

СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

*М. В. Усанова¹, А. А. Акимова, Ю. Н. Гавриш, А. В. Галчук,
С. В. Григоренко, В. И. Григорьев, Р. М. Клопенков, К. А. Кравчук,
А. Н. Кужлев, В. Г. Мудролюбов, Ю. К. Осина, К. Е. Смирнов,
С. С. Цыганков, П. А. Шмидберский*

АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Разрабатываемый АО «НИИЭФА» циклотронный комплекс многозарядных ионов обеспечит генерацию, ускорение и практическое использование ионов с отношением массового числа к заряду $A/Z = 3-7$ (C, O, Ne, Si, Ar, Fe, Kr, Ag, Xe, Bi) в диапазоне значений энергии 8–15 МэВ/нуклон. Комплекс состоит из циклотрона с системой внешней инжекции, системы формирования и транспортировки пучков ускоренных ионов, системы облучения образцов и обеспечивающих систем. Представлена информация об изготовленных или находящихся на завершающей стадии изготовления узлах и системах комплекса.

The cyclotron system of multicharged ions developed by JSC “NIIEFA” will generate, accelerate and use C, O, Ne, Si, Ar, Fe, Kr, Ag, Xe, Bi ions with mass-to-charge ratio $A/Z = 3-7$ in the energy range of 8–15 MeV/nucleon. The complex consists of a cyclotron with an external injection system, a system for generating and transporting accelerated ion beams, a system for irradiating samples, and supporting systems. The information on the manufacturing status of the system is provided.

PACS: 29.20.Hm

ВВЕДЕНИЕ

Циклотронный комплекс многозарядных ионов, разработанный в научно-техническом центре линейных ускорителей и циклотронов АО «НИИЭФА», предназначен для проведения фундаментальных и прикладных исследований взаимодействий вещества с тяжелыми ионами. Работы по созданию циклотронного комплекса начаты в 2020 г. К настоящему времени проведены расчетно-теоретические работы, разработана конструкторско-технологическая документация, изготавливаются узлы и системы циклотронного комплекса многозарядных ионов. Комплекс состоит из циклотрона

¹E-mail: usanova@luts.niiefa.spb.su

Параметры циклотрона МЗИ

Параметр	Значение
Ускоряемые ионы	C, O, Ne, Si, Ar, Fe, Kr, Ag, Xe, Bi
Энергия ускоренных ионов, МэВ/нуклон	8–15
Отношение массового числа к заряду A/Z	3–7
Диаметр полюса электромагнита, мм	4000
Воздушные зазоры, холм/долина, мм	80/300
Угловая протяженность сектора, °	51
Индукция в центре, Тл	1,29–1,6
Масса магнита (Fe/Cu), т	870/63
Мощность питания основной обмотки, кВт	290
Количество корректирующих катушек	38
Мощность питания корректирующих катушек, не более, кВт	22
Количество дуантов	2
Рабочая частота, МГц	13–20
Способ регулирования	Однозвенные контактные панели
Мощность активных потерь в резонансной системе, не более, кВт	40
Система инжекции	Внешняя
Тип источников	ЭЦР и электронно-лучевой
Энергия инжекции на заряд, кэВ	12,4–28,9
ВВ-потенциал дефлектора, кВ	100
Система подъема верхней балки (полуярма)	Наличие
Магнитный канал:	
градиент в первой части, Тл/м	16
вторая и третья части	Квадруполи Sm ₂ Co ₁₇

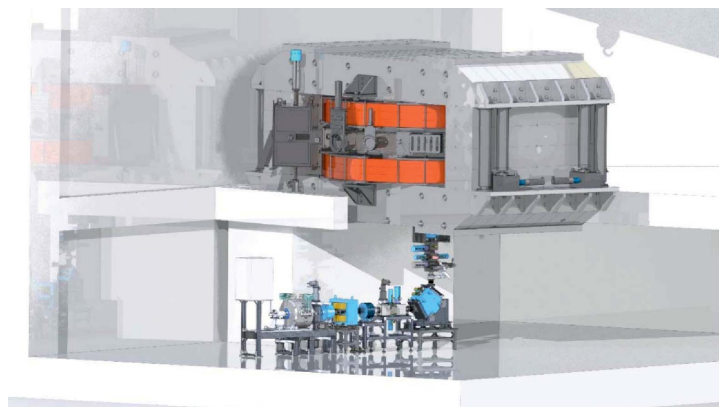


Рис. 1. Модель циклотрона МЗИ с системой внешней инжекции

с системой внешней инжекции, системы формирования и транспортировки пучков ускоренных ионов, системы облучения образцов и обеспечивающих систем. Параметры циклотрона МЗИ представлены в таблице, размещение оборудования циклотронного комплекса — на рис. 1.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Магнитопровод электромагнита Ш-образного типа сборной конструкции (рис. 2, а). Максимальная масса отдельной детали не более 28 т. Магнитопровод изготавливается в ООО «НПО ГКМП», Брянск. Завершено изготовление полюсов, верхнего и нижнего полуярем (рис. 2, б, в). Контрольная сборка запланирована на ноябрь 2022 г.

Основная обмотка и комплект корректирующих катушек изготавливаются в АО «НИИЭФА». Для основной обмотки выбран полый проводник из бескисло-

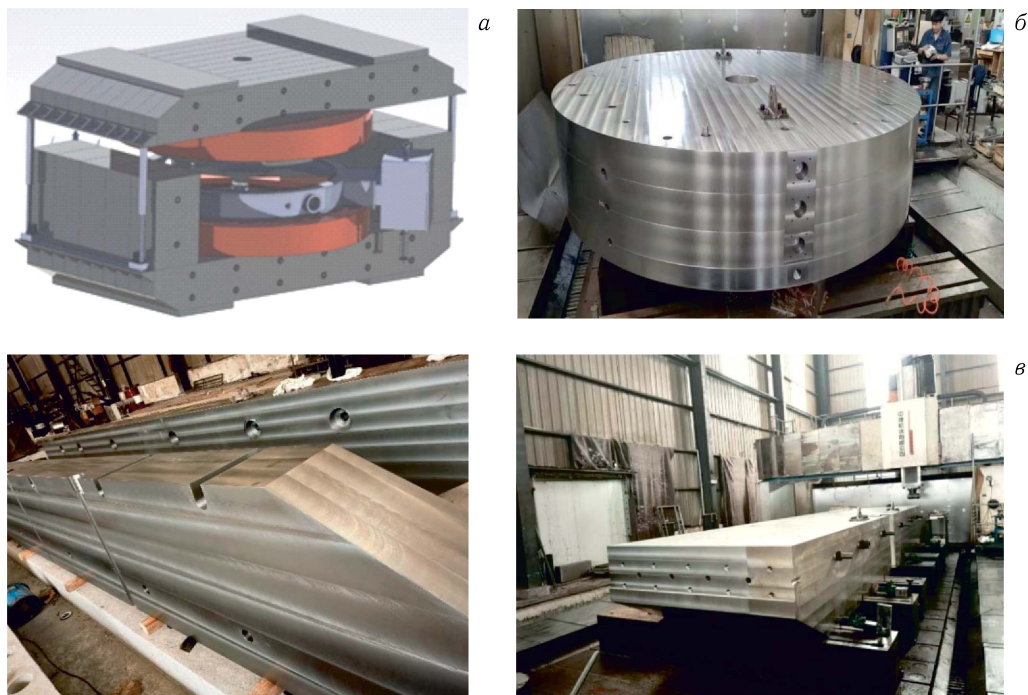


Рис. 2. а) Модель электромагнита. б) Детали полюса. в) Детали верхнего и нижнего ярем



Рис. 3. Намотка секций основных катушек циклотрона

родной меди $29 \times 29/\varnothing 16$ мм. На сегодня намотано 9 секций из 18 (рис. 3). Для подстройки распределения магнитного поля по радиусу и корректировки азимутальных неоднородностей разработаны и изготавливаются радиальные и азимутальные корректирующие катушки.

После завершения изготовления катушки будут транспортироваться в ГКМП для установки в электромагнит и формирования магнитного поля.

ВАКУУМНАЯ КАМЕРА

Камера представляет собой сварную конструкцию из титанового сплава. Верхняя крышка камеры крепится к верхнему полюсу магнитопровода и при подъеме верхнего полуярма дает доступ к оборудованию вакуумной камеры (рис. 4). Изготавливается в ООО «НПО ГКМП» (рис. 5).



Рис. 4. Модель вакуумной камеры

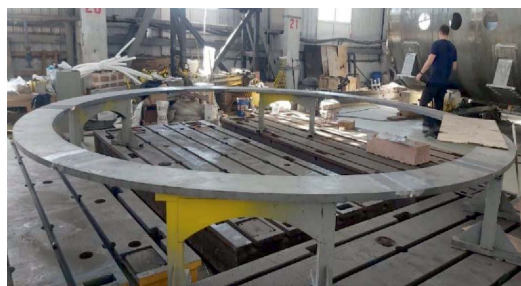


Рис. 5. Камера в процессе изготовления

НАВЕСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В состав оборудования вакуумной камеры входят: три пробника, электростатический дефлектор и магнитный канал. Дефлектор и магнитный канал оснащены оперативными регулировками с помощью электроприводов. Сроки завершения изготовления: пробников — ноябрь 2022 г., дефлектора и магнитного канала — 2-й квартал 2023 г.

РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА

Резонансная система состоит из двух зеркально-симметричных резонаторов, гальванически связанных вблизи оси электромагнита. Каждый резонатор является четвертьволновой коаксиальной линией с проводниками переменного сечения. Оперативное регулирование частоты осуществляется за счет изменения волнового сопротивления части линии вблизи закорачивающего фланца с помощью однозвенных панелей (рис. 6).

Изготовление находится на завершающей стадии. Изготовлены и смонтированы дуанты с дуантными штоками и каркасами из алюминиевого профиля (рис. 7). Изготовлены вакуумные баки, плакировки, контактные панели, комплект шариковых

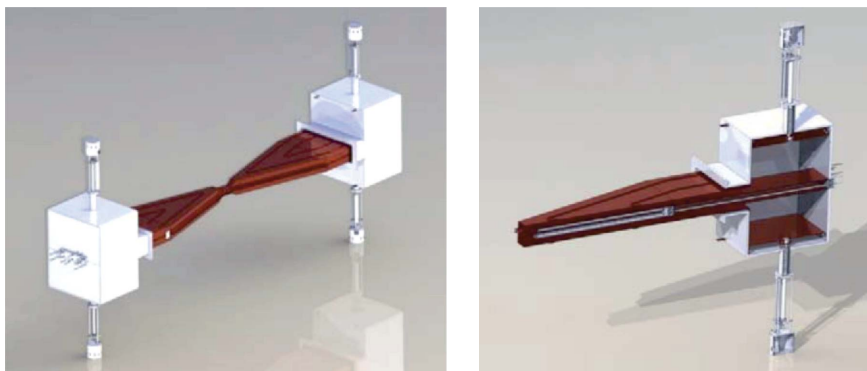


Рис. 6. Модель резонансной системы



Рис. 7. Дуанты и дуантные штоки резонансной системы

контактов, триммеры АПЧ, кондуктивный ввод ВЧ-мощности. Проведены испытания на компенсацию прогиба дуантов с помощью натяжных шпилек. После завершения изготовления будет проведена сборка резонансной системы на стенде и радиотехнические измерения. Начало сборки запланировано на январь 2023 г.

СИСТЕМА ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ

Система внешней инжекции размещается в подвальном помещении под циклотроном и состоит из горизонтального и вертикального участков. В состав горизонтального участка входят источники ионов (ЭЦР, электронно-лучевой), коммутирующий электромагнит, устройства предварительного формирования пучка, диагностики и вакуумной откачки.

Между участками СВИ устанавливается анализирующий 90° -й электромагнит, обеспечивающий выделение ионов нужной зарядности. Вертикальный участок оснащен соленоидами, корректирующими электромагнитами, средствами диагностики, вакуумной откачки и спиральным инфлектором.

ЭЦР-источник 14 ГГц разработан и изготавливается в АО «НИИЭФА», магнитная система состоит из гексаполя на постоянных магнитах и «теплого» соленоида. Планируется использовать для получения ионов до Хе. Систему СВЧ-питания изготавливает НИИ «Феррит Домен».

Основной частью электронно-лучевого источника является сверхпроводящий соленоид с индукцией 5 Тл. Соленоид изготавливает АО «НИИЭФА», криогенную систему для соленоида — ИЯФ, Новосибирск. Электронно-лучевую пушку изготавливает НПП «Торий».

Автономные испытания источников ионов, а также сборка тракта системы внешней инжекции на стенде АО «НИИЭФА» намечены на середину 2023 г.

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Система транспортировки комплектуется из стандартных узлов — электромагнитов и квадрупольных линз, представленных на рис.8–10. В нее также входят: блоки диагностики с цилиндром Фарадея и датчиком плотности пучка, коллиматоры и диафрагмы, специальные устройства диагностики ионных пучков малой интенсивности.



Рис. 8. Электромагнит коммутирующий

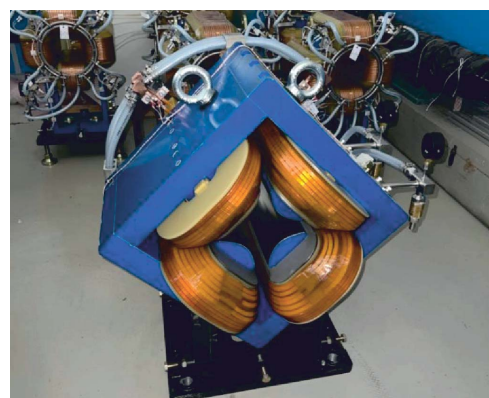


Рис. 9. Линза электромагнитная



Рис. 10. Электромагнит корректирующий

ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Системы электропитания, ВЧ-питания и водяного охлаждения исполняются по традиционным для циклотронов АО «НИИЭФА» схемам.

Систему питания электромагнитов изготавливает АО «НИИ Электромера», Санкт-Петербург (общее число стоек 12 шт.). Система поставлена в АО «НИИЭФА», проводятся пусконаладочные работы.

К вакуумной системе предъявляются особые требования, вызванные необходимостью минимизации потерь интенсивности многозарядных ионов. К настоящему времени приобретены криогенные и форвакуумные насосы, проводятся закупки турбомолекулярных насосов и запорно-регулирующей арматуры.

Циклотронный комплекс полностью автоматизирован. Система автоматизированного управления обеспечивает мониторинг, диагностику и управление работой циклотрона и связанных с ним систем, в том числе системы облучения образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плановый срок изготовления и автономных заводских испытаний оборудования циклотронного комплекса — конец 2023 г. Определенные опасения вызывают проблемы с поставкой отдельных материалов и комплектующих изделий импортного производства, в частности, высоковольтных источников с высокой стабильностью, проводника полого медного, вакуумных датчиков, радиоэлектронных изделий, вакуумной техники. Возникают трудности с подбором аналогов комплектующих производства России или стран Азии, это приводит к переработке конструкторской документации и увеличению сроков и стоимости изготовления.

Тем не менее к настоящему времени явных задержек в изготовлении оборудования нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Osina Yu. K., Akimova A. A., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov M. L., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhev I. I., Mudrolyubov V. G., Smirnov K. E., Stogov Yu. I., Tsygankov S. S., Usanova M. V.* Cyclotron of Multicharged Ions // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. P. 96–98.

Получено 18 ноября 2022 г.