

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ LU_2 ДЛЯ
СИНХРОТРОННОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА¹

© 2024 г. Т. В. Кулевой^{a,c,*}, Н. В. Завьялов^d, Г. Н. Кропачев^{a,b},
А. Л. Ситников^a, В. С. Скачков^a, В. Г. Кузьмичев^a, Д. А. Лякин^a,
С. В. Барабин^a, А. И. Семенников^a, Д. Н. Селезнев^a, В. К. Семячкин^a,
В. С. Столбунов^a, А. Ю. Орлов^a, Р. П. Куйбида^a, А. В. Козлов^a,
Ю. Б. Стасевич^a, В. И. Николаев^a, А. И. Марченков^a, Н. М. Кристи^a,
А. В. Шумшуров^a, Ю. А. Сатов^a, А. Н. Балабаев^a, А. А. Васильев^a,
А. А. Лосев^{a,c}, И. А. Хрисанов^a, С. В. Виноградов^a, Е. Р. Хабибуллина^{a,c},
И. В. Кильметова^a, А. А. Малышев^{a,c}, М. С. Саратовских^a, А. С. Борисков^d,
М. А. Гузов^d, Л. Е. Поляков^d, М. И. Макарова^d, Д. С. Труфанов^d,
И. А. Машин^d, А. В. Машагин^d, М. Л. Сметанин^d, А. В. Тельнов^d,
А. М. Опекунов^d, М. В. Смирнов^e, П. А. Соколов^e, Н. М. Сереброва^e

^aНациональный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25

^bОбъединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^cНациональный исследовательский ядерный университет "МИФИ",

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

^dВсероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
(ВНИИЭФ)

Россия, 607188, Саров, Нижегородская обл., пр. Мира, 37

*e-mail: kulevoy@itep.ru

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

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

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

Последоработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на базе Российского федерального ядерного центра Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) разрабатывается проект комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства, основой которого является синхротронный ускоритель, обеспечивающий ускорение протонов и различных типов ионов вплоть до 209Bi . В НИЦ "Курчатовский институт" - ККТЭФ разрабатывается ускоритель тяжелых ионов (отношение массы к заряду находится в пределах 4–8) импульсного типа на энергию до 4 МэВ на нуклон с током 10 мА. Ускоритель состоит из лазерного источника ионов, секции RFQ [1] и двух секций DTL, работающих на кратных частотах. В состав ускорителя также входят каналы транспортировки пучка на различных энергиях и канал вывода пучка для инжекции его в бустер.

Ускоритель для экспериментальных работ на ионных пучках состоит из основного синхротрона (ОС), бустера и двух линейных ускорителей-инжекторов [2, 3]. Один из линейных ускорителей (ЛУ_1) предназначен для предварительного ускорения пучков легких ионов от протонов до кислорода. Второй, ЛУ_2 , предназначен для ускорения тяжелых ионов от натрия до висмута. Структура ускорителя ЛУ_2 представлена на рис.1 [4]. Параметры ускорителя даны в табл.1.

Рис. 1. Структура линейного ускорителя ЛУ_2 .

В качестве источника ионного пучка предполагается изготовить аналог лазерного источника ионов ЛИИ100, успешно работающего в ККТЭФ на протяжении многих лет [5, 6].

Выбор источника обусловлен как необходимостью обеспечить импульсную генерацию высокозарядных ионов большой интенсивности, так и необходимостью оперативно производить замену генерируемого пучка по требованию экспериментаторов.

Таблица 1. Параметры ускорителя ЛУ₂

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

На начальном этапе ускорение и группировка пучка осуществляется в резонаторе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) со смещенными окнами [5]. Дальнейшее ускорение осуществляется ускоряющими структурами на основе резонаторов с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂. DTL₁ – это цепочка из двенадцати 2-зазорных четвертьволновых резонаторов с квадрупольными электромагнитными линзами между резонаторами. DTL₂ – цепочка из двадцати восьми 5-зазорных ИН-резонаторов (ИН – interdigital Н-резонаторы) с такими же квадрупольными линзами для фокусировки пучка. Согласование параметров пучка между отдельными его элементами обеспечивается соответствующими транспортными каналами (ЛЕВТ, МЕВТ₁ и МЕВТ₂). Вывод пучка и его транспортировка до канала ввода пучка в бустер осуществляется в транспортном канале НЕВТ, где предусмотрено место для установки дипольного магнита для ввода в канал пучка легких ионов от ускорителя ЛУ₁. На данный момент разработан технический проект ускорителя ЛУ₂, выполнены работы по созданию рабочей конструкторской документации на изготовление всех его составных частей. В статье приводятся основные параметры ускорителя тяжелых ионов ЛУ₂.

2. СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЯ

2.1. Лазерно-плазменный источник ионов на основе импульсно-периодического CO_2 -лазера

Поскольку для проведения экспериментов по изучению радиационной стойкости электронной компонентной базы требуются пучки широкого спектра ионов, смена которых должна осуществляться в кратчайшее время, в качестве источника таких пучков практически нет альтернативы лазерно-плазменному источнику ионов. В ККТЭФ на протяжении многих лет для генерации пучков тяжелых ионов используется источник ЛИИ100. В ходе проектных работ подготовлена конструкторская документация на изготовление аналога с учетом тех модернизаций, которые были осуществлены на действующем источнике за последние двадцать лет и которые позволяют обеспечить генерацию пучка требуемых ионов с заданной интенсивностью. На рис. 2 представлен результат исследования пучка ионов свинца с помощью электростатического анализатора. Показана возможность генерации ионов Pb^{28+} при наличии зарядовых состояний вплоть до Pb^{31+} . При этом обеспечивается необходимая для экспериментальных работ интенсивность пучка ионов в требуемом зарядовом состоянии. Стоит отметить, что это уникальные рекордные значения для источника данного типа. Информация об экспериментальных работах, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик источника, представлено в работе [8].

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

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

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

Анализ зависимости длины ускоряющей структуры от частоты ускоряющего поля привел к выбору рабочей частоты RFQ–40.625 МГц. Разработанный канал позволяет полностью удовлетворить указанным выше требованиям. Результат моделирования динамики пучка в канале представлен на рис. 3 [3].

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

Резонатор реализован в виде структуры со смещенными окнами связи, позволяющей облегчить его настройку особенно при большом продольном размере [9, 12]. Основные параметры ускоряющего канала, а также электродинамические характеристики резонатора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры ускоряющей структуры RFQ

Наименование показателей	Величина
Режим работы	Импульсный
Ускоряемые ионы A/Z	8
Ток инжекции, мА	10
Рабочая частота, МГц	40.625
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов	1.8 Кр
Энергия инжекции пучка, МэВ/н	0.00875
Энергия экстракции пучка, МэВ/н	0.6
Длина электродов, м	10.998
Средний радиус апертуры канала, мм	12.5
Внутренний диаметр секции ускорителя RFQ, мм	1065
Длина окна связи, мм	740
Высота окна связи, мм	351
Ширина основания электрода, мм	158
Собственная добротность структуры	≈13000
Длина ускоряющей структуры, м	≈11.16
Суммарная мощность ВЧ-потерь, кВт	≈500

2. 3. Ускоряющие структуры на четвертьволновых резонаторах с трубками дрейфа (DTL₁) и на малозазорных резонаторах с трубками дрейфа (DTL₂)

Для последующего ускорения используется цепочка из двенадцати 2-зазорных четвертьволновых резонаторов на удвоенной частоте 81.25 МГц [12]. Для фокусировки используются электромагнитные квадрупольные линзы, размещаемые между резонаторами (рис. 4). Цепочка резонаторов позволяет обеспечить ускорение без потерь всего пучка [3]. Геометрические размеры кожуха резонатора одинаковы для всех двенадцати резонаторов. Различия только в длинах трубок дрейфа и ускоряющих зазоров от резонатора к резонатору.

Основные параметры DTL₁ и DTL₂ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные параметры DTL₁ и DTL₂

Наименование показателей	DTL ₁	DTL ₂
Частота ускоряющего поля, МГц	81.25	162.5
Энергия пучка, МэВ/н	0.6–1.25	1.25–4
Число периодов фокусировки	12	28
Максимальная напряженность поля на поверхности трубок дрейфа	1.8 Кр	
Радиус апертуры канала в резонаторах/линзах, мм	21/22.5	25/22.5
Длина апертурного канала, м	4.896	15.556
Равновесная фаза в резонаторах, град	-50 ÷ -40	-50 ÷ -40
Максимальный градиент фокусирующего поля, Тл/м	41	45.5
Длина резонатора, мм	208	280–442
Собственная добротность	≈9600	≈7000–10800
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	≈60	≈150–200

Также, как и в DTL₁, весь пучок захватывается и ускоряется в канале DTL₂ [3], который состоит из двадцати восьми 5-зазорных ИИ-резонаторов (рис. 4, [11, 14]) с теми же квадрупольными линзами как и в DTL₁.

Рис. 4. а – Два четвертьволновых резонатора DTL₁ с квадрупольной линзой между ними [13], **б**– конструкция 5-зазорного резонатора DTL₁ [14]

2. 4. Низкоэнергетический канал транспортировки пучка (LEBT)

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

Рис. 5. Конструкция низкоэнергетического канала LEBT.

Поскольку для обеспечения требуемой интенсивности при заданной длительности импульса для разных веществ требуются различные длины участка разлета плазмы в ионном источнике, то, как было сказано выше, предусмотрены две мишенные камеры и, как следствие, разработаны два плеча LEBT, которые доставляют пучки от обеих мишенных камер ко входу в RFQ по мере необходимости. В состав канала входят два дипольных магнита для сепарации пучка и один дипольный магнит для собирания пучка на ось RFQ. На выходе источника пучок аксиально симметричен и для его фокусировки можно использовать

магнитный соленоид. После поворота симметричность нарушается и для фокусировки пучка на участке между поворотным и объединяющим магнитами используются магнитные квадрупольные линзы. В канале удастся отсечь большую часть паразитных ионов. До входа в RFQ доходит пучок ионов амплитудой не менее 5 мА. При этом рост эмиттанса не превышает 1.3. В канале располагаются несколько диагностических камер, которые снабжены измерителями профиля пучка, его интенсивности и положения центра масс.

2. 5. Канал транспортировки пучка на промежуточную энергию (МЕВТ₁ и МЕВТ₂)

Канал согласования пучка между RFQ и DTL₁ обеспечивает шестимерное согласование пучка для последующего захвата ускоренного в RFQ пучка в режим ускорения в DTL₁ [3]. Требуется шестимерное согласование, так как рабочая частота DTL₁ в два раза превышает рабочую частоту RFQ. Для согласования по поперечному движению используются четыре квадрупольные линзы, для согласования по продольному движению два группирователя, работающие на частоте 81.25 МГц. В канале устанавливается диагностическая камера для измерения профиля пучка, положения его центра масс и интенсивности. Основные параметры канала приведены ниже: рабочая частота 81.25 МГц; длина 1745 мм; четыре квадрупольные магнитные линзы с радиусом по пучку 22.5 мм, длиной 130 мм, областью магнитного поля 200 мм; градиенты линз: -39.1, 40.4, -38.3, 31.8 Тл/м (максимально допустимый градиент 48 Тл/м); два 2-зазорных банчера, каждый длиной 170 мм и радиусом апертуры 20 мм; максимальное поле в зазоре первого банчера 22 кВ/см, второго 50 кВ/см ($E_{smax} < 1.8 Kp$).

Канал МЕВТ₂ обеспечивает шестимерное согласование ионного пучка, ускоренного в DTL₁, со входом DTL₂ (рис. 6). Принцип его построения аналогичен МЕВТ₁. Основные параметры: рабочая частота 162.5 МГц; длина 2150 мм; четыре квадрупольные магнитные линзы с радиусом по пучку 22.5 мм, длиной 130 мм, областью магнитного поля 200 мм; градиенты линз: -28.3, 38.6, -38.5, 28.3 Тл/м (максимально допустимый градиент 48 Тл/м); два 2-зазорных банчера, каждый длиной 254 мм и радиусом апертуры 20 мм; максимальное поле в зазоре первого банчера 70 кВ/см, второго 96 кВ/см ($E_{smax} < 1.8 Kp$).

Рис. 6. Схема каналов МЕВТ₁ и МЕВТ₂.

2.6. Высокоэнергетический канал транспортировки пучка (НЕВТ)

Высокоэнергетический канал транспортировки пучка НЕВТ призван обеспечить доводку ускоренного пучка до перезарядной мишени. В конструкции канала учтено расположение защитных стенок, отделяющих зал кольцевого ускорителя бустера от зала линейного ускорителя, а также предусмотрено место для установки дипольного магнита для вывода к

той же перезарядной мишени пучка, ускоренного в ЛУ₁ (рис. 7) [16]. Канал разбит на три логических участка. Начальная часть содержит четыре квадрупольные линзы, позволяющие сформировать параметры пучка, необходимые для его дальнейшей транспортировки. Затем идет регулярная часть канала, которая состоит из нескольких идентичных участков. На входе и выходе этих участков параметры пучка абсолютно идентичны. И, наконец, конечная часть канала содержит триплет квадрупольных линз, позволяющий сформировать практически любой профиль пучка на перезарядной мишени. В составе канала предусмотрены три диагностические камеры, обеспечивающие контроль за интенсивностью пучка и его профилем.

Рис. 7. Высокоэнергетический канал транспортировки пучка НЕВТ.

Схема подачи ВЧ-мощности в ускоряющие структуры представлена на рис. 8 [20]. Система построена на базе твердотельных усилителей производства компании Триада-ТВ на частотах 40.625, 81.25 и 162.5 МГц и состоит из набора стоек с выходной мощностью от 190 до 240 кВт. К данному моменту созданы и проходят испытания два блока на частотах 40.625 и 81.25 МГц мощностью 200 кВт каждый. Разработан, изготовлен и успешно прошел испытания пилотный образец ввода мощности для всех резонаторов ЛУ₂, а также рефлектометр. Также разработана конструкция плунжера, изготовлен и протестирован ввод движения в вакуум для плунжера.

Рис. 8. Схема питания ВЧ-ускорителя ЛУ₂

2. 7. Магнитные элементы

Для ускорителя ЛУ₂ разработано семейство магнитных элементов, а именно: соленоид ЛЕВТ (2 шт); отклоняющий диполь ЛЕВТ (2 шт) [17] собирающий магнит ЛЕВТ (1 шт); квадрупольные линзы для ЛЕВТ (9 шт), DTL (40 шт), МЕВТ (8 шт) и НЕВТ (12 шт). Особое внимание было уделено разработке макета квадрупольной линзы для каналов DTL₁ и DTL₂, так как в этих каналах сильно ограничение по продольному размеру, а также была поставлена задача разработать импульсную линзу с возможностью работы без водяного охлаждения [18]. Прототип такой линзы был разработан совместно со специалистами НИИЭФА им. Ефремова, где он и был изготовлен (рис. 9). Импульсный блок питания для линзы разработан в НИИЭФА-ЭНЕРГО. Предварительные результаты позволяют утверждать, что требуемый градиент магнитного поля линза обеспечивает. Сейчас готовятся ресурсные испытания, которые позволят сделать вывод о тепловой стабильности конструкции.

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

2. 8. Система диагностики пучка

Система диагностики пучка ускорителя ЛУ₂ включает стандартные элементы – цилиндр Фарадея (ЦФ), индукционный датчик (ИД), профилометр (П), датчик положения пучка (ВРМ). Для настройки и аттестации пучка будет использован также пеппер-пот измеритель эмиттанса (Э), разработанный и успешно использованный для аттестации нескольких источников разного типа в разных лабораториях [20]. Измеритель не будет устанавливаться стационарно на канале. Он будет задействован в работах по настройке канала, а затем будет установлен на тестовом стенде ионного источника.

2. 9. Вакуумная система

Для разработки вакуумной системы ускорителя ЛУ₂ использовалась программа MolFlow+. Вакуумная система в структурах IS, LEVT, RFQ, MEVT, DTL должна обеспечивать получение рабочего вакуума не хуже $1.0 \cdot 10^{-7}$ мбар, а вакуумная система канала вывода пучка НЕВТ должна обеспечивать получение рабочего вакуума не хуже $1.0 \cdot 10^{-9}$ мбар. В результате выполненных работ подготовлены рабочие схемы вакуумной системы всей установки, составлены списки покупных стандартных изделий [21].

2. 10. Система управления установки

Система предполагает широкое использование распределенных контроллеров с максимально унифицированной архитектурой и периферийным оснащением. Практически все процессы, требующие быстрого действия, протекают на уровне распределенных контроллеров. Времена отклика системы управления на верхнем уровне соизмеримо с человеческой реакцией. Предполагается повсеместное использование стандарта Ethernet для интеграции компонентов системы в единое целое. Гигабитный Ethernet и архитектура системы позволяют системе диагностики собирать и отображать в том числе и огибающие импульсов интересующих оператора процессов. Узлами верхнего уровня системы управления являются компьютеры в стоечном или настольном исполнении под управлением ОС Windows. Предполагается возможность “горячей” замены компьютеров при необходимости. Технологические системы относительно медленны, при этом максимально полно используются стандартные или массово выпускаемые изделия, такие как насосы, вакуумметры, расходомеры и пр. Такое положение дел позволяет применять промышленные контроллеры широкой номенклатуры [22].

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

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капчинский И.М.* // Теория линейных резонансных ускорителей. Москва: Энергоиздат, 1982.
2. *Завьялов Н.В.* // УФН. 2022. Т. 192. С. 547.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.12.038933>
3. *Будников Д. В., Воронцов С. В., Глушков С. Л., Гордеев В. С., Гречушкин В. Б.* // ВАНТ Серия: физика ядерных реакторов. 2021. № 4. С. 5.
https://doi.org/10.53403/02054671_2021_4_05
4. *Кропачев Г.Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Завьялов Н. В.* // Сибирский физический журнал (поступила в редакцию).
5. *Alexeev N.N., Alekseev P.N., Andreev V.A., Balabaev A.N., Nikolaev V.I. et al* // Proceedings of IPAC2011. San Sebastián. Spain. WEPC075. P. 2193.
<https://jacow.org/IPAC2011/papers/WEPC075.pdf>
6. *Kulevoy T. V., Balabaev A. N., Khrisanov I. A., Losev A. A., Roerich V. K., Satov Yu. A., Shumshurov A. V., Vasilyev A. A.* // Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC'21. Alushta. Russia. 2021. P. 327.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB48>
7. *Andreev V.A., Parisi G.* // Proceedings of EPAC'94. London. 1994. P. 1300.
8. *А. Н. Балабаев, Хрисанов И.А., Кулевой Т.В., Лосев А. А., Сатов Ю. А., Шумищуров А. В.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2024. (поступила в редакцию).
9. *Ситников А.Л., Кулевой Т.В., Семенников А.И., Селезнев Д.Н.* // Сибирский физический журнал (поступила в редакцию).

10. Семенников А.И., Ситников А.Л., Кулевой Т.В., Селезнев Д.Н. // ПТЭ “RuPAC’23”.
11. Ситников А.Л., Кулевой Т.В., Семенников А.И., Селезнев Д.Н. // Сибирский физический журнал (поступила в редакцию).
12. Семенников А.И., Ситников А.Л., Кулевой Т.В., Селезнев Д.Н. // ПТЭ “RuPAC’23”.
13. Ситников А.Л., Кулевой Т.В., Семенников А.И., Селезнев Д.Н. // Сибирский физический журнал (поступила в редакцию).
14. Семенников А.И., Ситников А.Л., Кулевой Т.В., Селезнев Д.Н. // ПТЭ “RuPAC’23”
15. Хабибуллина Е.Р., Кропачев Г.Н., Кулевой Т. В., Скачков В. С., Сергеева О.С.// Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14. №5. С. 504.
<https://doi.org/10.56304/S2079562922050219>
16. Хабибуллина Е. Р., Николаев В. И., Большаков А.Е., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Скачков В. С. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13. №4. С. 367.
<https://doi.org/10.56304/S2079562922030204>
17. Kuzmichev V. G., Kulevoy T. V., Seleznev D. N., Liakin D. A., Sitnikov A. L. // 12th Int. Particle Acc. Conf. 2021. P. 4417.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB319>
18. Скачков В.С., Кильметова И. В., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Семенников А.И. // ПТЭ “RuPAC’23”.
19. Skachkov V. S., Kozlov A. V., Kropachev G.N. Kulevoy T. V., Liakin D. A., Sergeeva O. S., Stasevich Yu. B. // 12th Int. Particle Acc. Conf. 2021. P. 4359.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB286>
20. Barabin S., Kozlov A., Kulevoy T., Liakin D., Lukashin A., Selesnev D. // Proceedings of 26th Russian Particle Accelerator Conference RUPAC’18 2018. P. 443.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-THPSC18>
21. Марченков А.И., Кулевой Т. В., Машин И. // Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”. 2023. С. 50.
22. Лякин Д.А. // Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”. 2023. С. 167.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структура линейного ускорителя ЛУ₂.

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

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

Рис. 4. а – Два четвертьволновых резонатора DTL₁ с квадрупольной линзой между ними [13], **б**– конструкция 5-зазорного резонатора DTL₁ [14].

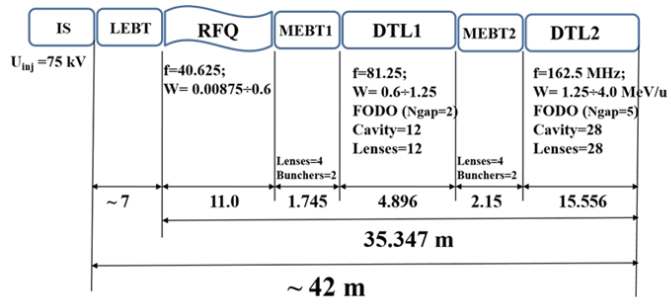
Рис. 5. Конструкция низкоэнергетического канала LEBT.

Рис. 6. Схема каналов МEBT₁ и МEBT₂.

Рис. 7. Высокоэнергетический канал транспортировки пучка НЕBT.

Рис. 8. Схема питания ВЧ-ускорителя ЛУ₂.

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



(a)



(б)

Рис.1

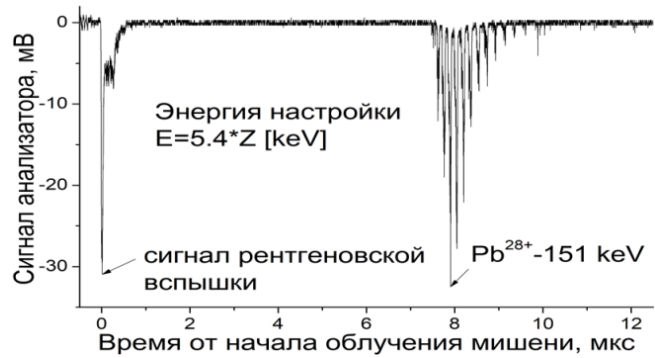


Рис. 2

Ele: 246 [11.0201 m] NGOOD : 99980 / 100000

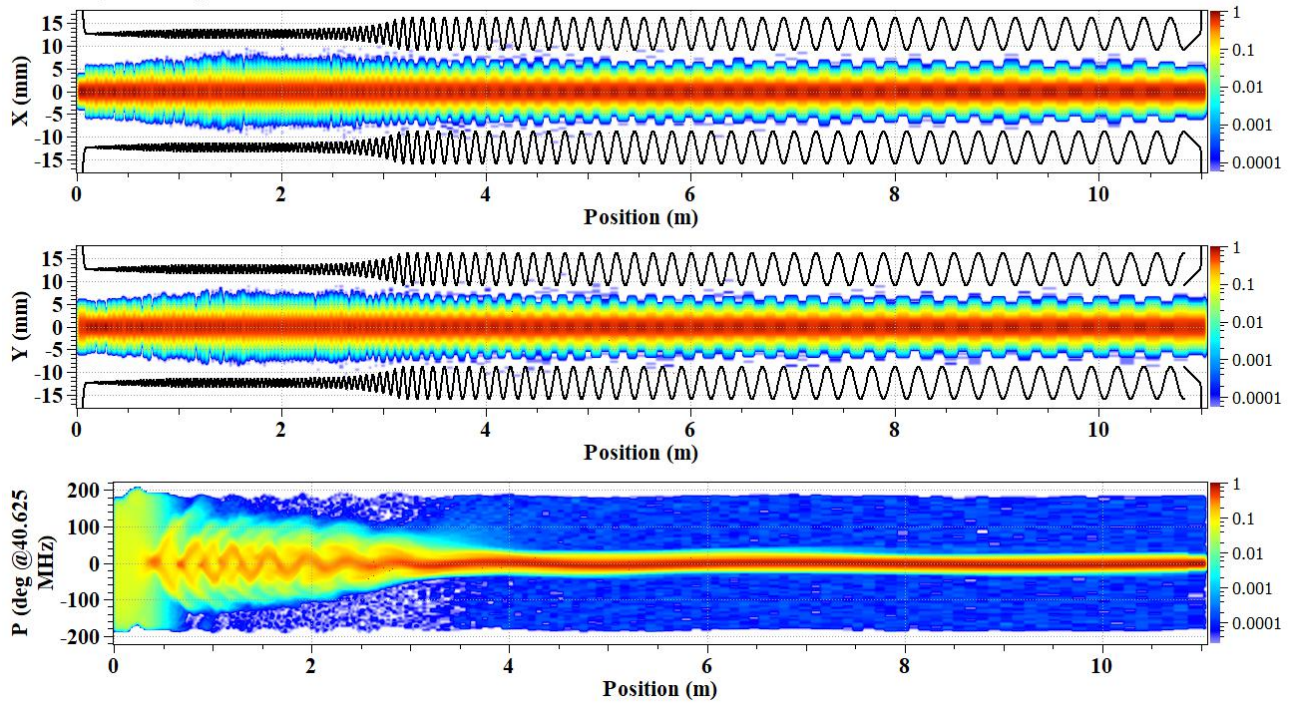
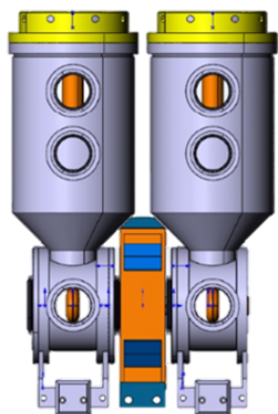
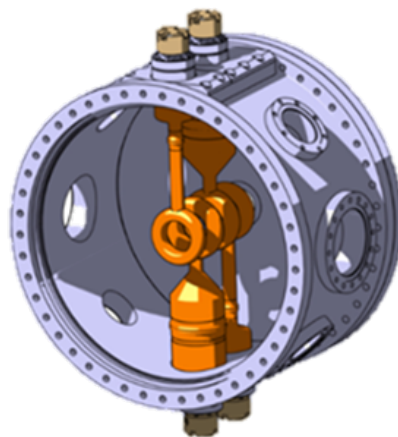


Рис. 3



(a)



(б)

Рис.4

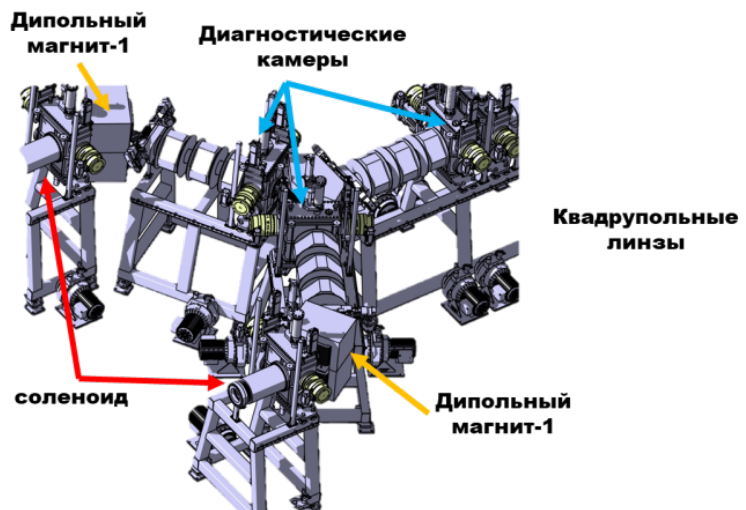
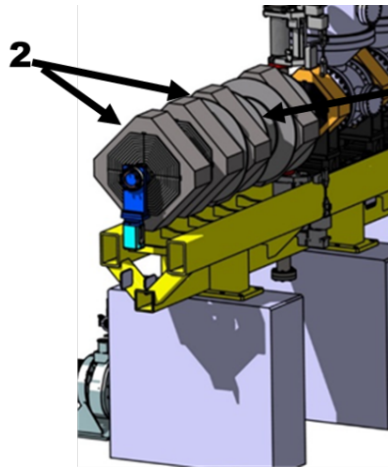
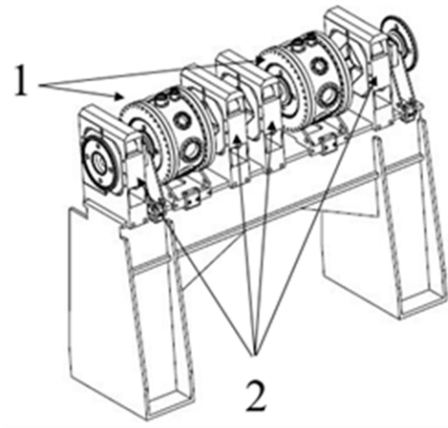


Рис. 5



(a)



(б)

Рис.6

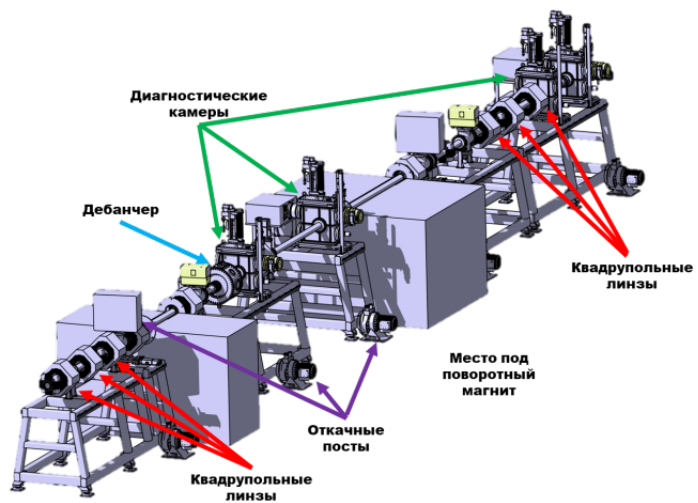


Рис. 7

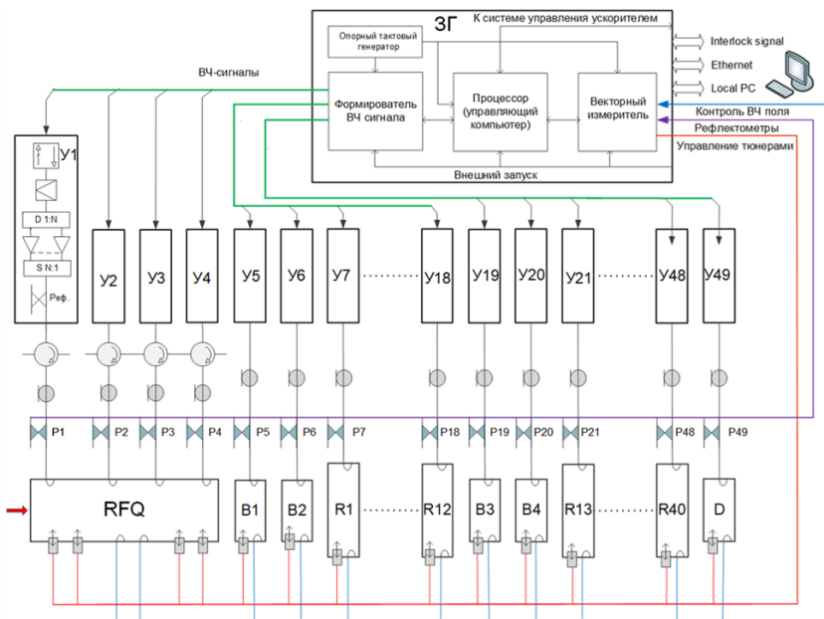


Рис. 8

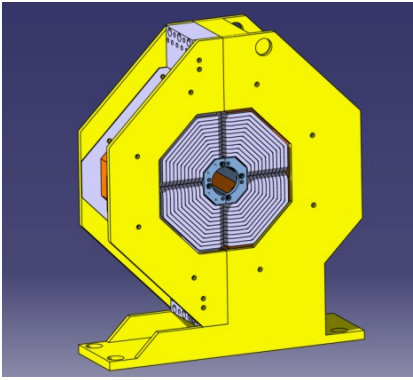


Рис. 9

Для связи с авторами:

Кулевой Тимур Вячеславович

Тел.: 8-910-402-24-83 (моб.)

kulevoy@itep.ru

Завьялов Николай

NVZavyalov@vniief.ru

Кропачев Геннадий

kropachev@itep.ru

Ситников Алексей

sitnikov@itep.ru

Для переводчика:

HEAVY ION LINAC LU-2 FOR SYNCHROTRON RESEARCH COMPLEX

T.V. Kulevoy^{3†}, N.V. Zavyalov⁴, G.N. Kropachev^{1,2}, A.L. Sitnikov¹, V.I.S. Skachkov¹,
V.G. Kuzmichev¹, D.A. Liakin¹, S.V. Barabin, A.I. Semennikov¹, D.N. Seleznev¹,
V.K. Semyachkin¹, V.S. Stolbunov¹, A.Yu Orlov¹, R.P. Kuibeda¹, A.V. Kozlov¹,
Yu.B. Stasevich¹, V.I. Nikolaev¹, A.I. Marchenkov¹, N.M. Kristy¹, A.V. Shumshurov¹,
Yu.A. Satov¹, A.N. Balabaev¹, A.A. Vasiliev¹, A.A. Losev^{1,3}, I.A. Khrisanov¹,
S.V. Vinogradov¹, E.R. Khabibullina^{1,3}, I.V. Kilmetova¹, A.A. Malyshev^{1,3},
M.S. Saratovskikh¹, A.S. Borisov⁴, M.A. Guzov⁴, L.E. Polyakov⁴, M.I. Makarova⁴,
D.S. Trufanov⁴, I.A. Mishin⁴, A.V. Mashagin⁴, M.L. Smetanin⁴, A.V. Telnov⁴,
A.M. Opekunov⁴, M.V. Smirnov⁵, P.A. Sokolov⁵, N.M. Serebrova⁵

¹National Research Center "Kurchatov Institute" Akademika Kurchatov Square, 1, Moscow, 123182, Russian Federation

²Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Joliot-Curie st., 6, Russian Federation

³National research nuclear university «MEPhI», 115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31, Russian Federation

⁴Russian Federal Nuclear Center "All-Russian Research Institute Of Experimental Physic" 607188, Sarov, Nizhny Novgorod region, Muzrukov Ave, 10

⁵AO «NIEFA Efremova», 196641, S.-Peterburg, pos. Metallostroy, road to Metallostroy,3, Russian Federation

Abstract. The project of a facility for studying the ionizing radiation effects from outer space is under development at the RFNC-VNIIEF, Sarov. Epy National Research Center "Kurchatov Institute" – KCTEF develops a technical project and design documentation for a heavy ion linac. The linac provides the acceleration of the beams with the mass-to-charge ratio within the range of 4-8, in a pulsed mode up to energy of 4 MeV per nucleon with a current of 10 mA. The accelerator consists of a laser ion source, a RFQ section and two DTL sections operating at multiple frequencies. The world's most powerful laser ion source can generate a Bi²⁷⁺ ion beam with a current of at least 3 mA at pulse duration of 5 microseconds. In linac at least 95% of the injected beam current is captured in acceleration.