

## ТЕКУЩИЕ ПРОЕКТЫ ЦИКЛОТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НИИЭФА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОНУКЛИДОВ

*К. Е. Смирнов<sup>а</sup>, А. А. Акимова<sup>а</sup>, Ю. Н. Гавриш<sup>а</sup>, И. В. Горбунов<sup>а</sup>,  
С. В. Григоренко<sup>а</sup>, К. А. Кравчук<sup>а</sup>, Р. М. Клопенков<sup>а</sup>, А. Н. Кужлев<sup>а</sup>,  
В. Г. Мудролюбов<sup>а</sup>, Ю. К. Осина<sup>а</sup>, М. В. Усанова<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, 196641, Россия

АО «НИИЭФА» в течение ближайших двух лет должно изготовить и поставить три циклотронных комплекса для производства радионуклидов.

Over the next two years, JSC NIIIEFA is to manufacture and supply three cyclotron systems for the production of radionuclides.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

Циклотронный комплекс СС-18П, создаваемый на базе циклотрона с энергией протонов в диапазоне 12–18 МэВ и током пучка 150 мкА, обеспечит производство ультракороткоживущих радионуклидов  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{68}\text{Ga}$  и короткоживущих радионуклидов  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{123}\text{I}$  в Восточно-Сибирском онкологическом центре (Иркутск).

Циклотронный комплекс СС-30П с энергией ускоренных протонов 15–30 МэВ и током выведенного пучка 300 мкА создается для Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург). Комплекс предназначен для производства более широкого спектра радионуклидов:  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ ,  $^{89}\text{Zr}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ .

В Радиевый институт им. В. Г. Хлопина (Санкт-Петербург) будет поставлен циклотронный комплекс СС-30/15 с энергией протонов и дейтронов 15–30/8–15 МэВ и током выведенных пучков 400/50 мкА соответственно. Комплекс оснащается системой транспортировки пучков к четырем конечным портам, три из которых являются мишенными устройствами для наработки радионуклидов в твердой фазе, а четвертый — резервным.

### ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС СС-18П

АО «НИИЭФА» разработаны и поставлены конечным пользователям четыре комплекса на базе циклотронов СС-18/9 [1, 2]. Циклотроны обеспечивают ускорение отрицательных ионов водорода и дейтерия с выпуском пучков протонов и дейтронов за счет перезарядки при прохождении обдирочной фольги. В трех первых моделях корректировка топологии магнитного поля при изменении типа ускоряемых

ионов осуществляется за счет 16 шиммов, размещенных в секторах электромагнита. Резонансная система представляет собой резонатор, содержащий два дуанта и два штока, имеющих вблизи закорачивающего фланца общую часть. Регулирование энергии ионов не предусматривается. Четвертый циклотрон, СС-18/9М, поставленный в АО «НИИТФА» (Москва), обеспечивает регулирование энергии ускоренных протонов/дейтронов в диапазонах 12–18/6–9 МэВ соответственно. Для корректировки магнитного поля используются четыре поворотных шимма, размещенные в двух долинах. Резонансная система состоит из двух зеркально-симметричных резонаторов, баки которых частично выступают из магнитопровода.

В текущем проекте сохранена преимущество по основным техническим решениям, апробированным при создании циклотронов СС-18/9:

- бронеовое исполнение основного электромагнита с вертикальным расположением медианной плоскости;
- использование вакуумной камеры в качестве части обратного магнитопровода электромагнита;
- оснащение циклотрона системой внешней инжекции;
- ускорение отрицательных ионов с выпуском пучка из циклотрона практически без потерь за счет перезарядки на тонкой углеродной фольге.

В связи с отсутствием потребности в ускоренных дейтронах исключены шиммы с приводами. Конструкция секторов откорректирована с учетом исключения шиммов. Для размещения резонансной системы в вакуумной камере (рис. 1) увеличена высота корпуса камеры при сохранении зазора между полюсными наконечниками.

Основное оборудование комплекса: циклотрон, система транспортировки пучка и мишенные устройства — размещается в одном помещении с биологической защитой. Ввиду ограниченных размеров помещения ( $9,9 \times 5,5$  м) одно из мишенных устройств, предназначенное для получения радионуклида фтор-18, установлено в непосредственной близости от электромагнита, причем энергия протонов фиксированная, 18 МэВ. Выпуск протонов в оппозитном направлении осуществляется в диапазоне энергии 12–18 МэВ. Система транспортировки обеспечивает формирование и доставку пучка

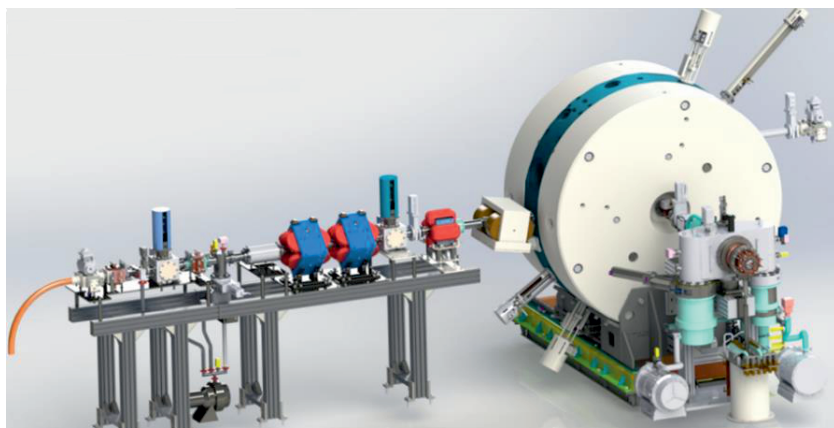


Рис. 1. Размещение основного оборудования циклотронного комплекса СС-18П

к роботизированной станции облучения. Последняя предназначена для автоматизированной установки под пучок четырех мишенных устройств для наработки радионуклидов со стартовыми веществами в жидком (фтор-18, галлий-68), газовом (углерод-11) и твердом (медь-64, йод-123) состоянии. Размещение основного оборудования комплекса показано на рис. 1.

Предусмотрена автоматизированная доставка облученного мишенного вещества в жидком и газовом состоянии в горячие боксы по капиллярным магистралям. Система пневматической транспортировки обеспечит доставку мишенных шаттлов со стартовым веществом в твердом состоянии из радиохимической лаборатории в мишенные устройства и после облучения — в горячие боксы.

### ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС СС-30П

Особенностью проекта является требование разместить циклотронный комплекс в помещениях, документация которых практически определена и разрабатывалась под циклотронный комплекс фирмы ИВА с электромагнитом горизонтального исполнения. В связи с этим уровень пола в помещении с биологической защитой примерно на 1,5 м ниже поверхности земли. Размещение основного оборудования показано на рис. 2.

Аналогом основного электромагнита является электромагнит циклотрона СС-30/15, поставленного в Таиландский институт ядерных технологий (Бангкок) [3]. Конструкция электромагнита откорректирована с учетом отсутствия поворотных шиммов.

Циклотрон обеспечивает одновременный выпуск в оппозитных направлениях двух пучков ускоренных протонов с энергией в диапазоне 15–30 МэВ. Тракты транспортировки пучков к конечным портам построены с использованием стандартного фокусирующего и диагностического оборудования АО «НИИЭФА».

В качестве конечных устройств используются роботизированные станции облучения, содержащие семь мишенных устройств: четыре для стартовых веществ в твердом состоянии (наработка радионуклидов медь-64, галлий-68, цирконий-89, йод-123), два для наработки фтора-18 и одно для наработки углерода-11. Комплекс оснащен

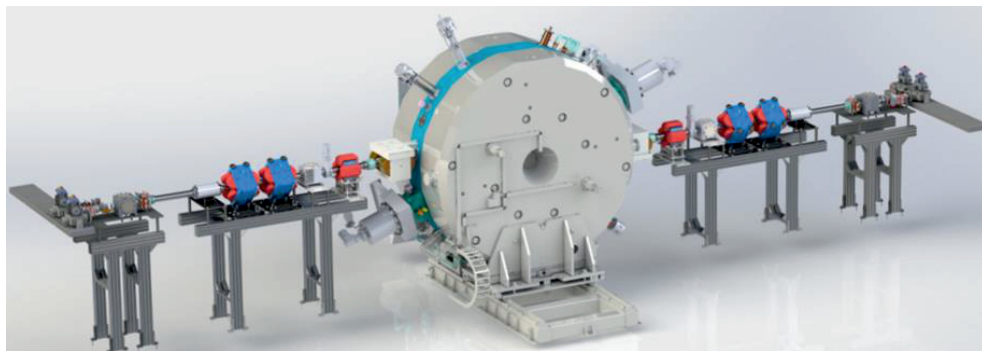


Рис. 2. Размещение основного оборудования циклотронного комплекса СС-30П

автоматизированными системами транспортировки радионуклидов в жидком, газовом и твердом состоянии.

### ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС СС-30/15

Циклотронный комплекс СС-30/15 в Радиовом институте им. В. Г. Хлопина предназначен исключительно для наработки радионуклидов в твердой фазе. Комплекс будет размещен в трех радиационно-защитных помещениях: конечные участки системы транспортировки пучка и мишенные станции — в отдельных мишенных бункерах. Размещение основного оборудования представлено на рис. 3.

Аналогом основного электромагнита также является электромагнит циклотрона СС 30/15, поставленного в Таиландский институт ядерных технологий. В связи с увеличением тока пучка ускоренных протонов в конструкцию электромагнита внесен ряд изменений: увеличены диаметр осевого канала и зазор между секторами, изменены форма магнитных пробок и расстояние между ними.

Выпуск пучков протонов и дейтронов осуществляется в двух противоположных направлениях в два тракта транспортировки. Каждый тракт включает в свой состав:

- канал транспортировки, непосредственно примыкающий к электромагниту циклотрона и заканчивающийся электромагнитом с углом поворота  $90^\circ$ ;
- перпендикулярный канал транспортировки, проходящий сквозь стену между бункером циклотрона и мишенным бункером, от электромагнита с углом поворота  $90^\circ$  до электромагнита с углом поворота  $65^\circ$ .

Оба электромагнита с углом поворота  $65^\circ$  оснащены вакуумными камерами с фланцами, рассчитанными на прямой пролет ионов и пролет с поворотом на  $65^\circ$  (при включенном электромагните). К фланцам каждого электромагнита крепятся фланцы двух каналов формирования пучка, содержащих корректирующий электромагнит, wobлер, блок диагностики, коллиматоры и вакуумное оборудование.

На прямых направлениях устанавливаются мишенные устройства, рассчитанные на прием пучка протонов с током до 200 мкА, для наработки радионуклидов гер-



Рис. 3. Размещение основного оборудования циклотронного комплекса СС-30/15

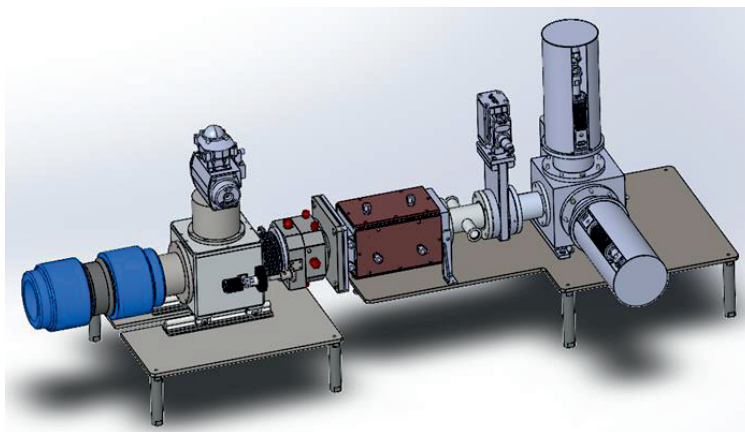


Рис. 4. Мишенное устройство

маний-68 и палладий-103. Планируемое время облучения — 400 и 200 ч соответственно. На одном из боковых направлений устанавливается мишенное устройство, рассчитанное на прием пучка протонов с током до 100 мкА, для наработки радионуклидов медь-64, галлий-67, йод-123. Диаметры зон облучения, формируемые для пучков с токами 200 и 100 мкА, — 30 и 12 мм соответственно. Шаттлы для мишеней, реализующих наработку палладия и германия, имеют  $\varnothing 62,5$  мм, длину  $\sim 100$  мм. Шаттлы для прочих изотопов существенно меньше,  $\varnothing 30$  мм, длина 62 мм. Мишенные устройства контролируют параметры пучка при настройке режима, фиксируют и удерживают мишенные шаттлы с мишенным веществом при облучении пучком, обеспечивают гелиевое и водяное охлаждение, контролируют критические параметры охлаждающей воды и потока гелия. Мишенные устройства идентичны по массогабаритным характеристикам и отличаются только полостями для размещения шаттлов. Модель мишенного устройства с блоком диагностики, вакуумным затвором и коллиматором представлена на рис. 4.

Система пневматической транспортировки должна обеспечивать доставку шаттлов с подготовленными мишенями из радиохимической лаборатории к мишенным устройствам и облученных мишеней из мишенных устройств в радиохимическую лабораторию. Аналогичная система для шаттлов  $\varnothing 30$  мм успешно испытана при длине магистралей до 50 м и различных конфигурациях маршрутизаторов, соединителей и приемных шлюзов.

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ ЦИКЛОТРОНОВ

Для создаваемых циклотронов выбрана рабочая частота 40,68 МГц, разрешенная Государственной комиссией по радиочастотам, для использования в промышленных, научных и медицинских устройствах. Ускорение ионов водорода осуществляется на второй гармонике частоты обращения, ионов дейтерия — на четвертой гармонике.

Резонансные системы состоят из двух зеркально-симметричных резонаторов, размещенных в оппозитных долинах и гальванически соединенных в центральной обла-

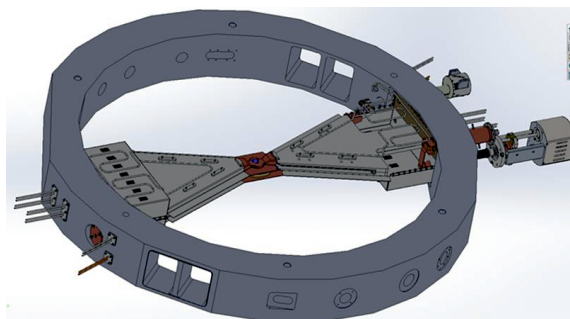


Рис. 5. Резонансная система в корпусе вакуумной камеры

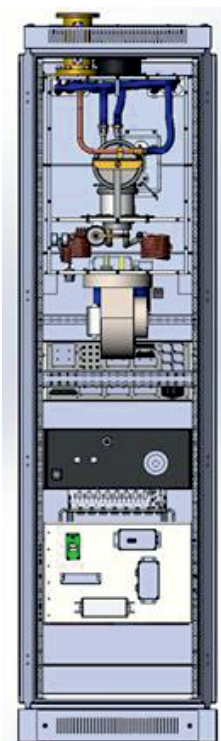


Рис. 6. Шкаф ГВЧ

сти. Дуант, дуантный шток и закорачивающий фланец состоит из двух частей, симметричных относительно медианной плоскости. Полудуант и полушток изготовлены в виде единой фрезерованной детали и приварены к полузакоротке. Внешний проводник состоит из двух плакировок упрощенной формы — все углы сгиба прямые, каждая изготавливается из одного листа. Разъемный контакт реализуется по периметру закорачивающего фланца. Каждая резонансная система оснащена триммером АПЧ, конденсатором ручной подстройки, устройством индуктивного ввода ВЧ-мощности, индуктивным датчиком ВЧ. Высокочастотная мощность передается от ВЧ-генератора к резонатору по гибкому коаксиальному фидеру. В связи с тем, что мощность выпущенных пучков протонов в циклотронах СС-30П и СС-30/15, 9 и 12 кВт, сравнима с мощностью активных потерь в их резонансных системах (порядка 15 кВт), последние дополнительно обеспечены устройством оперативного регулирования связи с ВЧ-генератором. Устройство представляет собой П-образную пластину с электромеханическим приводом, установленную с возможностью частичного экранирования петли связи. В рабочих режимах пластина автоматически перемещается в положение, соответствующее минимальному значению КСВН [4]. Модель резонансной системы представлена на рис. 5.

Системы высокочастотного питания для всех проектов идентичны, выходная мощность 40 кВт принята с запасом.

Оборудование ВЧ-системы разделено на две составные части: шкаф генератора высокой частоты — ГВЧ (рис. 6, стенка снята) и высоковольтный источник инверторного типа. В шкафу ГВЧ размещаются: оконечный каскад на базе генераторного триода 3CW40.000H3, транзисторный усилитель с выходной мощностью 2,5 кВт, блок управления ВЧ-системой, блок питания банчера, накальный трансформатор, измерители анодного тока и тока накала генераторного триода, драйверы приводов триммера и П-образной пластины, коллектор водяной, коммутирующая аппаратура и прочее оборудование.

Блок управления ВЧ-системой обеспечивает генерацию и модуляцию ВЧ-сигнала, выполняет функции измерения параметров, включения и выключения ВЧ-системы. Блок принимает и анализирует информацию от рефлектометров и датчика ВЧ, установленного в резонансной системе, и на этой основе вырабатывает сигналы ошибки для стабилизации частоты резонансной системы и амплитуды ускоряющего напряжения.

Высоковольтный источник предназначен для анодного питания генераторного триода постоянным током при максимальном напряжении 12 кВ и мощности до 80 кВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени согласовано с заказчиками размещение оборудования циклотронных комплексов в строящихся для этого помещениях. Разработана заново или откорректирована значительная часть рабочей документации. Начато изготовление оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В. П., Богданов П. В., Васильченко И. Н., Ворогушин М. Ф., Григоренко С. В. и др. Медицинский компактный циклотрон СС-18/9 // XI Междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине: Сб. докл., Санкт-Петербург, 10–14 окт. 2005 г. С. 237–239.
2. Strokach A. P., Veresov O. L., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Emeljanov M. A., Klopenkov M. L., Kuzhlev A. N., Mudrolyubov V. G., Muraviov G. V., Nikishkin V. I., Ponomarenko V. I., Stogov Yu. I., Tsygankov S. S. CC-18/9M Cyclotron System // XXIV Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2014), Obninsk, Russia, Oct. 6–10, 2014.
3. Osina Yu. K., Andreeva Z. A., Galchuck A. V., Gavrish Yu. N., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov M. L., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhev I. I., Miroshnichenko A. G., Mudrolyubov V. G., Muraviov G. V., Ponomarenko V. I., Smirnov K. E., Tsygankov S. S., Usanova M. V., Vanin A. V., Veresov O. L., Zuev Yu. V. Cyclotron System for Thailand Institute of Nuclear Technology // Proc. XXVI Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2018), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 233–235.
4. Патент на изобретение № 2793307, приоритет от 17.09.2021 г. Устройство оперативного регулирования связи резонансной системы циклотрона с системой высокочастотного питания / В. Г. Мудролюбов, К. Е. Смирнов.

Получено 28 октября 2024 г.