Форма 24

Проект: **«Создание прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя тяжёлых ионов, нацеленного на получение интенсивных радиоактивных пучков для фундаментальных исследований»**

Дополнение к физической программе проекта **«Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)»** на 2020/2021 гг.
Тема: 03-0-1129-2017/21

Список участников и организаций

Россия:

Объединённый институт ядерных исследований – ОИЯИ (Дубна)
А.А. Безбах, С.Л. Богомолов, А.В. Бутенко, А.А. Ефремов, Л.В. Григоренко, А.В. Горшков, Г. Камински, А.В. Карпов, С.А. Крупко, И.Н. Мешков, С.И. Сидорчук, С.В. Степанцов, Е.М. Сыресин, А.М. Родин, Г.М. Тер-Акопьян, А.С. Фомичев, В. Худоба, П.Г. Шаров, Б.Ю. Шарков, Н.В. Антоненко, Г.Г. Адамян, С.Н. Ершов, Р.В. Джолос, А.П. Северюхин

НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ (Москва)
Т.В. Кулевой, Г.Н. Кропачев, А.Л. Ситников, А.И. Семенников, А.В. Козлов, Д.Н. Селезнев, Д.А. Лякин, А.Ю. Орлов, С.В. Барабин, В.Г. Кузьмичев, Р.П. Куйбида

НИЯУ МИФИ (Москва)
С.М. Полозов, А.В. Самошин, В.С. Дюбков, Т.А. Лозеева, Ю.Ю. Лозеев, А.С. Царегородцев, М.В. Лалаян, М.А. Гусарова, С.М. Мациевский

ИЯИ РАН (Москва)
А.В. Фещенко, В.В. Парамонов, Ю.В. Сеничев, А.С. Белов, С.А. Гаврилов

НИЦ «Курчатовский институт» (Москва)
А.А. Коршенинников, Е.Ю. Никольский

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (Санкт Петербург)
С.Е. Сычевский, Е.А. Лямзин, В.П. Кухтин

ИАП РАН (Санкт Петербург)
М.И. Явор

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» (Саров)
Н.В. Завьялов, А.В. Тельнов

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина» (Снежинск)
И.В. Мамаев, Б.А. Сидоров, М.Ю. Наменко, М.С. Писарев

НИИЯФ МГУ (Москва)
Д.О. Еременко

ИПФ РАН (Нижний Новгород)
С.В. Голубев

ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера (Новосибирск)
П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, В.В. Пархомчук, А.С. Касаев, А.А. Краснов, И.А. Кооп, Ю.А. Роговский, Д.Б. Шварц

Белоруссия:
ФТИ НАНБ (Минск)
В.И. Залесский, И.Л. Поболь, А.И. Покровский

Германия:

ГСИ (Дармштадт)
В. Барт, С. Ярамышев, Х. Вайк, К. Шайденбергер, Х. Симон, Ю. Литвинов, У. Рацингер

Франция:
СЕА (Сакле)
П. Ведрин

Италия:

ЛНЛ - ИНФН (Леньяро)
А. Факко, Б. Джованни, А. Пизент

Канада:
Ускорительный центр TRIUMF (Ванкувер)
В.Л. Звягинцев

Корея:

Корейский Ун-т (Сежонг)
Х.К. Парк, Е.С. Ким, К.С. Парк

Китай:
Институт Современной Физики (Ланьчжоу)
Х. Чжао, Л. Сан

Япония:
Ун-т Ниххон (Чиба)
Т. Катаяма

Руководители проекта:	Л.В. Григоренко (ЛЯР ОИЯИ) Т.В. Кулевой (НИЦ «КИ» - ИТЭФ)
Заместители руководителя проекта:	А.С. Фомичев (ЛЯР ОИЯИ) А.А. Ефремов (ЛЯР ОИЯИ) С.М. Полозов (НИЯУ МИФИ)
Дата представления проекта в НОО	_____.
Дата НТС лаборатории	17.04.2019

Дата представления физ. обоснования -
8.02.2019. Обсуждение в рамках круглого стола на международном совещании “Technical meeting on conceptual design of prospective high-current heavy-ion cw-LINAC for RIB research at JINR” Dubna, FLNR JINR; http://aculina.jinr.ru/derica.php

Форма 25

Лист согласований Проекта

«Создание прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя тяжёлых ионов, нацеленного на получение интенсивных радиоактивных пучков для фундаментальных исследований»

и дополнения к физической программе проекта **«Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)»** на 2020/2021 гг.

Тема: 03-0-1129-2017/21

Руководители темы: Г.Г. Гульбекян, С.Н. Дмитриев, М.Г. Иткис

Руководители проекта: Л.В. Григоренко, Т.В. Кулевой

УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ _____ «____»_____2019

СОГЛАСОВАНО:

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ _____ «____»_____2019

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ _____ «____»_____2019

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ОИЯИ _____ «____»_____2019

НАЧАЛЬНИК НОО _____ «____»_____2019

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ _____ «____»_____2019

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ_____ «____»_____2019

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА _____ «____»_____2019

_____ «____»_____2019

ОДОБРЕН

ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ _____ «____»_____2019

Форма 26

План-график и необходимые ресурсы для осуществления проекта:
«Создание прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя тяжёлых ионов, нацеленного на получение интенсивных радиоактивных пучков для фундаментальных исследований»

и дополнения к физической программе **«Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)»**

Наименование работ / Годы	2020	2021	Итого (тыс.USD)
Разработка и изготовление прототипа первой секции ускорителя с ПОКФ	400	330	980
Разработка и изготовление прототипов системы транспортировки пучка (СП-резонаторы, стриперы и др.)	300	220	670
Разработка и изготовление системы формирования ионного пучка с плазменной границы ECR источника	80	100	240
Проектирование сверхпроводящего ECR источника на 28 ГГц и изготовление элементов формирования сильноточного пучка.	340	540	980
Разработка и создание стенда в составе прототипа секции перспективного ускорителя cw-RFQ и тестового ECR источника 14 ГГц. Отладка оборудования на ионах $^{14}N^{2+}$, I~30 emA.	160	160	360
ТЭО проекта DERICA. Фаза 1 - проект сильноточного линейного ускорителя (E ~ 100_140 МэВ/н, U_Ca) и установок на его базе (фрагмент сепаратор, gas-cell, MR-TOF спектрометр и др.) для фундаментальных исследований с пучками радиоактивных ядер. Детализация научной программы для каждого этапа проекта.	120	100	270
Итого	1400	1450	2850

Руководитель проекта: Л.В. Григоренко (ЛЯР ОИЯИ)

Форма 29

Смета расходов по проекту
«Создание прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя тяжёлых ионов, нацеленного на получение интенсивных радиоактивных пучков для фундаментальных исследований»

и дополнения к физической программе **«Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)»**

Наименование статей затрат / Годы	2020	2021	Итого (тыс.USD)
НИР	350	350	1000
ОП ЛЯР			
КБ ЛЯР			
Материалы, оборудование: *Секции RFQ (3 шт.)* *Анализатор цепей* *Вакуумное оборудование* *Высоковольтная платформа* *Компоненты ECR источника* *ВЧ генератор, источники питания, коммуникации и др.*	970	1040	2360
Международное сотрудничество: а) командировки в страны-неучастницы ОИЯИ б) командировки в страны-участницы ОИЯИ	80 60 20	60 50 10	140
Итого	1400	1450	2850

Директор Лаборатории С.Н. Дмитриев

Руководитель проекта Л.В. Григоренко

Ведущий экономист Т.В. Мамонова

Краткая аннотация Проекта (не более 300 слов)

Проект DERICA (**D**ubna **E**lectron **R**adioactive **I**on **C**ollider f**A**cility, http://aculina.jinr.ru/derica.php) рассматривается как один из важнейших перспективных проектов инфраструктурного развития ОИЯИ на следующую семилетку. Научная программа исследований проекта DERICA нацелена на изучение радиоактивных изотопов и находится на переднем крае ядерной физики низких энергий. Уникальной особенностью проекта является возможность изучения взаимодействий электронов с малоизученными радиоактивными изотопами в коллайдерном эксперименте с целью определения фундаментальных свойств ядерной материи – электромагнитных формфакторов экзотических ядер. Очевидно, что для реализации проекта со следующей семилетки уже сейчас необходимо начать выполнение ряда наиболее важных и долгосрочных НИОКР.

Ключевым оборудованием в проекте является сильноточный линейный ускоритель тяжёлых ионов LINAC-100 с энергиями порядка 100 и 140 МэВ/нуклон для ионов урана и кальция, соответственно. Начальная часть ускорителя (front-end) является наиболее важной и время затратной задачей, требующей проведения серии НИОКР. Задача состоит из нескольких этапов и предполагает развитие ряда инновационных технологий:

- создание ЭЦР источника тяжёлых ионов высокой интенсивности;
- создание нормально проводящих секций с квадрупольной фокусировкой и трубками дрейфа, предназначенных для работы в непрерывном режиме;
- сверхпроводящие ускоряющие резонаторы;
- газовые стрипперы для повышения зарядности ускоряемых ионов;
- источники ВЧ питания резонаторов, построенные на основе твердотельных усилителей.

Обладая необходимыми технологиями и при поддержке ведущих Российских институтов (НИЦ КИ-ИТЭФ, НИЯУ МИФИ, ИЯИ РАН, ВНИИТФ, НИИЭФА) и коллаборантов за рубежом (GSI, MSU, INFN, GANIL, TRIUMF, ФТИ НАНБ), в ОИЯИ представляется возможным создание прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя. Дальнейшее развитие проекта предполагает создание ускорителя LINAC-100 с энергиями тяжёлых ионов порядка 100 МэВ/нуклон и рекордными интенсивностями (I_U ~ 1 emA). Этот сильноточный ускоритель в комплексе с оборудованием для получения радиоактивных пучков (фрагмент-сепаратор, система торможения ионов в газе, MR-TOF спектрометр, система накопительных колец и др.) позволят проводить уникальные эксперименты с радиоактивными пучками мирового уровня.

Введение (не более 1 стр.)

Критической и отправной точной на пути реализации проекта DERICA является старт работ по нормально-проводящим ускоряющим резонаторам, предназначенным для работы в непрерывном режиме. Резонаторы с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) и несколько резонаторов H-типа необходимы для создания начальной части LINAC-100 (front-end). Если технологии создания и запуска резонаторов, работающих в импульсном режиме в России восстановлены, в том числе усилиями сотрудников ОИЯИ, то работы по CW (Continuous Wave) резонаторам носят только теоретический и расчётный характер. Крайне важно в кратчайшие сроки начать конструирование, изготовление и тестирование прототипа такого резонатора для определения его предельных параметров, условий эксплуатации и запуска серийного изготовления.

Название первоочередных работ приведены ниже.

1. Проектирование и создание прототипа новой базовой установки ОИЯИ в рамках проекта DERICA, нацеленной на проведение фундаментальных исследований с пучками радиоактивных ядер. Прежде всего это:
(а) Разработка и изготовление прототипа cw-RFQ (1-3 секции) для перспективного сильноточного линейного ускорителя тяжёлых ионов (ток выше 1 emA).
(б) Разработка системы формирования ионного пучка с плазменной границы ECR-источника и системы согласования пучка ионов, генерируемого ECR-источником, с cw-RFQ (LEBT – low energy beam transport).
(в) Разработка и создание стенда в составе прототипа секции перспективного ускорителя cw-RFQ и тестового 14 ГГц ECR-источника. Отладка оборудования на ионах $^{14}N^{2+}$ с током 3 emA и более.
2. Проектирование сильноточного сверхпроводящего ECR-источника тяжёлых ионов (включая ионы урана) с частотой 28 ГГц. Изготовление и тестирование демонстратора.
3. Разработка и создание канала LEBT для ECR-источника 28 ГГц с первой секцией сильноточного линейного ускорителя (cw-RFQ).
4. Проектирование сверхпроводящей части LINAC-100, включая секции стрипперов и сепараторов зарядовых состояний ионов.
5. Технико-экономическое обоснование (ТЭО) проекта класса мегасайнс DERICA.

3.4. Состояние исследований по заявленной научной проблеме (не более 2 стр.).

Создание ускорительного комплекса DERICA требует решения ряда ключевых научных, инженерных и технологических задач. Важным требованием при разработке подсистем комплекса является обеспечение их надёжности и устойчивости при эксплуатации в режиме ~6000 часов/год. С точки зрения ионного источника требуется разработка установки, работающей в непрерывном режиме и обеспечивающего максимально достижимое зарядовое состояние ускоряемых ионов (вплоть до урана) при требуемой для проведения экспериментов интенсивности ионного пучка. Для большинства проводимых экспериментов с радиоактивными пучками интенсивность первичного пучка должна быть выше 10 pμA. На сегодняшний день наиболее подходящим источником тяжёлых ионов для ускорителей является источник на основе электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР). В таблице 1 представлены рекордные интенсивности пучков ряда ионов, генерируемых сегодня на лучших образцах ЭЦР-источников в мире.

Таблица 1. Параметры пучков, генерируемых ЭЦР-источниками в IMP (SECRAL) и LBNL (VENUS). Курсивом выделены рекордные интенсивности [2].

Ion, Beam	A/Z	IMP, eμA	VENUS, eμA
$^{16}O^{6+}$	2.67	***6100***	4750
$^{40}Ar^{12+}$	3.3	***1420***	1060
$^{40}Ar^{16+}$	2.5	***620***	523
$^{40}Ar^{18+}$	2.2	***15***	4
$^{40}Ca^{11+}$	3.63	710	***854***
$^{40}Ca^{14+}$	2.86	270	***285***
$^{86}Kr^{18+}$	4.78	***1020***	770
$^{86}Kr^{28}$+	3.07	***146***	100
Xe^{26+}	5.03	***1100***	
Xe^{30+}	4.4	320	***330***
Xe^{42+}	3.1	***15***	6
$^{209}Bi^{31+}$	6.74	***680***	300

$^{209}Bi^{50+}$	4.18	10	***27***
$^{238}U^{33+}$	7.2	202	***440***

Таким образом, можно сформулировать первую задачу НИР – необходимо разработать источник для генерации пучков высокозарядных ионов (от бора до урана) с интенсивностями не ниже указанных в таблице курсивом. Из этих данных следует также вывод о том, что начальная часть ускорительного комплекса должна разрабатываться для ускорения ионов с отношением массы к заряду A/Z≤7.5. Работы по обоим направлениям (разработка ионного источника и начальной части ускорительного комплекса) необходимо вести в тесной взаимосвязи. Для обеспечения работоспособности ускорительного комплекса необходимо провести разработку ионного источника на базе самых современных достижений, обеспечивающих не только генерацию высокоинтенсивных пучков с максимально достижимым зарядовым состоянием, но и разработку системы формирования ионного пучка с поверхности плазмы разряда в источнике с минимальным фазовым объёмом. Параметры полученного пучка определяют построение системы согласования пучка с ускоряющей структурой, а также параметры ускоряющего канала в начальной нормально-проводящей части ускорителя. На текущий момент в РФ есть прекрасный задел в этом направлении (ЛЯР ОИЯИ – ЭЦР-источник, НИЦ КИ–ИТЭФ – система формирования пучка), позволяющий рассчитывать (при объединении усилий) на успешное решение данной задачи за период 3-5 лет.

При разработке начальной нормально-проводящей части ускорителя (RFQ и DTL) необходимо первым делом освоить технологию производства ускоряющих структур, предназначенных для работы в непрерывном режиме (CW). Если технологию создания импульсных нормально проводящих ускоряющих структур удалось восстановить в РФ в рамках реализации проекта NICA [1], то технология создания нормально проводящих RFQ и DTL для работы в непрерывном режиме требует освоения. Это подразумевает освоение технологии изготовления резонатора на основе вакуумной пайки из отдельных элементов, изготовленных из бескислородной меди, при которой достигаются требуемые для работы установки параметры: остаточное давление не выше 10^{-8} Торр, заданная резонансная частота, заданное распределение ВЧ-поля вдоль оси ускорителя, заданная точность юстировки электродов, ввод необходимого уровня мощности в непрерывном режиме. Для этого необходимо начать работы по разработке прототипа нормально проводящей части ускорителя, а именно начальных секций RFQ, используя последние рекомендации и достижения мирового ускорительного сообщества [1-7]. Необходимо отметить, что первая часть работ, а именно освоение технологии создания ускоряющих структур с заданными ЭДХ в целом решена мировым ускорительным сообществом и требуется только её освоение в РФ. Однако долговременная работоспособность данных структур «под пучком» достигнута лишь для пренебрежимо малых интенсивностей ускоряемого пучка. Это требует поиска/реализации новых решений, на что и направлен данный проект.

Ещё одной ключевой проблемой, без решения которой будет невозможно создание драйвера для проекта DERICA, является отсутствие в России в настоящее время технологии высокочастотной сверхпроводимости. Однако данная задача уже начала решаться в рамках совместной программы, реализуемой ОИЯИ, НИЯУ МИФИ и ряда научных центров Белоруссии. Предполагается, что к концу текущего года будет изготовлен и начнёт испытываться первый прототип коаксиального резонатора.

1. A.M. Bazanov, et al., COMMISSIONING OF NEW LIGHT ION RFQ LINAC AND FIRST NUCLOTRON RUN WITH NEW INJECTOR, Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference, Copenhagen, Denmark, from 14–19 May, 2017, pp.2366-2368.
2. P. Ostroumov, Overview of Worldwide High Intensity Heavy Ion Linacs, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, Beijing, China, 16–21 September 2018,
3. P.N. Ostroumov, et al., ACCELERATOR PHYSICS ADVANCES AT FRIB, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, April 29–May 4, 2018, pp.2950-2952.
4. T. Yoshimoto†, et al., ION BEAM STUDIES IN THE FRIB FRONT END, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference, pp.1094–1096.
5. E. Fagotti, et al., IFMIF/EVEDA RFQ PRELIMINARY BEAM CHARACTERIZATION, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, Beijing, China, 16–21 September 2018, pp.834-837.
6. E. Pozdeyev, et al., FIRST ACCELERATION AT FRIB, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, Beijing, China, 16–21 September 2018, pp.615–619.
7. M. Sugimoto, et al., PROGRESS REPORT ON LIPAC, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, Beijing, China, 16–21 September 2018, pp.308-313.

3.5. Описание предлагаемого исследования (не более 5 стр.).

Целью работы является разработка технических основ создания ускорителя тяжёлых ионов с энергией около 100 МэВ/нуклон LINAC-100 – драйвера установки DERICA. Для достижения данной цели на первом этапе предполагается разработать и создать ЭЦР-источник на сверхпроводящих магнитах и работающего на частоте 28 МГц, а также несколько секций прототипа ускорителя RFQ, для отработки условий эксплуатации в непрерывном режиме. Параллельно с решением этих ключевых задач будет разработан тестовый стенд начальной части установки, включающий высоковольтную платформу с установленным на нем тестовым ЭЦР-источником, систему формирования ионного пучка, систему транспортировки и согласования низкоэнергетического пучка с аксептансом RFQ. Стенд будет оснащен системой диагностики ионного пучка, которая также будет разработана и создана в ходе выполнения проекта.

Ожидаются следующие результаты работ:

1. На основе численного моделирования будет разработан ускоряющей канал LINAC-100 от источника до физической мишени, определена линейка ВЧ-частот резонаторов ускорителя, выбраны энергии переходов с одной частоты на другую, определены количество, конструкция и места установки стрипперов.
2. Будет разработана конструкторская документация 28-ти ГГц ЭЦР-источника с магнитной системой на основе сверхпроводимости;
3. Будет разработана конструкторская документация и изготовлены несколько первых секций RFQ - начальной части ускорителя LINAC-100.
4. Будет создан тестовый стенд для проверки «под пучком» правильности принятых физических, технологических и конструкционных решений при разработке системы формирования пучка, канала транспортировки и согласования низкоэнергетического пучка с аксептансом RFQ, конструкции самого RFQ.
5. Ожидается технико-экономическое обоснование всего проекта DERICA и детальная спецификация научной программы.

Главными тенденциями в развитии ускорительной техники в мире являются:

1. Развитие источников на основе электрон-циклотронного резонанса с магнитными системами на сверхпроводниках [1, 2];
2. Развитие систем с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) [3], работающих в непрерывном режиме. Эти системы используются для группировки и ускорения пучка в начальной части ускорительного комплекса до энергии нескольких МэВ и обеспечивают возможность низкой (вплоть до нескольких десятков кэВ) энергии инжекции ионного пучка и высокий (близкий к 100%) коэффициент токопрохождения. На сегодняшний день технология создания cw-RFQ в мире находится в стадии освоения. Уже есть примеры работающих cw-RFQ, пока работающих на пучках с пренебрежимо малой интенсивностью [4];
3. Для диапазона энергий 3-50 МэВ наблюдается отказ от использования классического ускорителя Альвареца. Вместо него все чаще используются либо системы на основе резонаторов H-типа с высокочастотной (ВЧ) поперечной фокусировкой, либо системы с разделенными участками ускорения на основе резонаторов H-типа и фокусировки [5, 6]. Также используются отдельные короткие резонаторы H-типа (CH, четверть- и полуволновые, спок-резонаторы и т.д.) с фокусировкой соленоидами или квадрупольными линзами, размещенными между резонаторами;
4. При средних и высоких энергиях используются сверхпроводящие резонаторы и модульный принцип построения ускорителя: сверхпроводящие резонаторы делаются одинаковыми или разбиваются на небольшое число групп одинаковых резонаторов. Такой подход существенно упрощает и удешевляет процесс изготовления;
5. Сверхпроводящие секции используются при всё более низких энергиях. Если в ускорителе SNS сверхпроводящие секции работают, начиная с энергии 186 МэВ, то в линейном ускорителе для реактора MYRRHA их планируется использовать уже с 5.5 МэВ. Это позволяет существенно упростить и, как следствие, удешевить систему питания ускорителя, а также снизить стоимость его эксплуатации. В Национальной лаборатории Леньяро (LNL-INFN, Италия) при участии сотрудников ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» запущен первый в мире сверхпроводящий ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [7], однако такое кардинальное решение не выглядит целесообразным, ввиду ряда технических сложностей, которые затрудняют получить требуемую для интенсивного пучка трансмиссию;
6. Твердотельные мощные источники ВЧ-питания. Надежность и время наработки на отказ системы ВЧ-питания на их основе значительно выше, чем для традиционных вакуумных источников сравнимой мощности [8, 9].

Для создания ускорителя LINAC-100 необходимо решить ряд задач, основными из которых являются:

1. Оптимизация общей структуры ускорителя, включая повороты, стрипперы и сепараторы, для обеспечения возможности перестройки параметров для ускорения ионов с различным отношением заряда к массе при уровне потерь частиц в сверхпроводящей части не хуже 10^{-4} $м^{-1}$. Также необходимо оптимизировать положение стриппера (стрипперов), что позволит уменьшить число необходимых СП резонаторов и, соответственно, стоимость LINAC-100. Работа будет осуществляться сотрудниками НИЯУ МИФИ, НИЦ «Курчатовкский институт» - ИТЭФ, GSI (Германия) при участии специалистов из LNL-INFN (Италия). Специалисты ОИЯИ определяют начальные и конечные параметры ионных пучков, получаемые с ЭЦР-источника, и необходимые для проведения экспериментальных работ на выходе ускорителя.

2. Генерация и формирование ионных пучков с максимально высоким зарядовым состоянием и интенсивностью не менее 10 рμА с нормализованным эмиттансом на уровне 98% интенсивности не выше 1–2 π мм мрад. Для решения этой задачи необходимо разработать и создать ЭЦР-источник с магнитной системой на сверхпровдниках, работающий на частоте 28 ГГц. Работа осуществляется коллективом специалистов ЛЯР ОИЯИ. Целью работы является, как минимум, выход на генерацию пучка ионов урана с зарядовым состоянием не менее 33+ при интенсивности пучка не ниже 10 рμА, что соответствует на сегодня лучшим в мире достигнутым результатам, с прицелом на перекрытие этих параметров.

3. Для данного источника должна быть разработана система формирования пучка с эмиттансом не хуже 1–2 π мм мрад. Разработка системы формирования может быть начата параллельно с разработкой источника на прототипе ЭЦР источника с использованием программного пакета KOBRA-3D. Работа будет выполнятся совместно специалистами ЛЯР ОИЯИ и НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, обладающими пакетом KOBRA-3D и имеющими опыт по разработке систем формирования ионного пучка с плазменной границы [13];

4. Создание тестового стенда для испытаний ЭЦР-источника, низкоэнергетического канала транспортировки пучка и резонаторов RFQ «под пучком», оснащённой необходимой для этого диагностикой. Работа будет выполнятся в сотрудничестве специалистами ЛЯР ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и ИЯИ РАН. ЛЯР ОИЯИ отвечает за создание ВВ платформы и тестового ионного источника, а также совместно с ИТЭФ разрабатывает элементы канала транспортировки. ИТЭФ участвует в разработке узлов системы диагностики в частности индукционного датчика для непрерывного пучка, измерителя эмиттанса, в чем у них накоплен большой опыт, включая совместные работы с ОИЯИ [10-12]. ИЯИ РАН разрабатывает датчик для измерения формы сгустка пучка (Bunch Shape Monitor) [14].

5. Создание низкоэнергетического канала шестимерного согласования ионного пучка, генерируемого ионным источником, с RFQ. В состав канала войдут магнитный сепаратор, фокусирующие линзы (соленоиды или квадруполи) и ВЧ-группирователь для продольного согласования пучка [15]. Разработка канала будет выполнятся коллективом экспертов из ЛЯР ОИЯИ (магнитные элементы), НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ (ВЧ-группирователь). Изготовления элементов канала предполагается осуществлять с привлечением предприятий Росатома – НИИЭФА им. Ефремова (г. С.-Петербург) и ВНИИТФ им. Забабахина (г. Снежинск);

6. Разработка технологии изготовления и настройки RFQ-резонаторов, поддержание стабильности их параметров при работе в CW-режиме. Для достижения данной цели будут разработаны и испытаны несколько секций RFQ. На первом этапе будет отработана технология изготовления данных секций, обеспечивающая получение рабочего вакуума на уровне давления не хуже 10^{-8} Торр, юстировку электродов, достижение требуемых ЭДХ-резонаторов. На втором этапе RFQ будет установлен на тестовый стенд для проведения работ по согласованию эмиттанса ионного пучка с аксептансом RFQ, тестирования правильности выбранных параметров резонаторов, обеспечивающих устойчивость работы RFQ «под пучком», измерение параметров пучка на выходе RFQ. Разработка секций будет осуществляться коллективом специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, с привлечением специалистов из НИЯУ МИФИ, ИЯИ РАН (г. Троицк), GSI Германия и LNL-INFN Италия;

7. Разработка ВЧ генераторов, работающих в CW-режиме. В РФ разработкой твердотельных генераторов занимаются НИИТФА госкорпорации Росатом и

коммерческая фирма Триада-ТВ (г. Новосибирск). По мере готовности резонаторов RFQ необходимо будет заключить договор с одной из этих компаний на поставку соответствующих модулей. Работа будет вестись под контролем НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ;

8. Разработка канала ускорения ионных пучков на основе СП-резонаторов, на основе моделирования динамики пучка, с целью определения и оптимизации количества различных типов СП-резонаторов, необходимых для ускорения широкого спектра ионов. Моделирование динамики пучка в СП части ускорителя будет осуществлено коллективом специалистов НИЯУ МИФИ, разработка резонаторов ведётся совместной командой специалистов НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, ряда институтов РБ, с привлечением специалистов из GSI Германия, LNL-INFN Италия, TRIUMF, Канада;

9. Исследование электродинамических параметров и механических нагрузок в СП-резонаторах при переходных процессах. Данная работа будет проводится по мере готовности СП-резонаторов. Работа уже ведется совместной командой специалистов НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, ряда институтов Республики Беларусь с привлечением специалистов из GSI Германия, TRIUMF, Канада, и LNL-INFN Италия и финансируется из других источников.

Предполагается, что работа займёт период не менее двух лет.

В течение первого года будет завершена разработка канала ускорителя LINAC-100 от источника до выхода из СП части ускорителя. Будут определены положения стрипперов и общая структура сепараторов, размещаемых после стрипперов. Определена цепочка частот резонаторов, определены энергии перехода между различными частотами, а также место перехода с нормально проводящей части ускорителя на сверхпроводящую. Будут выполнены работы по моделированию электродинамических параметров резонаторов RFQ, а также тепловые расчеты этих резонаторов. На основе полученных результатов будет разработана конструкторская документация (КД) на изготовление прототипа резонатора RFQ. Будет разработано техническое задание на ЭЦР-источник на 28 ГГц с сверхпроводящими магнитами. Разработан технический проект тестового стенда. Подготовлены КД на основные элементы системы диагностики пучка. Будет разработана конструкторская документация на группирователь для продольного согласования пучка.

В течение второго года будет проведена работа по размещению КД на различные изделия в производство, будет осуществляться авторский надзор за их изготовлением, с приемкой по мере их готовности. Будут вестись работы по подготовке площадки для тестового стенда и по мере готовности отдельных узлов будет производится его монтаж. На основании численного моделирования системы формирования пучка для тестового источника будет разработана КД и запущено изготовление.

Будут завершены работы по изготовлению первого тестового резонатора. Будет проведено тестирование и настройка резонатора с вводом рабочего уровня ВЧ-мощности. По результатам тестирования будет скорректирована КД на резонаторы и запущено изготовление следующих модификаций. Будет собран тестовый стенд и установлен тестовый ЭЦР-источник с разработанной системой формирования пучка. Смонтирована и оттестирована система диагностики пучка. Проведены работы по измерению и оптимизации параметров ионного источника. Смонтирован канал транспортировки ионного пучка до места ввода его в RFQ. Проведены работы по настройке канала на согласование эмиттанса пучка с аксептансом RFQ. Проведен ввод пучка в RFQ.

На протяжении двух лет будут вестись работы по технико-экономическому обоснованию проекта DERICA [16] с привлечением специалистов из ИЯФ им. Будкера (г. Новосибирск), ИАП РАН (г. Санкт Петербург), НИЯУ МИФИ, НИЦ КИ – ИТЭФ (Москва), GSI (Германия), MSU (США), Nihon Univ. (Япония), в результате которых должен быть определён концептуальный и технический дизайн проекта, а также конкретизирована научная программа исследований.

Список литературы.

1. T. Nakagawa, Review of highly charged heavy ion production with electron cyclotron resonance ion source Review of Scientific Instruments 85, 02A935 (2014); doi: 10.1063/1.4842315.
2. a) H. W. Zhao, et al. Superconducting ECR ion source: From 24-28 GHz SECRAL to 45 GHz fourth generation ECR. Review of Scientific Instruments 89, 052301 (2018); doi: 10.1063/1.5017479; b) T. Nagatomo, et al. NEW 28-GHz SUPERCONDUCTING ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE ION SOURCE FOR SYNTHESIZING SUPER-HEAVY ELEMENTS WITH Z>118. 23th Int. Workshop on ECR Ion Sources, JACoW Publishing, doi:10.18429/JACoW-ECRIS2018-TUA3.
3. Капчинский И.М., Тепляков В.А. Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой. — Приборы и техника эксперимента, 1970, № 2, с. 19-22.
4. Ostroumov P.N. ADVANCES IN CW ION LINACS, proceedings of 6th International Particle Accelerator Conference IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015, pp.4085-4090.
5. Barth W., Forck P., Ratzinger U. et al. Commissioning of IH-RFQ and IH-DTL for the GSI high-Current linac. — In: Proc. LINAC'00, 2000, p. 229—231.
6. Kolomiets A.A., Koshelev V.A., Plastun A.S., et al. Novel DTL section for ITEP-TWAC heavy ion injector. — In: Proc. RuPAC'12, 2012, p. 469—471.
7. Pisent A., Bisoffi G., Cavenago M., et al. Results on the beam commissioning of the superconducting-RFQ of the new LNL injector — In: Proc. LINAC'06, 2006, p. 227—231.
8. Sechi F., Bujatti M. Solid State Microwave High-Power Amplifiers. Artech House Inc., 2009. ISBN-13: 978-1-59693-319-4.
9. Smirnov A., Krasnov A., Rezanov I., et al. The layout of 352 MHz 400 kW RF power amplifier.— In: Proc. NAPAC'13, 2013, p. 937—939.
10. S. Barabin, A. Kozlov, T. Kulevoy, et al., PEPPER-POT EMITTANCE MEASUREMENTS Proceeding of 26th Russian Particle Accelerator Conference RUPAC2018, Protvino, Russia, 1-5 October 2018, Protvino, Russia, pp. 443-445.
11. S. Barabin, A. Kozlov, T. Kulevoy, et al., EMITTANCE MEASUREMENT ON KRION-6T ION SOURCE BY PEPPERPOT METHOD, Proceeding of 26th Russian Particle Accelerator Conference RUPAC2018, Protvino, Russia, 1-5 October 2018, Protvino, Russia, pp.207-210.
12. S. Barabin, A. Kozlov, T. Kulevoy, et al., EMITTANCE MEASUREMENTS OF POLARIZED ION BEAMS USING A PEPPER-POT EMITTANCE METER, Proceeding of 26th Russian Particle Accelerator Conference RUPAC2018, Protvino, Russia, 1-5 October 2018, Protvino, Russia, pp.440-442.
13. T. Kulevoy, G. Kropachen, A. Balabin, et al., FRONT-END SIMULATION FOR TWAC INJECTOR I4, Rev. of Sci. Instr. 79, 2008, 02B722.
14. a) A. Feschenko. Technique and Instrumentation For Bunch Shape Measurements. Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, pp. 181-185; b) A.Feschenko, S.Gavrilov. Methods for Bunch Shape Monitor Phase Resolution Improvement, Proc. of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, 25-30 September 2016, pp. 408-410.
15. A.I. Balabin and G.N. Kropachev, 6D-High Current Beam Matching at RFQ Entrance, Proceeding of the 4th European Particle Accelerator Conference, EPAC94, 27 June - 1 July, London 1994, pp.1180-1182.
16. Л.В. Григоренко, Б.Ю. Шарков, А.С. Фомичев, и др., Научные задачи перспективного ускорительно-накопительного комплекса для исследования радиоактивных изотопов DERICA, Успехи Физических Наук, 2019 (в печати); http://aculina.jinr.ru/derica.php

3.6. Оценка кадровых ресурсов.

Общее количество персонала в эквиваленте полной занятости, вовлечённого на данном этапе работ, составляет примерно 17 человек/год.

Персонально по институтам занятость групп представлена в Таблице 2.

Таблица 2. Оценка занятости персонала для выполнения основных этапов работ.

Наименование работ	Институт	Кол-во персонала / занятость (%)	Экв. полной занятости (чел./год)
Создание стенда тестового ECR-источника ионов и LINAC front-end; проектирование ECR-источника ионов 28 ГГц; концептуальный проект DERICA	ОИЯИ НИИЭФА ИЯФ СО РАН ИАП РАН НИЦ КИ – ИТЭФ МИФИ	12 / 25 2 / 25 8 / 25 1 / 30 2 / 25 1 / 20	26/4=6.5
Разработка и изготовление прототипа первой секции ускорителя с ПОКФ и системы формирования пучка с плазменной границы источника (LEBT)	ОИЯИ НИИЭФА ИЯИ РАН ВНИИТФ ВНИИЭФ НИЦ КИ - ИТЭФ	2 / 25 2 / 25 4 / 25 4 / 25 2 / 25 8 / 25	22/4=5.5
Разработка и изготовление прототипов системы транспортировки пучка (СП-резонаторы, стриперы и др.)	ОИЯИ ИЯИ РАН МИФИ НИЦ КИ – ИТЭФ ФТИ НАН	2 / 25 2 / 25 7 / 25 1 / 25 4 / 25	16/4=4.0
Детализация научной программы проекта DERICA для каждого этапа	ОИЯИ ИЯФ СО РАН КИ НИИЯФ МГУ	5 / 10 1 / 10 2 / 10 2 / 10	10/10=1
			Итого: 17