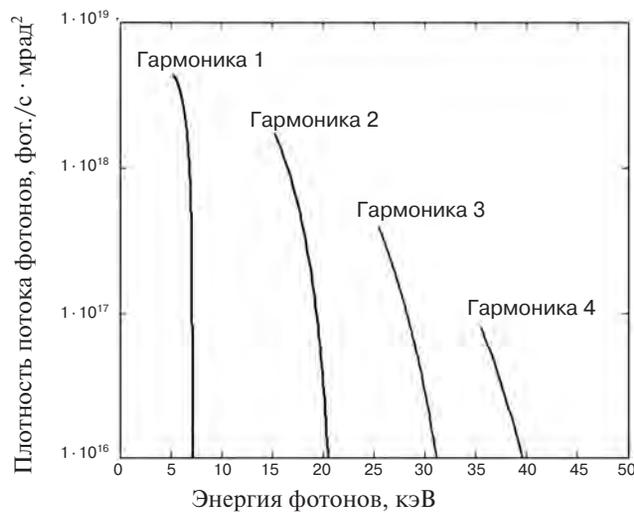


Рис. 7. Спектральный поток фотонов при изменении поля в ондуляторе от нуля до максимального рабочего поля: $\lambda = 12$ мм, $E = 3$ ГэВ.

жаться 160 периодов и 4 крайних полюса с полем $1/4$ и $3/4$ от основных полюсов.

На рис. 7 показаны спектральные потоки фотонов из такого ондулятора при изменении магнитного поля от нуля до максимума, $E = 3$ ГэВ, $I = 0.4$ А. Можно отметить, что вследствие того, что значение $K < 2$, некоторые энергии фотонов спектра излучения в нечетных гармониках будут недоступны.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были проведены расчеты основных параметров и продемонстрирована возможность создания сверхпроводящего ондулятора с периодом 12 мм, а также определены его основные геометрические и физические параметры. Были подтверждены расчетом предельно достижимые параметры такого ондулятора по максимальной величине магнитного поля 0.7 Тл при температуре 4.2 К и минимально допустимом межполюсном зазоре 7 мм, что позволяет сделать апертуру вакуумной камеры равной 5 мм. Была обоснована и определена конструкция ондулятора на основе магнитной системы с активными и нейтральными полюсами, которая позволяет вдвое уменьшить количество катушек и число электрических контактов между катушками, что снижает мощность, выделяемую на этих соединениях при протекании тока. Была разработана конструкция 40-периодного рабочего прототипа ондулятора с периодом 12 мм.

В настоящее время идет изготовление экспериментального образца 40-периодного ондулятора. Проведение испытаний прототипа магнитной системы ондулятора в жидком гелии, включая измерения магнитного поля и сравнение результатов измерений с расчетными значениями, было запланировано на 2023 год.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khrushchev S., Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tsukanov V.* // Physics Procedia (SRF-2016). 2016. V. 84. P. 62.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.011>
2. *Mezentsev N.A., Khrushchev S.V., Shkaruba V.A., Syrovatin V.M., Tsukanov V.M.* // Proc. RuPAC'16. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 21.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-TU-CAMH01>
3. *Bragin A., Khrushchev S., Lev V. et al.* // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. V. 28. № 4. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2805162>

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.626:538.945

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ВИГГЛЕРАМ
И ОНДУЛЯТОРАМ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ СКИФ¹

© 2025 г. В. А. Шкаруба^{a, b, *}, А. В. Брагин^a, А. А. Волков^{a, b}, Е. А. Гусев^a, 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,
А. А. Седов^a, О. А. Тарасенко^a, С. В. Хрущев^{a, b}, В. М. Цуканов^{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: shkaruba@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 01.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Сверхпроводящие вставные устройства (вигглеры и ондуляторы), создаваемые в ИЯФ СО РАН, будут основными устройствами для генерации синхротронного излучения на строящемся синхротроне СКИФ. Представлено обоснование выбора рабочих параметров, основные характеристики и особенности конструкции этих устройств, а также текущий статус работ по их созданию.

DOI: 10.31857/S0032816225070233

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование сверхпроводящих вставных устройств (вигглеров и ондуляторов) позволяет получать на относительно небольших источниках синхротронного излучения (СИ) с энергией около 3 ГэВ синхротронное излучение, не уступающее по характеристикам излучению из поворотных магнитов на накопителях с высокой энергией до 6 ГэВ. На источнике СИ СКИФ [1] с энергией 3 ГэВ основными устройствами генерации фотонов являются сверхпроводящие многополюсные вставные устройства со знакопеременным магнитным полем – вигглеры [2] и ондуляторы [3]. Использование сверхпроводящих технологий дает возможность получать более высокий уровень магнитного поля при минимальном периоде магнитной структуры,

по сравнению с аналогичными устройствами на постоянных магнитах, что позволяет разместить на доступной длине промежутка большее число электромагнитных полюсов для увеличения интенсивности генерируемого излучения. Интенсивность излучения из вигглеров возрастает пропорционально количеству полюсов, а для ондуляторов эта характеристика растет квадратично. В первой очереди строительства источника СКИФ планируется создать пять экспериментальных станций, основанных на излучении из сверхпроводящих вставных устройств, в том числе два вигглера и три ондулятора. Магнитные параметры каждого из этих устройств были оптимизированы для выполнения конкретных пользовательских задач. Основные характеристики этих устройств представлены в табл. 1.

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

2. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВИГГЛЕРЫ

Для проведения экспериментов на синхротронном излучении в высокоэнергетичном рентгеновском диапазоне (примерно до 150 кэВ) используются многополюсные вигглеры с высоким уровнем поля. В этом случае траектория пучка электронов отклоняется на углы много большие, чем угол естественного расхождения фотонного пучка $1/\gamma$ (где γ – релятивистский фактор). Фотоны, генерируемые такими вставными устройствами, имеют широкий спектр и дают возможность засвечивать большую геометрическую область образца. Однако в этом случае необходимо выделять из широкого непрерывного спектра излучения большой мощности тот спектральный диапазон, который требуется для эксперимента при использовании средств рентгеновской оптики, а значительную часть неиспользуемой мощности приходится поглощать оптическими элементами канала вывода излучения.

2.1. Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и полем 2.7 Тл для станций 1–3

При разработке экспериментальной станции 1–3 “Быстропротекающие процессы”, предназначенной для получения “рентгеновского кино” при исследовании материалов в условиях импульсных ударных нагрузок с характерными масштабами времени от пикосекунд до миллисекунд, требовалось устройство, обеспечивающее генерацию максимального количества фотонов на один электронный ступок в широком спектраль-

ном диапазоне от 20 кэВ до 70 кэВ. В этом случае было оправдано использование именно вигглера, поскольку создание ондулятора, генерирующего излучение на высоких гармониках с энергией квантов до 70 кэВ, в настоящее время технически недоступно. В качестве вставного устройства, оптимального для заданной энергии и имеющего широкий пучок для решения задач радиографии, был разработан сверхпроводящий 148-полюсный вигглер с периодом 27 мм и магнитным полем 2.7 Тл. Полная мощность излучения, генерируемого в горизонтальный угол ± 1.2 мрад, была ограничена величиной около 35 кВт для защиты элементов канала вывода излучения от высокой тепловой нагрузки. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из этого вигглера представлено на рис. 1а. Основная обмотка имеет одну секцию и изготавливается из сверхпроводящего провода Nb–Ti/Cu диаметром 0.9 мм, имеющего критический ток 570 А в поле 7 Тл. В настоящее время закончено изготовление полноразмерной 148-полюсной магнитной структуры вигглера и проведены предварительные испытания в жидком гелии. В процессе тренировки был достигнут рабочий уровень магнитного поля 2.7 Тл, как показано на рис. 2а. Внешний вид вигглера в процессе сборки представлен на рис. 3. Параметры этого устройства являются на сегодняшний день рекордными с точки зрения достижения максимально возможного уровня поля при минимальной величине периода. Ближайшим по этим параметрам является 119-полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 2.1 Тл и периодом 30 мм, установленный на накопителе

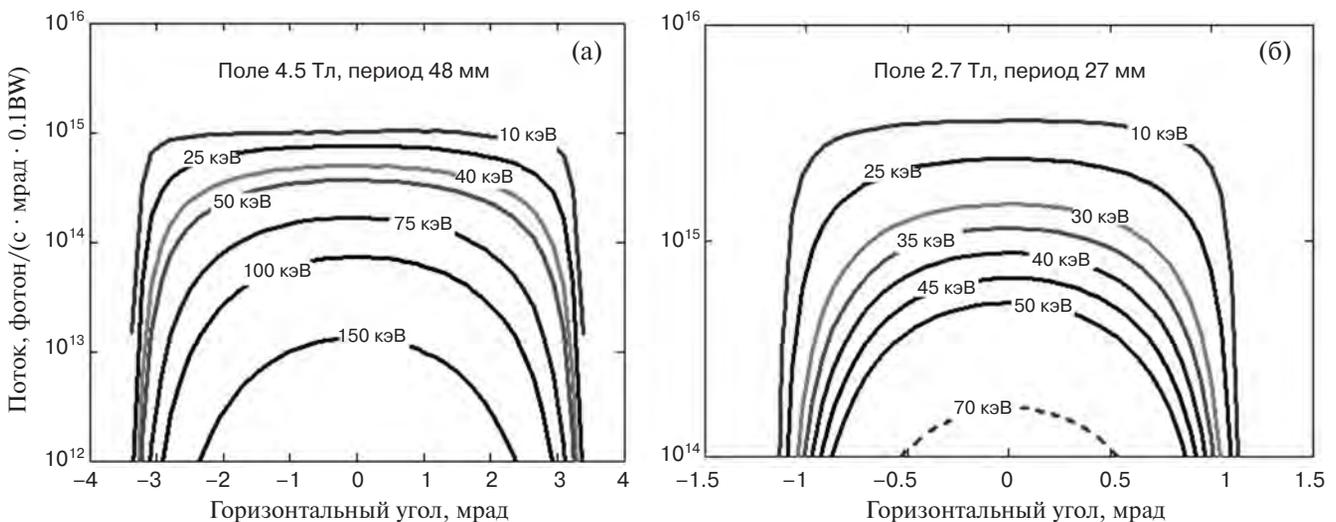


Рис. 1. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из вигглеров с полем 2.7 Тл (а) и 4.5 Тл (б) для тока 0.4 А и энергии пучка 4 ГэВ.

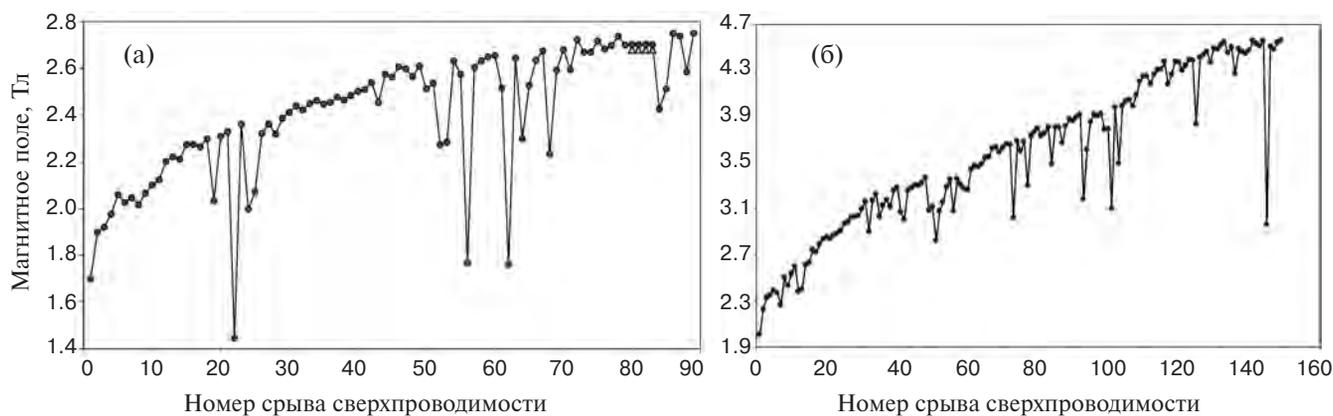


Рис. 2. Графики тренировки сверхпроводящих вигглеров для получения максимального уровня поля 2.7 Тл (а) и 4.5 Тл (б).



Рис. 3. Внешний вид вигглера с периодом 27 мм и полем 2.7 Тл в процессе сборки.

ALBA [4]. В 2023 году планировалось провести запуск вигглера в собственном криостате с проведением полного цикла испытаний.

2.2. Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4.5 Тл для станции 1–5

Экспериментальная станция 1–5, называемая “Диагностика в высокоэнергетичном рентгеновском диапазоне”, предназначена для исследования образцов в области материаловедения, геологии, археологии и биомедицины методами рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцент-

ного анализа в жестком диапазоне фотонов. Основные параметры магнитной структуры вигглера были оптимизированы для получения максимально возможного потока фотонов в требуемом диапазоне энергий от 25 до 150 кэВ. Поскольку основной вклад в тепловую нагрузку на элементы рентгеновской оптики дает поглощение мягкой части спектра, а жесткость спектра пропорциональна величине магнитного поля, то спектр излучения был сдвинут в жесткую область за счет получения максимально возможного уровня магнитного поля. При минимальном технологически возможном магнитном

зазоре величиной 7 мм, который ограничен условиями динамики электронного пучка по вертикальной апертуре вакуумной камеры 5 мм, оптимальный уровень магнитного поля составил 4.5 Тл при периоде 48 мм, а число основных периодов равно 18. Для изготовления обмоток был использован сверхпроводящий провод Nb–Ti/Cu диаметром 0.9 мм, имеющий критический ток около 380 А в поле 7 Тл. Дополнительным условием было ограничение мощности излучения на уровне примерно 35 кВт во избежание теплового разрушения алмазных окон канала вывода излучения. При этом полная мощность излучения генерируется в горизонтальный угол ± 3.5 мрад. На рис. 16 представлено спектрально-угловое распределение потока фотонов для данного вигглера. Полноразмерная 40-полюсная магнитная система вигглера была успешно испытана в криостате с жидким гелием, где в процессе тренировки было достигнуто требуемое рабочее поле величиной 4.5 Тл, как представлено на рис. 26. Запуск вигглера и проведение полного цикла испытаний в собственном криостате планировалось провести в 2023 году.

3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ОНДУЛЯТОРЫ

Отличие магнитной структуры ондулятора от вигглера состоит в том, что в ондуляторе траектория электронного пучка отклоняется на малые углы, сравнимые с углом естественного расхождения пучка фотонов $1/\gamma$, в результате чего возникает интерференция излучения из всех полюсов, что приводит к дискретному спектру ондуляторного излучения в виде гармоник. Создание источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ со сверхмалым горизонтальным эмиттансом (около $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$), который приближается к дифракционному пределу в наиболее востребованном диапазоне энергий фотонов, дает возможность создания когерентных пучков фотонов высокой яркости с энергией в десятки кэВ. Такие пучки могут генерироваться с помощью многополюсных сверхпроводящих ондуляторов с коротким периодом около 15–18 мм и магнитным полем на орбите около 1.2–1.6 Тл. Критерием качества ондулятора является величина среднеквадратичной фазовой ошибки, которая характери-

зует отличие магнитного поля реального ондулятора от идеального синусоидального поля и не должна превышать величину примерно три градуса. На современных накопителях с малым эмиттансом и разбросом по энергии значение этого параметра особенно возрастает, так как большая величина фазовой ошибки будет ограничивать яркость излучения на высоких гармониках и не позволит в полной мере использовать возможности накопителя.

3.1. Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл для станций 1–1 и 1–2

Для генерации излучения на экспериментальных станциях “Микрофокус” (1–1) и “Структурная диагностика” (1–2), предназначенных для исследований широкого спектра задач методами микроскопии и рентгеновской дифракции, будут использоваться два одинаковых сверхпроводящих ондулятора с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл. Для проведения экспериментов необходимы высокие гармоники ондуляторного излучения с энергией фотонов вплоть до 35 кэВ. Это налагает особо жесткие требования на минимизацию величины фазовой ошибки, которая возрастает с увеличением разницы в амплитудах поля между полюсами, а также с нестабильностью величины периода на длине ондулятора. Разброс геометрических размеров магнитных полюсов по оценкам не должен превышать 10–20 мкм.

Для исследования технической возможности создания устройства с требуемыми характеристиками был спроектирован и изготовлен полноразмерный прототип 119-полюсного ондулятора, основанный на чередующихся активных и нейтральных полюсах [5]. Основным элементом магнитной структуры является сверхпроводящая катушка, намотанная на железном сердечнике. Использовался сверхпроводящий провод Nb–Ti/Cu диаметром 0.55 мм с критическим током 260 А в поле 7 Тл. Максимальное поле в критической области обмотки при токе 500 А составляет 4.25 Тл, что соответствует уровню поля 1.2 Тл на оси ондулятора. График тренировки магнитной системы сверхпроводящего ондулятора для получения максимального магнитного поля приведен на рис. 4.

Возможная нестабильность длины периода была минимизирована фрезеровкой пазов для установки сверхпроводящих полюсов с точно-

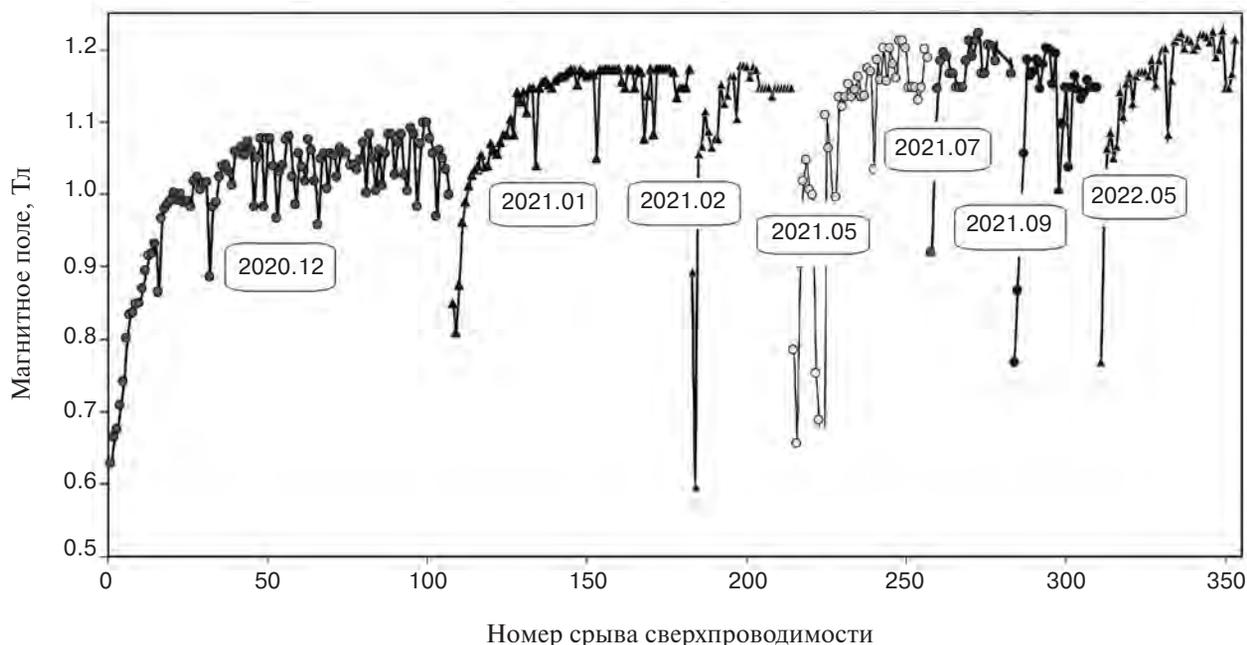


Рис. 4. График тренеровки магнитной системы сверхпроводящего ондулятора полем 1.2 Тл для получения максимального магнитного поля.

стью не хуже 10–20 мкм. Однако отладить технологию изготовления самих полюсов, обеспечивающую такую же повторяемость в размерах, не представляется возможным. Поэтому величина фазовой ошибки ондулятора, вычисленная на основе магнитных измерений сразу после изготовления ондулятора, оказалась более пяти градусов. Была проведена серия перестановок отдельных полюсов между собой на основе измерения амплитуд магнитного поля. Однако сильное взаимное влияние полей соседних катушек друг на друга не позволило определить вклад каждой отдельной катушки в результирующее магнитное поле. В результате величину фазовой ошибки удалось понизить только до четырех градусов. Для дальнейшего улучшения качества поля был предложен способ подавления фазовой ошибки, основанный на запитке отдельных групп полюсов независимыми корректирующими источниками тока на уровне примерно 1% от основного тока величиной около 500 А. Корректирующие токи вводились в обмотки ондулятора через специальные комбинированные токовводы, состоящие из последовательно соединенной медной проволоки, оптимизированной на протекание тока примерно до 5 А, ВТСП-ленты и Nb–Ti-проволоки. Места соединения всех участков, комбинированных токо-

вводов между собой, охлаждались через изолированные теплоперехваты соответствующими ступенями криокулеров с температурами 60К, 20 К и 4К. Внешний вид криостата с комбинированными ВТСП-токовводами для коррекции фазовой ошибки представлен на рис. 5.

Независимая запитка каждой группы катушек дала возможность подобрать корректирующие токи, позволившие одновременно скорректировать уровень магнитного поля и орбиту

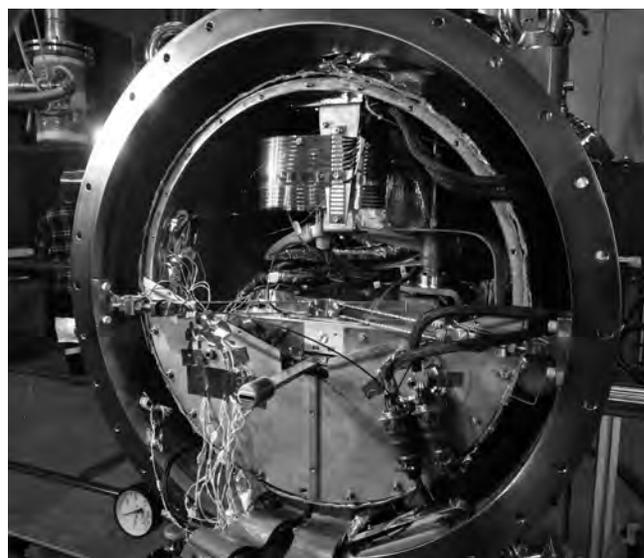


Рис. 5. Внешний вид криостата в процессе сборки.

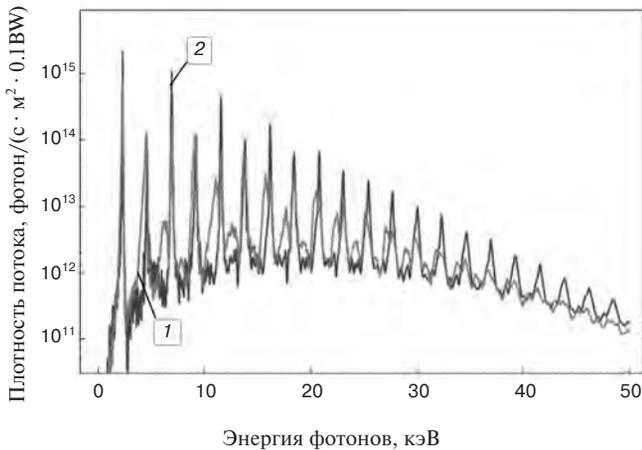


Рис. 6. Спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA на основе нескорректированного (1) и скорректированного (2) магнитных полей ондулятора.

пучка на всей длине ондулятора. В результате коррекции величина интегральной фазовой ошибки, вычисленной на основе измерений магнитного поля вдоль ондулятора, составила 2.9 градуса, а локальная фазовая ошибка снизилась до 1.9 градуса. На рис. 6 представлены спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA [6] на основе нескорректированного и скорректированного магнитного поля ондулятора для энергии электронного пучка 3 ГэВ, тока 0.4 А и эмиттанса $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$, из которых видно, что спектральные пики излучения после коррекции магнитного поля значительно выросли на всех гармониках. Запуск ондуляторов в собственных криостатах был запланирован на 2024 г.

3.2. Сверхпроводящий ондулятор с периодом 18 мм и полем 1.6 Тл для станции 1–4.

Для экспериментальной станции 1–4 (“XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм”), использующей методы рентгеновской спектроскопии, оптимальным выбором источника излучения является сверхпроводящий ондулятор с периодом 18 мм и полем 1.6 Тл, который позволит проводить эксперименты в диапазоне от 4 кэВ до 35 кэВ. Конструкция этого устройства, основанная на тех же принципах, что и предыдущие ондуляторы, находится на стадии разработки и изготовления. Запуск ондулятора был запланирован на 2024 г. Спектральные характеристики данного вставного устройства представлены на рис. 7.

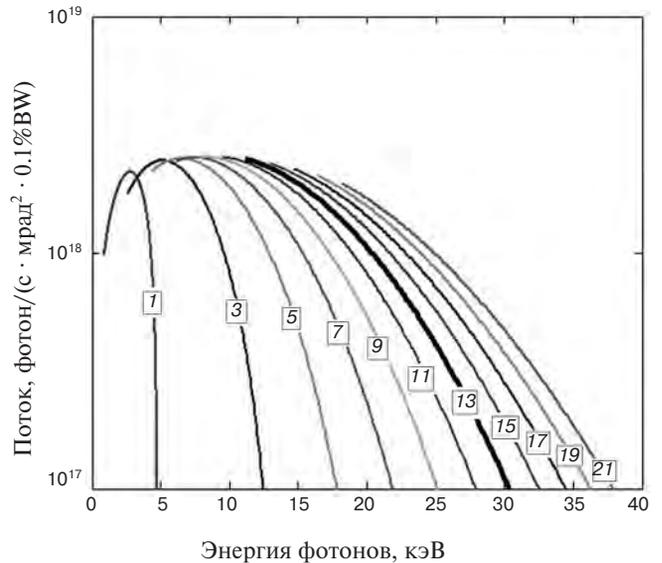


Рис. 7. Спектральный поток фотонов ондулятора с периодом 18 мм на гармониках с 1 по 21 при изменении поля от нуля до 1.6 Тл для тока 0.4 А и энергии пучка 4 ГэВ.

4. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Криогенная система представленных вставных устройств основана на принципе косвенного охлаждения, когда магнит располагается в вакууме, а все притоки тепла в криостате перехватываются на соответствующие ступени криокулеров. Температура магнита на уровне около 3.5 К поддерживается за счет циркуляции жидкого гелия по каналам в теле магнита, а сам гелий содержится в отдельном сосуде, расположенном в защитном вакууме вне магнита. Предварительное охлаждение магнита до рабочих температур проводится посредством азотных тепловых трубок, обеспечивающих отвод тепла на 60К ступени криокулеров. При достижении температуры заморозки азота примерно 64 К тепловая связь между магнитом и криокулером автоматически разрывается. Дальнейшее охлаждение магнита происходит уже за счет циркуляции гелия. При этом для первичного охлаждения используется только газообразный гелий, который подается из баллона со сжатым гелием через редуктор. По мере понижения температуры плотность гелия в криостате увеличивается и по достижению соответствующей температуры начинается ожидение и набор рабочего уровня гелия в сосуде. После захлаживания криогенная система позволяет работать в таком режиме

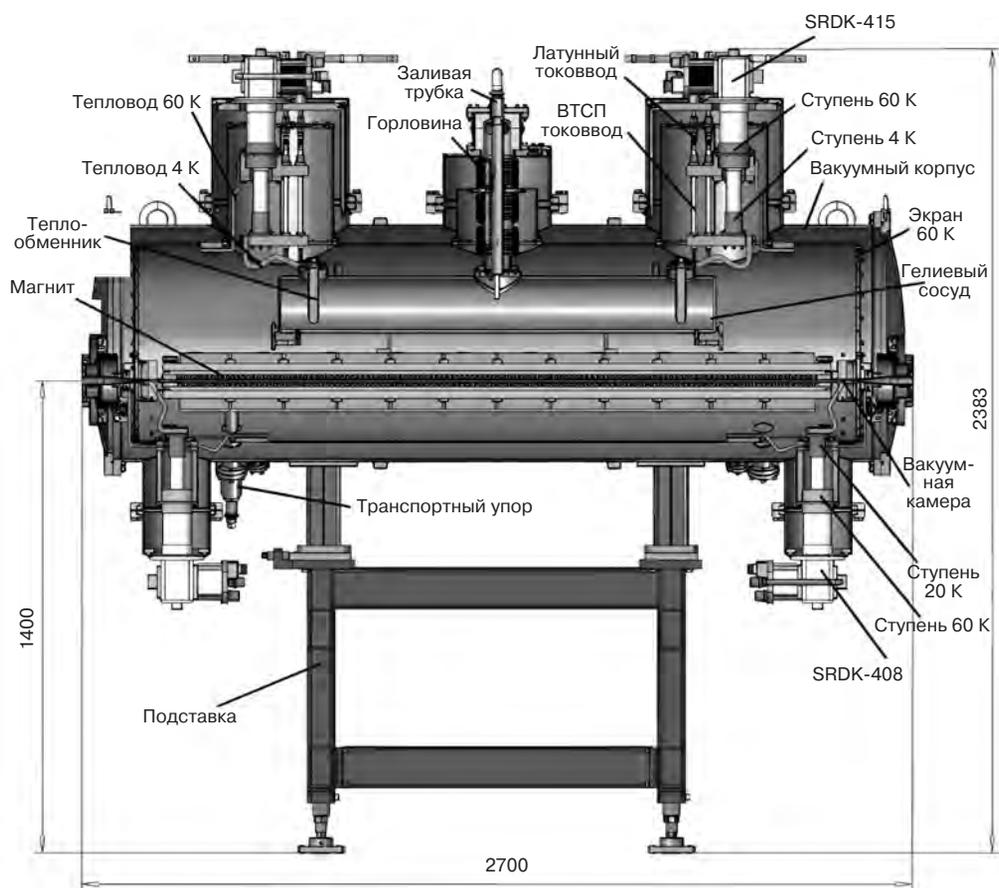


Рис. 8. Конструкция криостата на основе косвенного охлаждения для вигглеров и ондуляторов СКИФ.

автономно внутри биозащиты накопителя в течение нескольких лет. Конструкция криостата на основе косвенного охлаждения представлена на рис. 8.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными устройствами генерации синхротронного излучения на источнике СИ четвертого поколения СКИФ станут сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы, создаваемые в ИЯФ СО РАН, которые обеспечат требуемые спектральные характеристики для решения широкого спектра исследовательских задач.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24. P. 120704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704>
2. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Ерохин А.И., Зорин А.В., Лев В.Х., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Сыроватин В.М., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М. // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 4(229). С. 567.
3. Bragin A., Khrushchev S., Lev V., Mezentssev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tarasenko O., Tsukanov V., Volkov A., Zorin A. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. V. 28. № 4. P. 4101904. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2805162>.
4. Volkov A., Lev V., Mezentssev N., Miginskaya E., Syrovatin V., Khrushchev S., Tsukanov V., Shkaruba V. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. V. 6. P. 379.
5. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Ерохин А.И., Зорин А.В., Казанцев Ф.П., Каноник П.В., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Седов А.А., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М. // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 5. С. 627. <https://doi.org/10.31857/S0367676522701289>.
6. Tanaka T., Kitamura H. // Journal of Synchrotron Radiation. 200. V. 8. P. 1221. <https://doi.org/10.1107/S090904950101425X>.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.64 539.163

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО
УСКОРИТЕЛЯ И-2 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ
РАДИОИЗОТОПОВ¹

© 2025 г. Н. В. Марков^{а, *}, А. А. Артюхов^а, В. А. Загрядский^а, А. В. Козлов^а,
К. О. Королев^а, Т. В. Кулевой^а, К. А. Сергунова^а, И. И. Скобелин^а, В. С. Столбунов^а

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123060, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

* e-mail: markov@itep.ru

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.

После доработки 06.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Одним из возможных вариантов применения линейного ускорителя протонов И-2 Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) является наработка различных типов радиоизотопов. Представлены результаты первых экспериментальных исследований по измерению основных параметров пучка, облучению газообразной мишени ¹²⁴Xe и выделения из нее радиоизотопа ¹²³I. На основе полученных результатов разработаны предложения по модернизации систем ускорителя, а также конструкции мишени с целью обеспечения возможности получения активностей ¹²³I на уровне нескольких ГБк.

DOI: 10.31857/S0032816225070248

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ускорители тяжелых заряженных частиц находят все более широкое применение в медицине как с точки зрения развития и совершенствования технологий дистанционной лучевой терапии (протонная и ионная лучевые терапии), так и с точки зрения внедрения новых методов ядерной медицины (получение терапевтических и диагностических радиоизотопов). Если говорить о применении ускорителей в ядерной медицине, то здесь, помимо ускорителей низких энергий (до 20 МэВ), используемых для получения радиоизотопов, применяемых в позитронно-эмиссионной томографической диагностике (¹⁸F, ¹³N, ¹¹C), все больший интерес представляют ускорители средних (20–35 МэВ) и высоких энергий (более 35 МэВ). Это обусловлено в первую очередь возрастающим спросом на радиоизотопную продукцию, выводом из эксплуатации многих ядерных реакторов, использовавшихся для

получения медицинских радиоизотопов, а также развитием направления тераностики в ядерной медицине и поиском новых перспективных радиоизотопов для диагностики и терапии.

При этом с точки зрения ускорительных технологий наиболее распространенными типами ускорителей, используемых для наработки радиоизотопов, являются циклотроны. Однако регулярно во многих странах мира появляются проекты, нацеленные на создание специализированных линейных ускорителей. Среди преимуществ этого подхода можно выделить возможность создания установки с выводами пучка различных энергий (тем самым расширив перечень производимых изотопов), среди недостатков можно отметить более низкие значения среднего тока пучка (что приводит к получению меньших активностей), а также большие габариты линейного ускорителя. Как следствие, сегодня на рынке представлены в основном циклотроны, в то время как линейные ускорители, использующиеся для получения радиоизо-

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

топов, представляют собой научно-исследовательские установки.

В настоящее время в ККТЭФ успешно эксплуатируется линейный ускоритель протонов И-2, ранее использовавшийся в качестве инжектора синхротрона У-10. Основная область применения связана с проведением исследований в области изучения радиационной стойкости электронно-компонентной базы, а также с проведением технологического облучения элементов силовой полупроводниковой электроники. Кроме того, проводятся исследования в области радиобиологии и ускорительной техники. В соответствии с проектными параметрами (энергия протонов в выводном канале 24.5 МэВ, средний ток пучка 2.5 мкА) ускоритель также можно использовать и для получения различных типов радиоизотопов. В рамках развития этого направления совместно со специалистами Курчатовского комплекса физико-химических технологий (ККФХТ) были начаты исследования по изучению возможности получения на ускорителе И-2 клинически значимых активностей радиоизотопа ^{123}I , применяемого при проведении однофотонной эмиссионной компьютерной томографии.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках выполнения описываемых работ было проведено два эксперимента. В ходе первого эксперимента проводились исследования с имитатором мишени с целью определения основных параметров пучка в месте его расположения (геометрические размеры пучка, ток пучка, энергия протонов на входном окне мишени). Непосредственно облучение самой мишени проводилось во время второго эксперимента. При облучении мишень была заполнена газом ^{124}Xe , в котором под воздействием протонного облучения образовывался искомым радиоизотоп ^{123}I в результате следующей цепочки распада: $^{124}\text{Xe} (p, 2n) ^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$.

2.1. Облучение имитатора мишени

Для проведения первого эксперимента было принято решение расположить имитатор мишени на выводном канале линейного ускорителя И-2, используемого в настоящее время для проведения облучения электронно-компонентной базы. Выбор данного места был обусловлен наличием диагностического оборудования, позволяющего контролировать параметры

пучка. Схема выводных каналов ускорителя И-2 и место расположения имитатора мишени представлена на рис. 1. Мишень была зафиксирована на оптической подставке, установленной на оптическом рельсе (рис. 2). Расстояние от выходного окна ионопровода до торца входного фланца мишени составило 118 мм.



Рис. 1. Схема выводных каналов ускорителя И-2 и место расположения имитатора мишени.

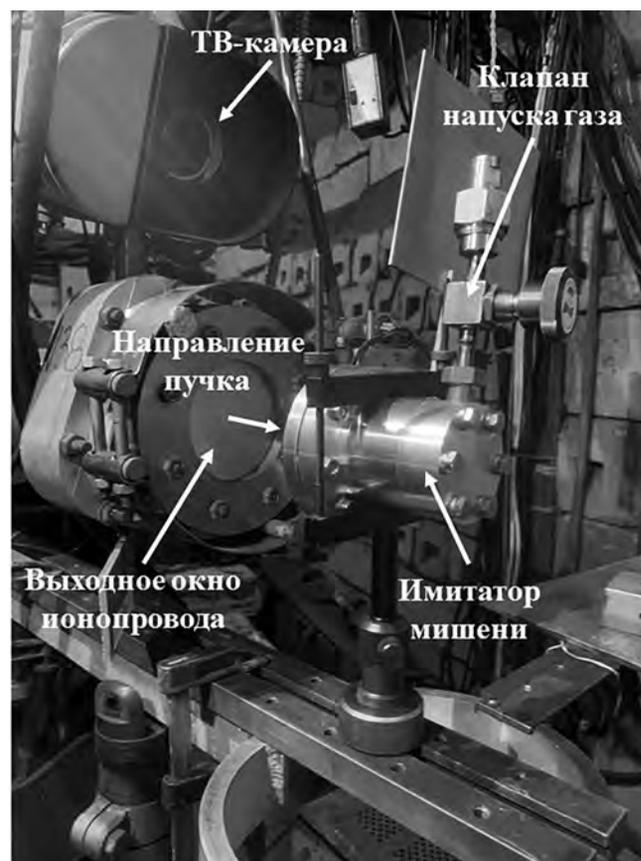


Рис. 2. Место расположения имитатора мишени.

Для контроля положения пучка в процессе облучения мишени на входной фланец мишени был наклеен пластиковый сцинтиллятор с центральным отверстием 17 мм. В процессе облучения свечение сцинтиллятора регистрировалось ТВ-камерой, расположенной под углом 45 гра-

дусов к оси распространения пучка. Также для проведения активационных измерений за входным фланцем мишени были размещены три мониторные фольги (одна медная фольга толщиной 5 мкм и две титановых фольги толщиной 24 мкм каждая). По результатам проведения активационного измерения определялись значения энергии пучка в месте расположения мониторных фольг, а также ток пучка, проходящего через отверстие входного фланца имитатора мишени. Для обеспечения максимально приближенного реального режима облучения мишени внутренний объем имитатора мишени был предварительно наполнен аргоном под давлением 3 атм.

Непосредственно перед проведением облучения имитатора мишени были проведены измерения основных параметров пучка. Для определения геометрических размеров пучка в месте размещения имитатора мишени был установлен сцинтиллятор из керамики. Изображение пучка на сцинтилляторе регистрировалось ТВ-камерой. Полученное изображение приведено на рис. 3.

Для измерения тока пучка использовался цилиндр Фарадея, который также располагался в месте установки имитатора мишени. Ввиду

того, что на цилиндр Фарадея была установлена диафрагма с площадью отверстия 1 см^2 для корректировки положения центра пучка относительно центра отверстия, на входной торцевой диафрагме также был наклеен пластиковый сцинтиллятор с отверстием в центре (рис. 4).

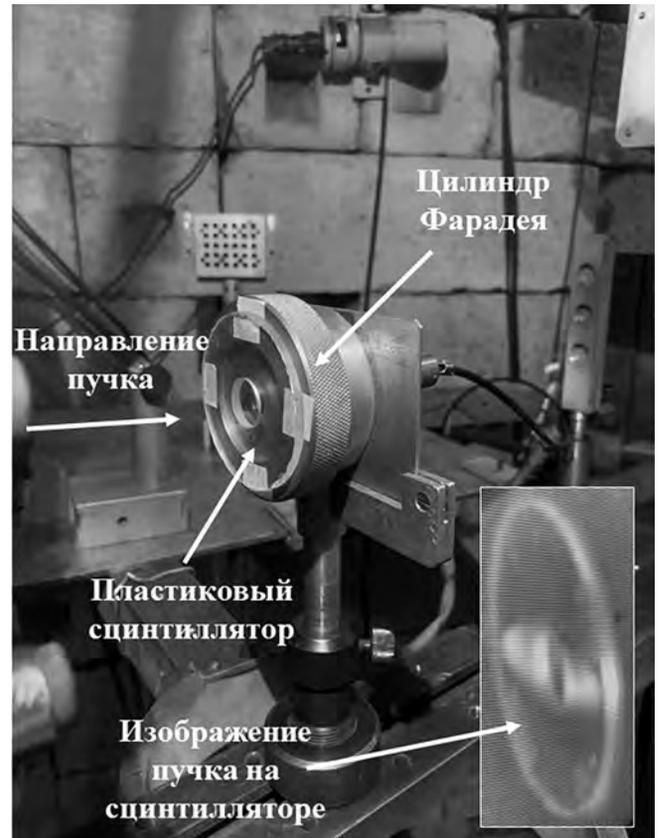


Рис. 4. Место расположения цилиндра Фарадея и изображение пучка на пластиковом сцинтилляторе, зарегистрированное камерой.

Осциллограмма выходного сигнала с цилиндра Фарадея приведена на рис. 5. Плотность потока частиц в импульсе и средний ток пучка определялись путем интегрирования выходного сигнала с цилиндра Фарадея. Из представлен-

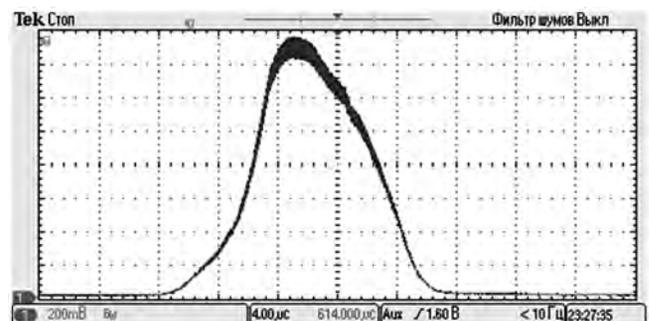


Рис. 5. Осциллограмма выходного сигнала с цилиндра Фарадея.

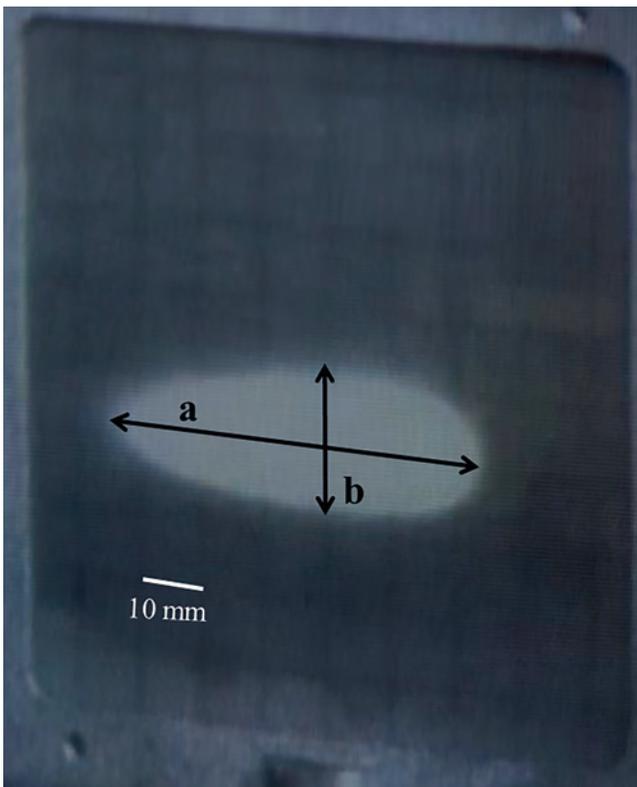


Рис. 3. Изображение пучка на сцинтилляторе из керамики.

ной осциллограммы видно, что длительность импульса пучка составляла порядка 20 мкс (по основанию).

Для получения требуемых для проведения активационных измерений значений было необходимо осуществить облучение имитатора мишени с установленными мониторными фольгами в течение пяти часов. В процессе облучения положение пучка на мишени контролировалось по свечению сцинтиллятора. Активационные измерения облученных мониторных фольг проводились на площадке ККФХТ.

2.2. Облучение мишени с ксеноном

В процессе проведения облучения мишень располагалась в том же месте, что и имитатор мишени. Перед проведением облучения были проведены измерения геометрических размеров пучка (по изображению пучка на сцинтилляторе из керамики), а также тока пучка (по сигналу с цилиндра Фарадея).

На стадии подготовки эксперимента в ККФХТ внутренний объем мишени был предварительно наполнен ксеноном (обогащение ^{124}Xe 99.9%) под давлением 4 атм. Также для проведения активационных измерений за входным фланцем мишени была размещена мониторная фольга из титана толщиной 24 мкм. Аналогичная фольга располагалась внутри газового объема мишени непосредственно перед задней стенкой мишени. По активности монитора на входе определялся поток протонов, попавших в мишенное устройство. Принимая, что поток протонов при прохождении мишенного устройства остается неизменным, по активности монитора на выходе определялась соответствующая энергия протонов после прохождения газового объема.

Для экспериментальной оценки значений активности ^{123}I , получаемой в процессе облучения на ускорителе И-2, было решено провести облучение в течение 1.5 ч. Такой временной интервал обусловлен, с одной стороны, необходимостью наработки достаточной для дальнейших исследований активности изотопа, а с другой стороны, требованием, чтобы активность изотопа не превышала значения минимально значимой активности (МЗА) для ^{123}I , соответствующей значению 10^7 Бк. Активационные измерения облученных фольг, а также процесс выделения радиоизотопа ^{123}I из мишени проводился на следующий день после облучения на площадке ККФХТ.

2.3. Проведение активационных измерений

Измерения проводились с помощью гамма-спектрометра с детектором из сверхчистого германия ORTEC GEM серии 35P4 (США). Мишени во время измерений устанавливались на расстоянии 6 см и 11.5 см над поверхностью детектора. “Мертвое” время не превышало 10%. Энергетическая зависимость эффективности регистрации γ -квантов детектором определялась экспериментально с помощью образцовых спектрометрических гамма-источников из комплекта образцовых источников гамма-излучения.

Измерения были выполнены по реакциям $^{nat}\text{Ti}(p,x)^{48}\text{V}$ и $^{nat}\text{Cu}(p,x)^{62}\text{Zn}$. Активность радиоизотопа ^{48}V в мониторах определялась по пикам полного поглощения γ -квантов: по линии $E_\gamma = 983.5$ кэВ ($K_\gamma = 99.99\%$) и $E_\gamma = 1312$ кэВ ($K_\gamma = 97.49\%$), а активность радиоизотопа ^{62}Zn в мониторах определялась по пикам полного поглощения γ -квантов: по линии $E_\gamma = 548.3$ кэВ ($K_\gamma = 15.3\%$) и $E_\gamma = 596.6$ кэВ ($K_\gamma = 26.0\%$).

2.4. Измерение активности радиоизотопа ^{123}I

Определения активности радиоизотопа ^{123}I , наработанного в мишени, проводилось следующим образом. Мишень подсоединялась к газовому стенду и из него криогенным методом удалялся стартовый изотоп ^{124}Xe . После этого осуществлялось вскрытие мишени с последующим смывом ^{123}I с внутренних поверхностей с помощью ацетона. Из смыва, составившего 8 см^3 , отбиралась микропипеткой аликвота объемом 300 мкл и измерялась в ней активность ^{123}I . Активность ^{123}I определялась по пику полного поглощения по линии $E_\gamma = 159$ кэВ ($K_\gamma = 82.9\%$).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения геометрических размеров пучка (ширина на полувысоте) на входном фланце имитатора мишени и мишени в ходе первого и второго экспериментов соответственно приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры пучка на входном фланце имитатора мишени и мишени

Эксперимент	Значение параметра a , мм	Значение параметра b , мм
Эксп. 1	58.5	21.8
Эксп. 2	62.9	28.8

Из представленных данных следует, что во время облучения мишени настройки магнитной оптики были не оптимальны, что привело к уменьшению числа частиц, проходящих через отверстие во входном фланце мишени по сравнению с первым экспериментом. Это также видно из результатов определения среднего тока пучка, как с помощью цилиндра Фарадея, так и с помощью активационных мониторных фольг (табл. 2).

На основании результатов активационных измерений мониторных фольг из меди и титана, располагавшихся за входным фланцем имитатора мишени в ходе выполнения первого эксперимента, было определено значение энергии протонов на входе в мишень. Полученное значение составило 22.5 ± 0.3 МэВ. Энергия протонов на выходе из ^{124}Xe , определенная по результатам измерения активности выходного монитора, располагавшегося на задней стенке внутреннего объема мишени в процессе второго эксперимента, составила 20.84 МэВ. Таким образом, энергия протонов при прохождении газового объема мишени уменьшилась на 1.16 МэВ (с учетом потерь 0.5 МэВ во входном алюминиевом окне мишени).

Таблица 2. Значения среднего тока пучка, определенные с помощью цилиндра Фарадея и активационных фольг

Эксперимент	Средний ток пучка, мкА/см ² (цилиндр Фарадея)	Средний ток пучка, мкА/см ² (мониторные фольги)
Эксп. 1	0.045	0.043
Эксп. 2	0.034	0.034

Суммарная активность радиоизотопа ^{123}I , выделенная из мишени на момент измерения, составила $3.175 \cdot 10^6$ Бк. Приведенная к моменту времени, когда почти 90% наработанного ^{123}Xe распалось в ^{123}I (6 часов после окончания облучения), активность ^{123}I составила $8.11 \cdot 10^6$ Бк.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных значений активностей радиоизотопа ^{123}I было определено, что в текущей конфигурации (существующая мишень и текущие параметры работы ускорителя) за 24 часа облучения возможно получение активности радиоизотопа ^{123}I на уровне $7.68 \cdot 10^7$ Бк (с учетом распада ^{123}I за время облучения). Такое значение может представлять

интерес только с точки зрения исследовательской работы, но никак не может рассматриваться как клинически значимые активности. Для увеличения выхода целевого радиоизотопа ^{123}I были рассмотрены следующие изменения существующей схемы облучения:

1. Модификация мишени путем увеличения апертуры входного отверстия с сопутствующей оптимизацией настройки магнитной оптики ускорителя с целью формирования поля пучка меньшего размера с сохранением интенсивности.

2. Увеличение длительности пучка с текущих 20 мкс до 60 мкс с сохранением существующей частоты следования импульсов.

Эти два изменения позволят увеличить значение среднего тока пучка на мишени до 0.4 мкА. Замена алюминиевой фольги выходного окна ионопровода толщиной 500 мкм на фольгу толщиной 250 мкм позволит уменьшить потери энергии пучка на 1 МэВ, в результате чего значение энергии протонов на входе в мишень составит 23 МэВ. По проведенным оценкам это может увеличить активность получаемого радиоизотопа ^{123}I в два раза. Таким образом, с учетом описанных изменений сеанс облучения продолжительностью 24 ч позволит получение активности радиоизотопа ^{123}I на уровне 1.3 ГБк.

Дополнительного увеличения получаемой активности можно добиться за счет увеличения толщины мишени (переход к так называемой толстой мишени). Согласно экспериментальным данным, энергия протонов на выходе из ^{124}Xe составляла 20.84 МэВ. Согласно данным, приведенным в рекомендованном МАГАТЭ источнике [1], доля выхода ^{123}Cs (предшественник ^{123}I в используемой цепочке распада) в области от 20.84 МэВ до порога реакции около 7 МэВ в 2.05 раза превышает соответствующий выход в области 22.0–20.84 МэВ (рабочий диапазона энергий протонов в эксперименте). Отсюда следует, что за счет использования толстой мишени выход ^{123}I может быть увеличен по сравнению с результатами, полученными в эксперименте, в 3.05 раза.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен первый эксперимент по облучению мишени, наполненной ксеноном, для оценки возможных активностей радиоизотопа ^{123}I , получаемых при облучении протонами на линейном ускорителе протонов И-2. В процессе исследо-

ваний экспериментально измерены значения энергии пучка на входе в мишень, определены потери энергии пучка в объеме газовой мишени, также проведено измерение значения среднего тока пучка в месте расположения мишени с использованием двух независимы методов. Осуществлено выделение радиоизотопа ^{123}I и определено значение его активности. В рамках дальнейших исследований предложены и рас-

смотрены возможные варианты модернизации установки и мишени с целью увеличения активности получаемого радиоизотопа ^{123}I .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Charged particle cross-section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions. IAEA. Vienna. IAEA-TEC-DOC-1211. ISSN 1011-4289. 2001.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.6

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ
ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРОДУКЦИИ¹

© 2025 г. В. В. Безуглов^а, А. А. Брызгин^а, Л. А. Воронин^а, М. В. Коробейников^а,
С. А. Максимов^а, А. В. Пак^а, В. М. Радченко^а, А. В. Сидоров^а, В. О. Ткаченко^а,
Е. А. Штарклев^{а, *}

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

* e-mail: E.A.Shtarklev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 01.03.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

Рассмотрено устройство и принцип работы промышленных ускорителей электронов серии ИЛУ, производимых в ИЯФ СО РАН, на примере ускорителя ИЛУ-10, рассчитанного на энергию ускоренных электронов 5 МэВ и среднюю мощность пучка до 50 кВт, и ускорителя ИЛУ-14 с энергией электронов до 10 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт. Описаны механизмы взаимодействия электронного пучка с микробиологическими объектами, особенности распределения поглощенной дозы по глубине вещества, а также устройство конвертера электронного пучка в тормозное излучение, использование которого позволяет увеличить массовую толщину обрабатываемой продукции в несколько раз по сравнению с электронной модой. Приведены оценки производительности ускорителей ИЛУ при радиационной стерилизации и электронной пастеризации продукции.

DOI: 10.31857/S0032816225070256

1. УСКОРИТЕЛИ ИЛУ

В последние десятилетия приобрело большое значение внедрение эффективных, экологически чистых и экономичных методов стерилизации медицинской и сельскохозяйственной продукции. Традиционно применяемые для этих целей методы, такие как пар, этилен-оксид, а также изотопные источники (Co-60) не позволяют полностью решить указанные задачи. В связи с этим осуществляется переход на радиационную стерилизацию. Становится актуальной задача пастеризации пищевых продуктов и животноводческих кормов, а также дезинсекции и дезинфекции семян. Импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ, выпускающиеся в ИЯФ СО РАН более 30 лет, оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных ком-

плексов. Их отличительными особенностями являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства. Ускорители ИЛУ перекрывают диапазон энергий ускоренных электронов от 0.6 до 10 МэВ при мощности ускоренного пучка до 100 кВт. В табл. 1 приведены параметры основных моделей промышленных линейных ускорителей электронов ИЛУ.

Рассмотрим устройство и принцип работы ускорителей ИЛУ на примере ускорителя ИЛУ-10 [1]. Его основой является медный тороидальный резонатор с рабочей частотой 116 МГц с конусообразными осевыми выступами, которые образуют ускоряющий зазор длиной 270 мм. Резонатор 2 помещен в вакуумный бак 1 из нержавеющей стали (рис. 1). ВЧ-генераторы 9, собранные по схеме с общей сеткой, работают

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

Таблица 1. Параметры ускорителей ИЛУ разных серий

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-10	ИЛУ-14
Энергия электронов, МэВ	0.6 ÷ 1.0	1.5 ÷ 2.5	2.5 ÷ 5.0	7.0 ÷ 10.0
Средний ток пучка, мА	20	10	10	10
Средняя мощность пучка, кВт	20	25	50	100
Потребляемая мощность, кВт	80	100	150	450
Масса ускорителя, т	0.6	2.2	2.9	4

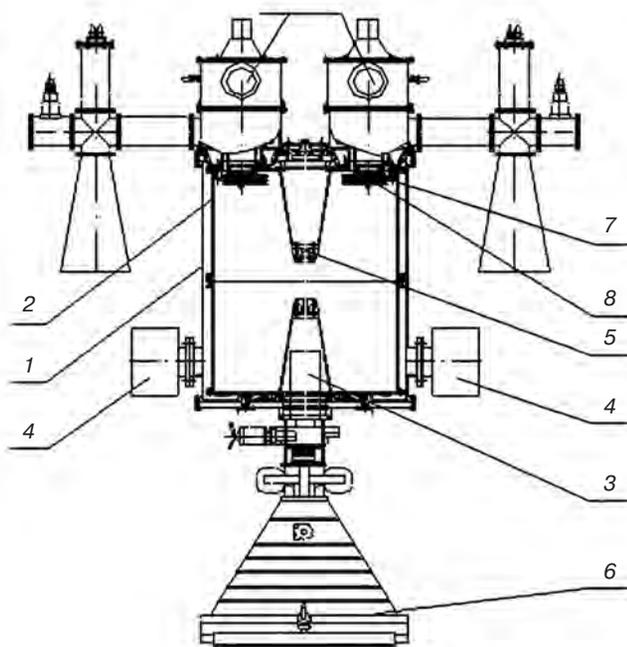


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-10: 1 – вакуумный бак, 2 – медный тороидальный резонатор, 3 – магнитная линза, 4 – магниторазрядные насосы, 5 – катодно-сеточный узел, 6 – устройство выпуска пучка с линейной разверткой, 7 – опора петли связи, 8 – вакуумный конденсатор, 9 – ВЧ-генераторы.

в режиме самовозбуждения на частоте, близкой к собственной частоте резонатора.

Величина связи генератора с резонатором подбирается при предварительной настройке ускорителя изменением емкости вакуумного конденсатора 8 и площади петли связи путем изменения положения опоры 7. На изоляторе, установленном на верхнем электроде, смонтирован катодный узел, образующий с сеткой инжектор электронов 5. Нижний электрод и инжектор образуют триодную ускоряющую систему.

Под нижним электродом резонатора установлена магнитная линза, фокусирующая ускорен-

ный электронный пучок. Попадая в выпускное устройство 6, пучок сканируется на необходимую ширину при помощи электромагнита развертки [2]. Неравномерность выходного дозового поля в пределах $\pm 5\%$ достигается при помощи дополнительного электромагнита для коррекции сканирующего магнитного поля [3].

Последняя разработка ИЯФ СО РАН – ускоритель ИЛУ-14. В отличие от предыдущих моделей этот ускоритель расположен горизонтально и представляет собой модульную структуру, состоящую из пяти полных и двух половинных ускоряющих резонаторов, в которых электронный пучок ускоряется до энергии 10 МэВ. Отдельные модули ускоряющей структуры собираются из узлов, выпускаемых экспериментальным производством института.

Мощный промышленный ускоритель ИЛУ-14, блок-схема которого представлена на рис. 2, содержит ускоряющую структуру, триодную электронную высокочастотную пушку, двухкаскадный автогенератор, фидерную систему, ВЧ-вводы мощности, модуляторы, систему развертки и конвертер тормозного излучения [4].

После ускоряющей структуры электронный пучок попадает в систему выпуска, состоящую из двухкоординатного корректора оси пучка, дублета квадрупольных линз для фокусировки пучка и сканирующего электромагнита. Для коррекции формы сканирующего поля перед сканирующим электромагнитом так же, как и в ускорителе ИЛУ-10, расположен электромагнит коррекции. После сканирования развернутый пучок проходит дополнительную рассеивающую линзу, расположенную на первой половине выпускного устройства, и через выпускное окно раструба выводится в атмосферу. Линза Панофского, расположенная перед выпускным окном, позволяет менять угол вывода электронного пучка в атмосферу.

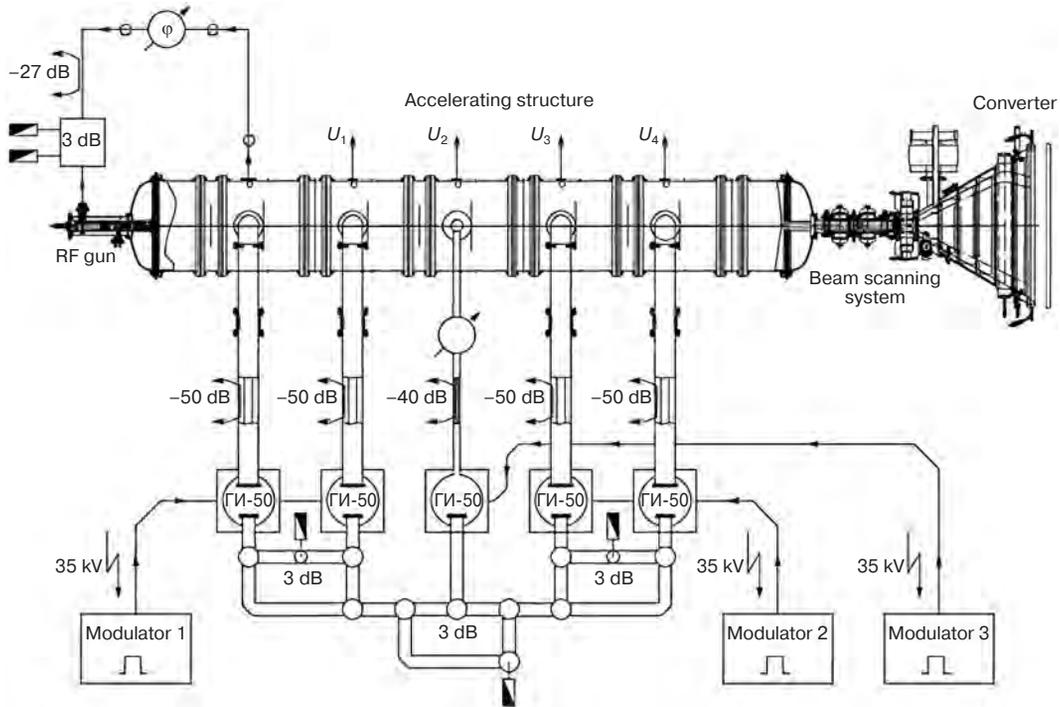


Рис. 2. Блок-схема ускорителя ИЛУ-14.

2. РАДИАЦИОННАЯ СТЕРИЛИЗАЦИЯ ПРОДУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Основные области применения ускорителей ИЛУ на данный момент:

- стерилизация одноразовых медицинских изделий;
- стерилизация биодобавок и растительного лекарственного сырья;
- стерилизация медпрепаратов и их компонентов;
- улучшение изоляции проводов;
- производство термоусаживаемых трубок и пленок.

Принцип радиационной стерилизации базируется на способности электронного пучка разрушать ДНК живых организмов. Для невозможности самовосстановления, молекула ДНК должна быть разрушена в двух местах. При радиационной стерилизации продукции взаимодействие электронного пучка с микробиологическими объектами можно описать двумя процессами:

1) электроны непосредственно ионизируют атомы цепочек ДНК бактерий, необратимо повреждая их и препятствуя их дальнейшему размножению;

2) электроны образуют из молекул воды высокоактивные свободные радикалы H^+ и OH^- , которые также разрушают ДНК бактерий.

При этом вклад первого процесса в итоговый результат составляет 10%, а второго – 90%. Характерные особенности взаимодействия электронов с веществом приводят к тому, что поглощенная доза D на поверхности облучаемого материала не является максимальной, она достигает максимума внутри материала, а затем начинает убывать, и на некотором расстоянии от поверхности материала сравнивается с поверхностной дозой. Данное расстояние принимается за эффективную глубину проникновения электронов в вещество $R_{эф}$. Из этого следует, что при одностороннем облучении продукции и толщине упаковки менее $R_{эф}$ теряется значительная часть мощности пучка, что в свою очередь снижает производительность установки. Для исключения этих потерь на ускорителях обычно используется облучение образцов с двух сторон.

Одной из основных характеристик электронного пучка является его мощность, определяющая производительность работы ускорителя в режиме радиационной стерилизации. Мощность пучка P есть произведение энергии

электронов на средний ток пучка. Производительность установки T при радиационной стерилизации с применением ускорителей электронов вычисляется по следующей формуле: T [кг/ч] = $= 3600 P$ [Вт] · k/D [Гр], где $k = 0.5$ – коэффициент, учитывающий двустороннее облучение. Производительность ускорителей серии ИЛУ при стандартной для радиационной стерилизации дозе облучения 25 кГр достигает нескольких тонн в час.

3. ПАСТЕРИЗАЦИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ С ПОМОЩЬЮ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Одной из перспективных областей применения радиационных технологий в сельском хозяйстве является дезинсекция и дезинфекция семян, а также пастеризация пищевых продуктов и животноводческих кормов. Однако при этом возникает проблема: в ряде случаев может оказаться необходимой обработка продуктов питания со сложной геометрией и большой массовой толщиной (20 г/см² и более), а проникающая способность электронного пучка при максимальной допустимой по нормам МАГАТЭ энергии 10 МэВ сравнительно мала (до 8 г/см² при двустороннем облучении), что ставит ограничения на объем облучаемого материала.

Разумным выходом из данной ситуации является использование для пастеризации пищевых продуктов промышленных ускорителей серии ИЛУ, способных работать как в режиме электронной обработки продукции, так и в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения, обладающего высокой проникающей способностью. Это позволяет перекрывать весь спектр обрабатываемой пищевой продукции, используя для пастеризации наряду с электронами тормозное рентгеновское излучение, генерируемое при конверсии пучка ускоренных электронов. Перевод ускорителя из режима генерации электронного пучка в режим генерации тормозного излучения занимает не более 10 минут.

Специально разработанный конвертер представляет собой тормозную мишень, состоящую из пластины алюминия с каналами для охлаждающей воды, на которую методом сварки взрывом закреплена пластина тантала [5]. Поглощающий электроны слой тантала обращен в вакуум. Его толщина составляет от 0.8 до 1.5 мм, при такой

толщине процент выхода гамма-излучения уже достигает максимального значения, а не конвертированные электроны максимально поглощаются в алюминии. Это улучшает тепловой режим поглощающего слоя и мишени в целом, поскольку приводит к более равномерному распределению тепла в устройстве.

Согласно рекомендации МАГАТЭ, энергия ускорителей электронов не должна превышать 10 МэВ при использовании электронов и 5 МэВ при использовании тормозного излучения (7.5 МэВ в США). Доза тормозного излучения с энергией 7.5 МэВ в геометрии плоского продукта падает почти экспоненциально с длиной поглощения около 20 г/см². Для режима тормозного излучения производительность примерно в 15 раз меньше, чем для электронного из-за эффективности преобразования, углового распределения тормозного пучка, большей доли рассеяния. А вот толщина изделия может быть намного больше. При двустороннем тормозном облучении с энергией 7.5 МэВ массовая толщина продукта при максимальной производительности составляет около двух длин поглощения или 40 г/см² при коэффициенте однородности дозы (DUR) около 1.55. Таким образом, при характерных дозах облучения пищевых продуктов, составляющих единицы кГр, производительность ускорителя при работе в рентген-режиме может достигать нескольких тонн в час.

Обработка пищевых продуктов при помощи ускорителей ИЛУ имеет ряд положительных эффектов: уничтожение болезнетворных микроорганизмов (сальмонелла, е-коли и др.); увеличение времени хранения продукта; уничтожение насекомых; удешевление пастеризации продуктов по сравнению с традиционными методами (например, возможность производства тушенки и консервов в пластиковой упаковке).

При этом важно учесть влияние излучения на свойства продуктов питания. В 1980 г. объединенный комитет экспертов (ФАО, МАГАТЭ и ВОЗ) рассмотрел данные международного проекта по исследованию токсичности облученных пищевых продуктов. Комитет заключил, что при дозе облучения не более 10 кГр они не более вредны, чем обычные пищевые продукты, содержащие в неуловимо малых количествах мутагены. При этом максимальные дозы, необходимые для пастеризации продуктов питания, как правило, составляют единицы килогрэй.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленные ускорители ИЛУ оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов, на которых может производиться как радиационная стерилизация медицинских изделий, биодобавок и лекарственного сырья электронным пучком, так и пастеризация пищевых продуктов при помощи тормозного излучения. ИЯФ СО РАН имеет лицензию на разработку и производство ускорителей. Разработаны технологии стерилизации различных видов продукции. На данный момент в институте идет изготовление ускорителя ИЛУ-14 для облучения рыбы и морепродуктов во Вьетнаме и ускорителя ИЛУ-12 для облучения фруктов и ягод в Узбекистане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Воронин Л.А. и др. // Вестник Радтех – Евразия. 2002. № 1(11). С. 94.
2. Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А. и др. Препринт № 2008-23. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2008.
3. Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Faktorovich B.L. et al. // RuPAC 2012. Contributions to the Proceedings. 23rd Russian Particle Accelerator Conference. Saint-Petersburg. 2012. P. 161.
4. Брызгин А.А., Безуглов В.В., Кокин Е.Н. и др. // ПТЭ. 2011. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.1134/S0020441211030110>
5. Auslender V.L., Bukin A.D., Voronin L.A. et al. // Rad. Phys. Chem. 2004. V. 71. № 1-2. P. 297.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.007>

УДК 533.599

СОВРЕМЕННЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ЦКП СКИФ¹

© 2025 г. А. М. Семенов^{a, b, *}, А. А. Краснов^{a, c}

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

^b *Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

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

* e-mail: A.M.Semenov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2023 г.

В вакуумных системах ускорителей заряженных частиц все чаще применяют комбинированные малогабаритные сверхвысоковакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров и магнито-разрядных насосов в одном корпусе. Данный тип насосов будет применяться в синхротроне 4+ поколения ЦКП СКИФ. В ИЯФ СО РАН был изготовлен и протестирован прототип комбинированного насоса с быстротой откачки водорода 1000 л/с. Представлены конструкция насоса, а также результаты измерений для различных газов.

DOI: 10.31857/S0032816225070263

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Новосибирске идет строительство источника синхротронного излучения (СИ) 4+ поколения ЦКП СКИФ [1] с рекордно малым эмиттансом пучка (75 пм · рад при энергии 3 ГэВ). Одним из условий получения рекордных параметров и проектного времени жизни (более 10 ч) пучка является сверхвысокий динамический вакуум на уровне 10^{-9} торр в накопительном кольце СКИФ. Достижение столь низкого давления остаточных газов в условиях интенсивного синхротронного излучения требует применения мощной системы откачки [2].

Широкое распространение в вакуумных системах ускорителей получили ионно-геттерные магнито-разрядные насосы. Но, к сожалению, увеличение скорости откачки данных насосов сопряжено с увеличением как габаритов, так и массы. Данное обстоятельство не

позволяет достичь требуемых параметров откачивающей системы на основе магнито-разрядных насосов из-за пространственных ограничений на размещение вакуумных элементов в накопителе СКИФ. Существенно меньшими масса-габаритными параметрами обладают геттерные насосы, в которых спеченный геттерный материал в виде пластинок или дисков уложен в картридж, снабженный нагревателем для термической активации геттера. Данные насосы связывают газ за счет хемосорбции, поэтому они не откачивают инертные газы [3], а также насыщенные углеводороды, составляющие в сумме несколько процентов от общего количества молекул газа, десорбирующихся с внутренней поверхности вакуумных систем. Если к геттерному насосу, обладающему большой скоростью откачки, добавить небольшой насос, способный откачивать химически пассивные газы, например магнито-разрядный, то получится универ-

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

сальный комбинированный насос, обладающий малыми габаритами и способный откачивать весь спектр остаточных газов.

Впервые данный тип насоса был разработан и изготовлен фирмой SAES Getters (Италия) [4]. В ИЯФ СО РАН был изготовлен и протестирован прототип комбинированного насоса с быстротой откачки 1000 л/с по водороду и 23 л/с по аргону.

В данной статье представлены результаты измерения скорости откачки комбинированного насоса от количества поглощенного газа для водорода, азота, метана и монооксида углерода, а также измерен предельный вакуум от количества поглощенного аргона.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Активационные и газопоглощающие характеристики прототипа комбинированного насоса измерялись на специализированной экспериментальной установке (рис. 1). Предварительная откачка системы проводилась турбомолекулярной станцией, включающей в себя турбомолекулярный насос (TMP_1) и безмасляный мембранный насос (MP). Высоковакуумная откачка осуществлялась турбомолекулярным насосом

TMP_2 . От напуска воздуха до атмосферного давления со стороны TMP_1 и MP был установлен аварийный электрический клапан VR_3 . Измерение форвакуума и высокого вакуума осуществлялось широкодиапазонным датчиком давления марки PKR 251 фирмы Pfeiffer, состоящим из датчика Pirani и датчика давления с холодным катодом, и расположенным на откачной станции.

Напуск газа в систему выполнялся через игольчатый натекатель VF и капилляр C (молекулярная проводимость по водороду равна $2.8 \cdot 10^{-3}$ л/с). Откачка системы инъекции проводилась турбомолекулярной станцией через вакуумные клапаны VR_4 и VR_5 . Для контроля давления напускаемого газа использовались стрелочный манометр и емкостной датчик давления "Baratron".

Измерение давления в системе выполнялось датчиком давления с горячим катодом IG_1 . Измерение парциальных давлений газов проводилось при помощи квадрупольного масс-спектрометра RGA фирмы SRS (Стэнфорд, США). Датчик давления с горячим катодом IG_2 необходим для контроля давления во время предварительного прогрева и активации геттера.

До проведения экспериментов весь стенд прогревался при температуре 220–240 °С, чтобы уменьшить десорбцию со стенок камеры. Также

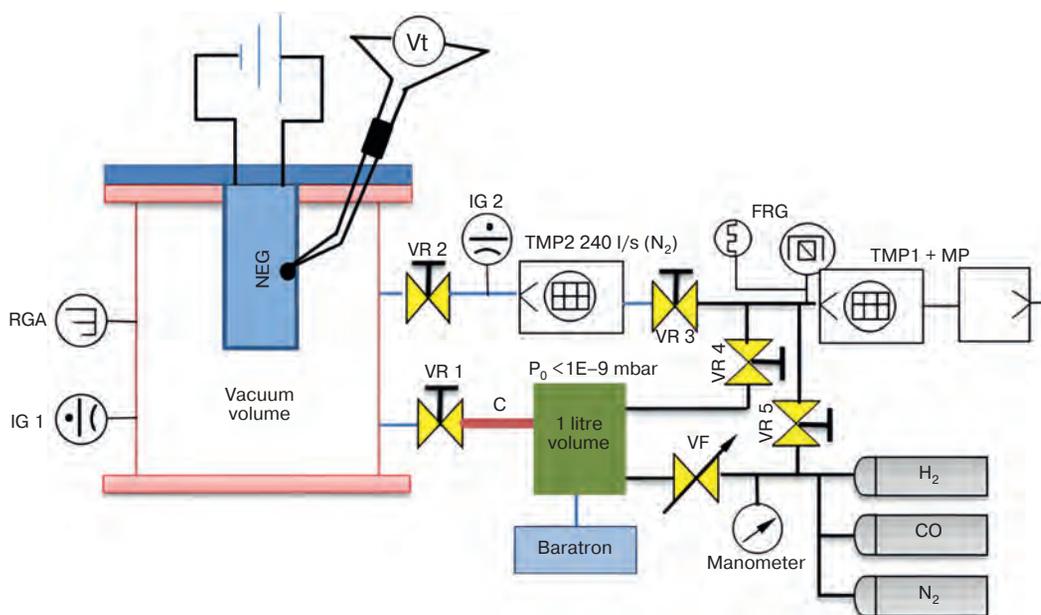


Рис. 1. Стенд для измерения коэффициента термического газовыделения: VR_1 —цельнометаллические угловые клапаны; IG — ионизационный датчик давления с горячим катодом типа Bayard-Albert; FRG — широкодиапазонный датчик давления от 10^{-10} мбар до 1000 мбар; TMP — турбомолекулярный насос; MP — безмасляный форвакуумный (мембранный) насос.

до проведения экспериментов были измерены эффективная быстрота откачки турбомолекулярного насоса TMP_2 , молекулярная проводимость капилляра и коэффициенты чувствительности датчиков давления с горячим катодом по каждому газу (H_2 , CO , Ar). В табл. 1 приведена информация по этим величинам для данных газов. После каждого напуска воздуха до атмосферного давления проводилась калибровка всех измерителей вакуума. В начале экспериментов клапан VR_1 был закрыт. Затем клапан открывался, и инжектируемый газ начинал поступать в тест-камеру через капилляр. Газовый поток в тест-камеру определяется выражением

$$Q_{total} = C(P_{in} - P_{out}), \quad (1)$$

где C [л/с] – канал с калиброванной проводимостью, P_{in} , P_{out} [торр] – давление на входе и выходе капилляра C .

Быстрота откачки геттера S_{NEG} может быть определена в течение напуска газа как:

$$S_{NEG} = \frac{C \cdot (P_{in} - P_{out})}{K \cdot (P_{IG1\ after} - P_{IG1\ before})}, \quad (2)$$

где S_{NEG} [л/с] – скорость откачки NEG насоса; C [л/с] – молекулярная проводимость капиллярного канала; $P_{IG1\ after}$ [торр] – давление после напуска газа датчика давления IG_1 ; $P_{IG1\ before}$ [торр] – давление до напуска газа датчика давления IG_1 ; K – коэффициент чувствительности.

Сорбционная емкость определялась как количество молекул, при поглощении которых быстрота откачки комбинированного насоса не достигает постоянного значения при данном потоке, равном быстроте откачки самого магниторазрядного насоса:

$$Doze = \int_0^t Q_{total} dt, \quad (3)$$

где Q_{total} [л · торр/с] – полный поток газа; t [с] – время измерения.

3. ОПИСАНИЕ ПРОТОТИПА КОМБИНИРОВАННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

В комбинированном насосе применяется магниторазрядный насос триодного типа с ячейкой, так называемой StarCell производства АО “Катод”, быстрота действия которого 40 л/с по азоту. Диаметр анодной ячейки 20 мм. Длина ячейки – 25 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 5 мм, а количество таких ячеек равнялось 33. Полный размер анодного блока: ширина – 120 мм, длина – 80 мм. Величина магнитной индукции – 0.12 Тл. Каждый катод представляет из себя сваренные между собой титановые пластины толщиной 1.5 мм с выдавленными двенадцатью “ребрами” под углом 30° относительно друг друга (рис. 2). Присоединительный фланец Ду 40 типа Conflat.

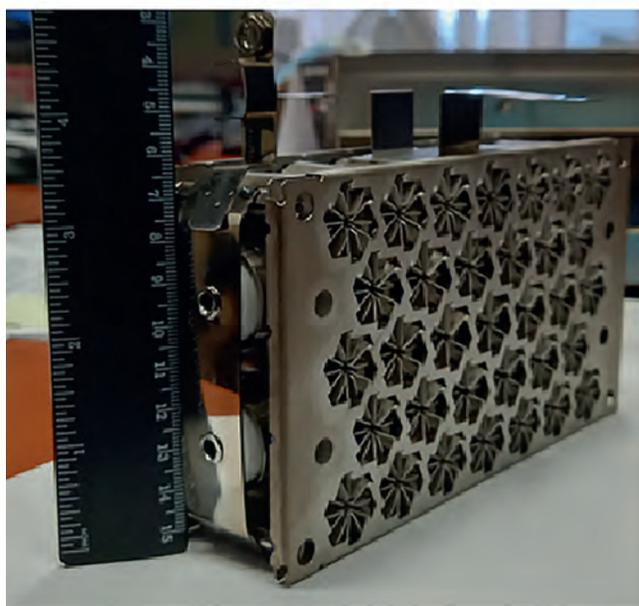


Рис. 2. Электродный блок с катодами в виде “StarCell”.

Таблица 1. Молекулярная проводимость капиллярного канала, эффективная быстрота откачки и коэффициент чувствительности датчиков давления с горячим катодом для разных газов

Газ	Молекулярная проводимость C , л/с	Эффективная быстрота откачки $S_{эфф}$, л/с	Коэффициент чувствительности K_{IG1}	Коэффициент чувствительности K_{IG2}
H_2	$2.8 \cdot 10^{-3}$	28	2.3	2.3
CO	$7.6 \cdot 10^{-4}$	8.4	1	1
Ar	$6.36 \cdot 10^{-4}$	7	0.77	0.74

Как уже не раз сообщалось, фирма АО “Полема” производит нераспыляемые газопоглотители в больших количествах для атомной энергетики и нефтегазовой промышленности [5]. Первые вакуумные насосы на базе геттеров Ti-Zr-Al производства фирмы АО “Полема” были изготовлены из таблеток следующих размеров: диаметром 13 ± 0.5 мм, толщиной 3 ± 0.5 мм и пористостью 60%. Более подробно с результатами можно ознакомиться в [6, 7].

Насос изготовлен из геттерных дисков. Внешний диаметр каждого диска 25 мм, толщина 1.6 мм, пористость 30%, внутренний диаметр 8 мм для размещения нагревателя. Химический состав нераспыляемого газопоглотителя Ti-Zr-Al. 30 дисков последовательно установлено в ряд с зазором 1.5 мм в каждой “колонне”. Суммарная площадь составляет 1600 см^2 , а вес геттера – 360 г. Количество “колонн” равняется шести. Высота (от фланца до торца геттерного насоса) не превышает 130 мм. Температура контролируется термопарой типа “К”. Для снижения мощности нагревателя в два раза используется один защитный экран снаружи. Геттерный насос располагается на фланцевом соединении типа Conflat Ду 100. 3D-изображение комбинированного насоса представлено на рис. 3. Изучение газопоглощающих и активационных параметров геттерной составляющей комбинированного насоса было успешно выполнено ранее и представлено в работах [8, 9].

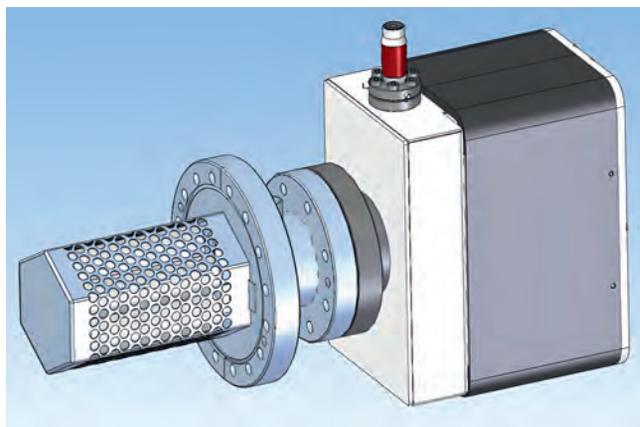


Рис. 3. 3D-изображение комбинированного насоса.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

До начала измерений весь стенд прогревался при температуре $230 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 ч для уменьшения фонового давления. После охлаждения до комнатной температуры геттер активировался при максимальной температуре ($650 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение 1 ч.

Измерения скорости откачки по различным газам выполнялись после активации геттера при температуре $650 \text{ }^\circ\text{C}$ и при охлаждении геттерного насоса до комнатной температуры. Измерения сорбционной емкости для каждого газа представлены на рис. 4. Результаты хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями свойств геттерных насосов [8].

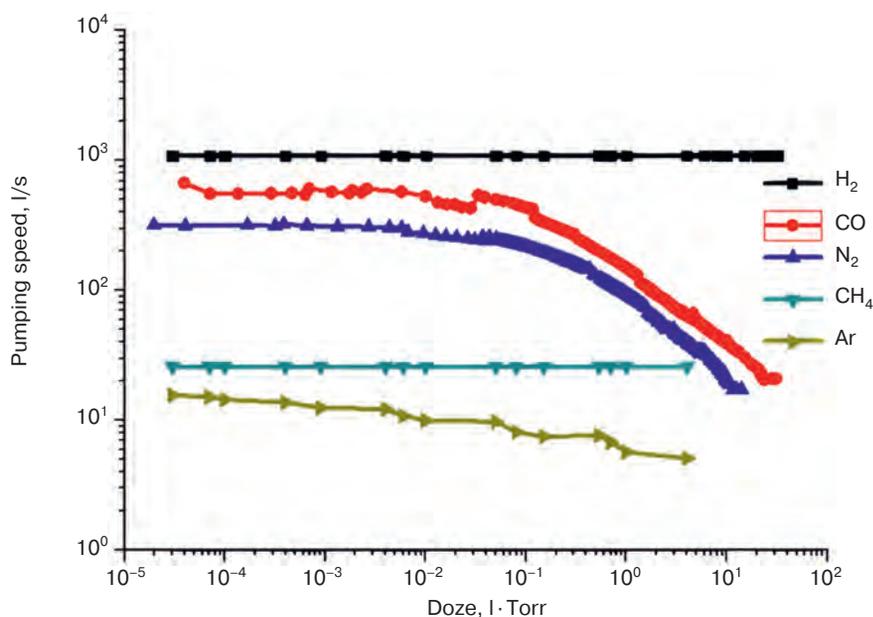


Рис. 4. Сорбционная емкость комбинированного насоса для различных газов.

Появление микротечей, которые сложно или невозможно устранить без напуска воздуха до атмосферного давления, представляет собой довольно распространенное явление в сложных электровакуумных установках. Поэтому способность откачивать хотя и небольшие, на уровне менее 10^{-7} л · торр/с, но непрерывно поступающие потоки молекул воздуха, сохраняя необходимый уровень вакуума, является важной характеристикой откачивающей системы. При этом наибольшую опасность для комбинированного насоса представляет аргон, который откачивается только маломощной магниторазрядной частью. Очевидно, накопление аргона в магниторазрядных ячейках должно привести к увеличению предельного давления по аргону, что может повлиять на “вакуумное” время жизни пучка уже при давлении аргона порядка 10^{-10} торр, поскольку сечение рассеяния реля-

тивистских электронов пропорционально квадрату заряда ядра. Именно это обстоятельство определило выбор магниторазрядной ячейки триодного типа StarCell, обладающей наибольшей быстротой откачки и сорбционной емкостью по инертным газам.

На рис. 5 показано измеренное равновесное давление аргона в зависимости от поглощенного количества аргона. Можно заметить, что давление аргона находится на приемлемом уровне вплоть до поглощенной дозы порядка 1 л · торр. Такую дозу аргона возможно набрать при непрерывном натекании атмосферного воздуха через течь уровня 10^{-7} л · торр в течение 30 лет.

В табл. 2 представлены результаты измерения параметров комбинированного насоса производства ИЯФ СО РАН и параметры комбинированного насоса NEXToorr D1000-StarCell фирмы SAES Getters [4].

Таблица 2. Экспериментальные результаты для комбинированного насоса производства ИЯФ СО РАН и параметры насоса NEXToorr D1000-StarCell фирмы SAES Getters

Насос	Мах скорость откачки по H ₂ , л/с	Мах скорость откачки по CO, л/с	Сорбционная емкость по CO, л · торр*	Мах скорость откачки по CH ₄ , л/с	Мах скорость откачки по N ₂ , л/с	Сорбционная емкость по N ₂ , л · торр*
ИЯФ СО РАН	1000	650	20	26	320	10
NEXToorr D1000-StarCell	1000	580	6	30	320	2.5

* Сорбционная емкость достигается, когда быстрота откачки равняется скорости откачки магниторазрядного насоса.

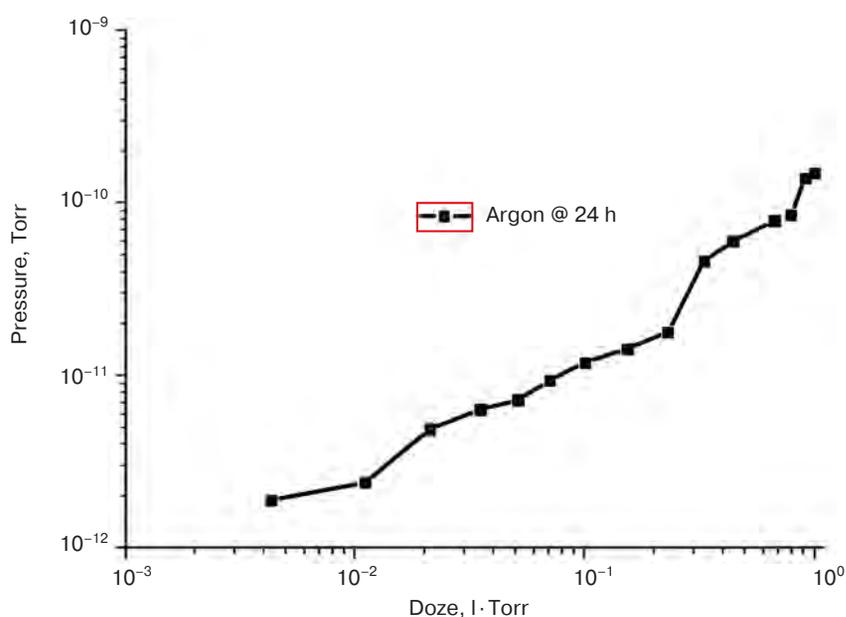


Рис. 5. Равновесное давление в системе от количества поглощенного аргона.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструкция комбинированного насоса, объединяющего в себе магнитоэлектрический насос и высоковакуумный насос на базе нераспыляемого геттера.

2. Измерены быстрота откачки и сорбционная емкость комбинированного насоса для таких газов как водород, монооксид углерода, метан, азот, аргон.

3. Получена зависимость равновесного давления аргона от поглощенного количества аргона.

4. Данные насосы будут установлены в инжекционной части и накопителе ЦКП СКИФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЦКП СКИФ.
<https://srf-skif.ru/>
2. Анашин В.В., Гусев Г.А., Жуков А.А., Краснов А.А., Кузьминых В.С., Пиминов П.А., Семенов А.М. // Вакуумная наука и техника: Материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Москва: Электровакуумные технологии, 2022. С. 163.
3. Manini P., Maccallini P. // Proceedings of the 2017 CERN-Accelerator-School course on a Vacuum for Particle Accelerators. Glumslöv, 2017. P. 137.
4. Официальный сайт фирмы SAES Getters.
https://www.saesgetters.com/wp-content/uploads/sites/5/2024/02/NEXTorr_D1000_StarCell_2024-1.pdf
5. <http://www.polema.net/oblasti-primenenija.html>
6. Драничников А.Н., Краснов А.А., Семенов А.М. // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 73.
7. Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 109.
8. Краснов А.А., Семенов А.М. // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 5. С. 646.
9. Краснов А.А., Семенов А.М. // Вакуумная наука и техника: материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Москва: Электровакуумные технологии, 2022. С. 63.