

## **МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ И ПРИКЛАДНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

*Р. М. Клопенков, З. А. Андреева, А. В. Ванин, О. Л. Вересов,  
Ю. Н. Гавриш<sup>1</sup>, А. В. Галчук, С. В. Григоренко, В. И. Григорьев,  
Ю. В. Зуев, М. Л. Клопенков, Л. Е. Королев, К. А. Кравчук,  
А. Н. Кужлев, И. И. Межов, А. Г. Мирошниченко, В. Г. Мудролюбов,  
Г. В. Муравьев, Ю. К. Осина, К. Е. Смирнов,  
М. В. Усанова, С. С. Цыганков*

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

В НИИЭФА разработан и изготовлен циклотронный комплекс на базе модернизированного циклотрона МСС-30/15. Комплекс оснащен разветвленной системой транспортировки пучков ускоренных протонов и дейтронов, мишенным комплексом и специализированной системой облучения образцов пучками протонов. Мишенный комплекс обеспечивает коммерческую наработку радионуклидов в твердой фазе и их доставку в радиохимические лаборатории пневмопочтой.

JSC NIIIEFA developed and manufactured the cyclotron system based on the updated MСС-30/15 cyclotron. The cyclotron system is equipped with the branched beam transport system, target system and specialized proton beam irradiation system. Target system is designed for commercial production of solid phase radionuclides and their delivery to radiochemical laboratories.

PACS: 29.20.dg

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из важнейших задач ядерной медицины является повышение эффективности диагностических обследований пациентов. К настоящему времени реализовано серийное производство оборудования для диагностики, наработки чистой радионуклидной продукции и современных радиофармпрепаратов. Постепенно сокращается время и стоимость проведения процедур. Однако реальный прогресс может быть достигнут только за счет создания ядерно-физических центров, обеспечивающих как коммерческое производство радионуклидной продукции, так и проведение научных исследований, направленных на изучение новых препаратов, методик и областей их применения.

---

<sup>1</sup>E-mail: npkluts@luts.niiefa.spb.su

Один из таких центров в 2020 г. должен быть открыт в Институте ядерных технологий Королевства Таиланд [1]. Циклотронный комплекс для этого центра разработан и изготовлен АО «НИИЭФА». В состав комплекса входят циклотрон, разветвленная система транспортировки ускоренных пучков, мишенный комплекс, система транспортировки облученных мишеней в защитные боксы радиохимических лабораторий, система облучения образцов и обеспечивающие системы.

При разработке проведена глубокая модернизация циклотрона, экспериментальный образец которого, МСС-30/15, поставлен в Университет г. Ювьяскюля (Финляндия) в 2009 г. [2]. Главная цель модернизации состояла в повышении интенсивности пучков ускоренных ионов и надежности работы установки в целом, что потребовало, в частности, устранить ряд дефектов, выявленных при эксплуатации экспериментального образца.

Основные результаты модернизации: обеспечено расширение диапазона энергий выпущенного пучка протонов и увеличение его тока, улучшены эксплуатационные характеристики резонансной системы, разработан собственный ВЧ-генератор, применена система питания электромагнитов и квадрупольных линз отечественного производства (АО «Электромера»).

Мишенный комплекс, оснащенный устройствами для производства радионуклидов в твердой фазе, система транспортировки облученных мишеней в защитные боксы и система облучения образцов разработаны впервые в практике АО «НИИЭФА».

## **1. ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЦИКЛОТРОНА**

Сохранены технические решения, характерные для современных циклотронов НИИЭФА: броневое исполнение электромагнита с вертикальным расположением медианной плоскости и совмещением функций магнитопровода и вакуумной камеры. Расширен диапазон энергий ускоренных протонов (15–30 МэВ) за счет модернизации магнитной структуры. Новая конструкция шимм позволила избавиться от стационарных накладок в долинах, предназначенных для размещения резонансной системы.

## **2. РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА**

Резонансная система разработана заново с целью улучшения ее эксплуатационных характеристик при сохранении основных размеров. Дуант, дуантный шток и закорачивающий фланец каждого резонатора состоят из двух толстостенных медных деталей, симметричных относительно медианной плоскости, устранены каркасы штоков. Контактные соединения плакировок и закорачивающих фланцев вынесены из внутренних объемов резонаторов. Модель резонансной системы с вводом ВЧ-мощности и триммером АПЧ и размещение системы в корпусе вакуумной камеры представлены на рис. 1, 2 соответственно.

Собственная добротность резонансной системы  $\sim 5000$  (в экспериментальном образце циклотрона — около 4000).

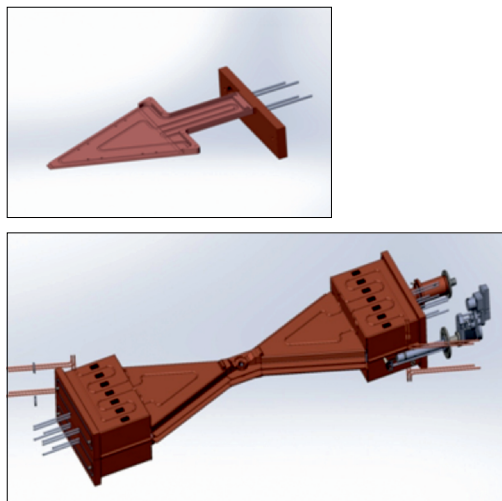


Рис. 1. Модель резонансной системы

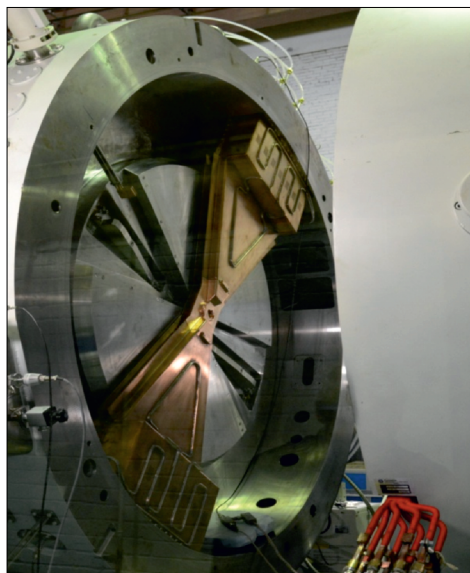


Рис. 2. Резонансная система в вакуумной камере

### 3. СИСТЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПИТАНИЯ

Впервые для циклотронов серии СС система полностью разработана АО «НИИЭФА». В стойке ВЧ-генератора (рис. 3) размещены: окончный и предоконечный каскады усиления, предварительный усилитель с источником питания, модуль управления и стабилизации, блок ВЧ-питания банчера, система управления, контроля, защиты и измерений, устройство питания с комплектом коммутационной аппаратуры. Источник высоковольтного питания с выпрямителями и анодными фильтрами установлен в отдельной стойке (рис. 4).

Рабочая частота ВЧ-системы — 40,68 МГц, выходная ВЧ-мощность не менее 30 кВт. Передача мощности в резонансную систему осуществляется через гибкий коаксиальный фидер с воздушной изоляцией.

### 4. СИСТЕМА ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ

Модернизирована газоразрядная камера источника ионов, дополнительно введен плазменный электрод, увеличена энергия инжектируемых ионов до 22/11 кэВ, изменена конструкция банчера. При автономных испытаниях (без банчера и инфлектора) на токоприемнике в медианной плоскости электромагнита зафиксирован ток ионов  $H^- \sim 2$  мА.



Рис. 3. Стойка ВЧ-генератора со снятыми стенками



Рис. 4. Стойка высоковольтного питания

## 5. СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ

Система транспортировки построена на базе стандартных электромагнитов, квадрупольных линз и диагностических устройств, разработанных НИИЭФА. Система должна обеспечить доставку пучков в три отдельных радиационно-защитных помещения, как показано на рис. 5.

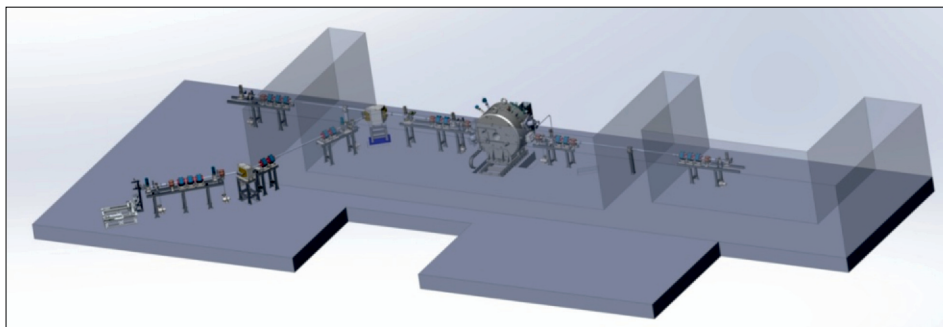


Рис. 5. Схема размещения оборудования трактов транспортировки

На прямых направлениях устанавливаются идентичные мишенные устройства для производства радионуклидов в твердой фазе.

Третий тракт транспортировки пучка предназначен для программы научных исследований и должен обеспечить формирование пучка с высоким энергетическим разрешением и возможностью регулирования в широких пределах тока и площади поперечного сечения пучка. Это требование реализовано за счет использования анализатора, состоящего из поворотного электромагнита, двух коллиматоров и диафрагмы. Тракт оснащен коммутирующим электромагнитом, обеспечивающим пять возможных направлений дальнейшей транспортировки пучка, что создает перспективу расширения программы научных исследований. Первое из этих направлений будет использовано для программы облучения образцов с выпуском пучка в атмосферу.

## **6. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ (САУ)**

САУ осуществляет мониторинг, диагностику и управление работой циклотронного комплекса и всех связанных с ним систем, в том числе мишенного комплекса, а также связь между системами. При нарушении нормальных условий эксплуатации фиксируется оборудование, где имеет место нештатная ситуация, отключается режим работы с пучком или производится аварийное отключение циклотрона без повреждения оборудования. Обеспечен удаленный доступ в систему управления с гарантированной идентичностью информации, отображаемой на мониторах рабочего места оператора и в помещении, указанном руководством заказчика.

## **7. МИШЕННЫЙ КОМПЛЕКС**

Мишенный комплекс обеспечивает наработку радионуклидов, мишенное вещество которых находится в твердом состоянии. С целью полной автоматизации процесса выбрана концепция использования мишеней (фольга, порошок, гальванический слой и др.), заключенных в транспортные шаттлы. Шаттлы решают проблемы удержания и охлаждения подложек при облучении, а также служат контейнерами для транспортировки подложек из радиохимических лабораторий к мишенным устройствам и (после облучения) в обратном направлении. Транспортировка осуществляется воздухом, циркулирующим по замкнутому циклу. Система пневматической транспортировки оснащена четырех- и двухпозиционными маршрутизаторами направлений. Выбор конкретной комбинации маршрутизаторов позволяет реализовать доставку шаттлов в любое необходимое количество приемных станций.

## **8. СИСТЕМА ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ**

Система облучения образцов (R&D) реализует вывод пучка протонов из тракта транспортировки в атмосферу и коллимацию пучка непосредственно перед образцами. Обеспечено перемещение образцов массой до 60 кг по трем осям координат и их вращение с погрешностями не более  $\pm 0,1$  мм и  $\pm 1^\circ$  соответственно. Возможно

одновременное сканирование образца по четырем осям как в автоматическом, так и в ручном режиме. Система оснащена модулем лазерного позиционирования. Визуальный контроль процесса облучения осуществляется с помощью телевизионной камеры, температура образцов определяется инфракрасным пирометром.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Завершено изготовление и автономные испытания оборудования циклотронного комплекса, запланированы заводские приемосдаточные испытания. Размещение циклотрона на испытательном стенде представлено на рис. 6.

Созданный АО «НИИЭФА» циклотронный комплекс предназначен для крупных ядерно-физических центров, производящих радионуклидную продукцию в коммерческих масштабах. Центр может быть дополнительно оснащен оборудованием для наработки радионуклидов в жидкой и газовой фазах, также разработанным АО «НИИЭФА».

Циклотронный комплекс позволяет реализовать широкий круг научно-исследовательских программ, а также коммерческую наработку перспективной радиоизотопной продукции. Кроме того, особый интерес представляют работы по изучению радиационного воздействия на радиоэлектронные компоненты и блоки и по радиационному материаловедению с использованием высокоэнергетических потоков ионов водорода, нейтронов и гамма-излучения.

Модульное исполнение системы транспортировки, системы облучения образцов, мишенных устройств, а также средств доставки наработанной активности предостав-

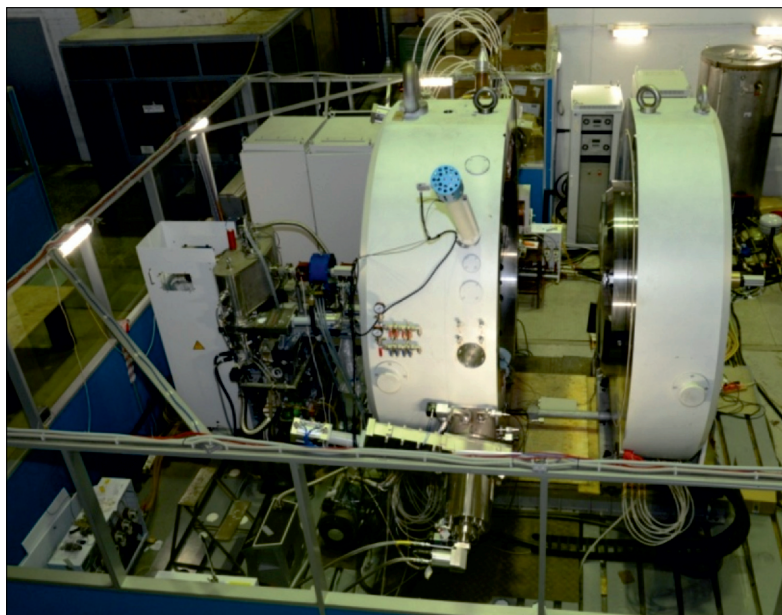


Рис. 6. Циклотрон на стенде приемосдаточных испытаний

ляет конкретным заказчикам свободный выбор количества и назначения конечных портов с мишенными устройствами и системами облучения образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Osina Yu. K. et al.* Cyclotron System for Thailand Institute of Nuclear Technology // Proc. of RuPAC'2018, Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 233–235.
2. *Bogdanov P. V. et al.* MCC-30/15 Cyclotron — Parameters, Adjusting Works and Their Results // Proc. of RuPAC-2010, Protvino, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2010. P. 408–410.