

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА Ц-80

*П.В. Богданов¹, Ю.Н. Гавриш¹, А.В. Галчук¹, С.В. Григоренко¹, В.И. Григорьев¹,
Ю.Д. Меньшов¹, В.Г. Мудролюбов¹, В.И. Пономаренко¹, А.П. Строкач¹, С.С. Цыганков¹,
С.А. Артамонов², Е.М. Иванов², Г.Ф. Михеев², Г.А. Рябов², В.М. Самсонов²*

¹*ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия*

E-mail: npkluts@niiefa.spb.su;

²*Учреждение Российской академии наук «Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова РАН», Гатчина Ленинградской обл., Россия*

E-mail: ivanovet@npi.spb.ru

Циклотронный комплекс Ц-80 предназначен для получения протонных пучков с энергией 40...80 МэВ и током до 200 мкА. Циклотрон обеспечит производство широкого спектра изотопов медицинского назначения в коммерческих масштабах, проведение протонной лучевой терапии глаза и поверхностных форм онкологических заболеваний, а также возможность фундаментальных и прикладных исследований. Циклотрон Ц-80 предполагается использовать в качестве инжектора синхротрона С-230, осуществляющего доускорение выведенного протонного пучка до энергий порядка 230 МэВ, что позволит проводить протонную терапию онкологических заболеваний по методикам, основанным на использовании пика Брэгга.

С сентября 2010 г. НИИЭФА им. Д.В. Ефремова и ПИЯФ им. Б.П. Константинова ведут работы по созданию циклотронного комплекса Ц-80. Комплекс предназначен для производства изотопов, протонной лучевой терапии глаза и поверхностных форм онкологических заболеваний, а также для фундаментальных и прикладных исследований. Кроме того, циклотрон предполагается использовать в качестве инжектора синхротрона С-230, обеспечивающего доускорение протонного пучка до энергий порядка 230 МэВ, что позволит проводить протонную терапию онкологических заболеваний по методикам, основанным на использовании пика Брэгга [1].

Бурное развитие современных методов ядерной медицины определило существенное увеличение спроса на радиоизотопную продукцию, используемую как в диагностических, так и в терапевтических целях.

Отмечается стремительный рост диагностических медицинских исследований, проводимых на позитронно-эмиссионных томографах (ПЭТ), в которых используются радиофармпрепараты на базе радиоизотопов с периодом полураспада от нескольких секунд до нескольких минут. Естественно, что подобного рода исследования могут проводиться в непосредственной близости от циклотронных комплексов, что определяет возможность реализации данной методики только в крупных административных центрах.

Выход из данной ситуации может обеспечить использование стронций-рубидиевых генераторов, которые можно получать на циклотронах с энергией 70...90 МэВ при облучении протонами мишеней из рубидия-85 с образованием стронция-82.

Продуктом распада материнского изотопа стронций-82 (с периодом полураспада 25,3 суток) является дочерний рубидий-82. Позитронный эмиттер рубидий-82 используется при производстве ра-

диофармпрепаратов для позитронной томографии (главным образом, для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, функций головного мозга, желудочно-кишечного тракта, печени, почек и т.д.). Таким образом, при наличии стронция-82 ПЭТ-центр может функционировать без циклотрона.

В связи с вышеизложенным, наиболее очевидным и рентабельным является использование циклотрона Ц-80 для производства стронция-82 в коммерческих количествах. При проектном токе выведенного пучка протонов 200 мкА будет наработано 40...50 мКи стронция-82 за час. Цена 1 мКи не менее 250 \$. Это не исключает возможность производить также и весь известный спектр изотопов медицинского назначения в коммерческих масштабах.

Статистика констатирует существенное отставание России в этой области. В мировой медицинской практике используют около 190 радиодиагностических методов, в России – 22 радиофармацевтических препарата для компьютерной томографии, около 20 импортных наборов для радиоиммунного анализа и только три ультракороткоживущих радионуклида для позитронной эмиссионной томографии. Потребность населения России в радиофармпрепаратах удовлетворяется не более чем на 1...3%.

Параметры циклотрона Ц-80 (см. Табл.) обеспечивают возможность реализации протонной лучевой терапии глаза и поверхностных форм онкологических заболеваний, а также широкой исследовательской программы, направленной на разработку новых методик протонной терапии и перспективных радионуклидов для диагностики и терапии. При этом большое значение имеет многолетнее успешное сотрудничество специалистов ПИЯФ и ГФУЗ РНЦРХТ при лечении больных с использованием синхроциклотрона ПИЯФ СЦ-1000.

Основные характеристики циклотрона Ц-80

Система, параметр	Характеристика, величина
Тип ускоряемых частиц	H^-
Тип выведенных частиц	H^+
Энергия пучков регулируемая, МэВ	40...80
Ток пучка, мкА	200
Электромагнит:	
- тип э/магнита	Ш-образный
- диаметр полюса, см	2050
- масса, т	245
Резонансная система:	
- рабочая частота, МГц	41,2
- количество дуантов	2
- амплитуда	
ВЧ-напряжение, кВ	60
Мощность ВЧ-генератора, кВт	80
Источник ионов	внешний
Режим работы	непрерывный/ импульсный
Общее потребление мощности, не более, кВт:	
- в режиме с пучком	500
- в ждущем режиме	200

Основной узел циклотрона – электромагнит, разработанный и изготовленный 20 лет назад. Не подлежат изменению положение и ориентация электромагнита. Этими обстоятельствами определяется значительная часть технических и конструктивных решений, принятых в данном проекте. В частности:

- заданы габариты вакуумной камеры и, отчасти, количество и расположение навесных устройств;
- заданы параметры источников системы электропитания магнита;
- практически заданы габариты резонансной системы;
- система внешней инжекции отрицательных ионов водорода размещается в подвальном помещении непосредственно под электромагнитом;
- вывод пучков ускоренных протонов осуществляется через один выводной патрубок с помощью перемещаемого в нужное положение обдирочного устройства;
- диапазон регулирования энергии выводимых из циклотрона протонов ограничивается взаимным положением обдирочного устройства и резонансной системы.

Основной электромагнит имеет традиционное исполнение с Ш-образным магнитопроводом. Электромагнит был оснащен морально и физически устаревшей системой гидроподъема верхней балки. Принято и уже реализовано решение: подъем верхней балки осуществлять с помощью четырех шарово-винтовых пар, оснащенных сервоприводами и датчиками положения. Высота подъема – не менее 600 мм, гарантируемая точность и повторяемость положений балки – не хуже 50 мкм. Основные достоинства этого способа: отсутствие больших количеств масла, высокая надежность и срок службы (10000 подъемов-спусков до первого ремонта), возможность беспроводного дистанционного управле-

ния. Фотография электромагнита с системой подъема представлена на Рис.1.



Рис.1. Электромагнит с системой подъема верхней балки

Вакуумная камера изготавливается из нержавеющей стали с магнитной проницаемостью не более 1,2. Вдоль центральной оси камеры предусмотрены два отверстия, нижнее – для ввода пучка из системы внешней инжекции, верхнее – для тоководов инфлектора. Обечайка вакуумной камеры снабжена патрубками для размещения баков резонансной системы и вывода пучка протонов, а также для установки криогенных насосов, пробников и обдирочного устройства. Кроме того предусмотрены два патрубка для установки устройств резонансной системы. Фотография обечайки камеры в процессе изготовления представлена на Рис.2.



Рис.2. Обечайка вакуумной камеры

Резонансная ускоряющая система полностью размещена в объеме вакуумной камеры и состоит из двух зеркально-симметричных четвертьволновых резонаторов. Внутренний проводник каждого резонатора состоит из дуанта с угловой протяженностью 60° и штока. Дуанты вблизи оси электромагнита гальванически связаны перемычкой. Вследствие этого резонансная система работает как полуволновой резонатор, что позволяет использовать один охлаждаемый ввод ВЧ-мощности. Внешним проводником системы являются плакировки вакуумной камеры, а также отбортовки, соединяющие верхнюю и нижнюю плакировки камеры. Ускоряющая система снабжена двумя конденсаторами для неоперативной настройки частоты, триммером АПЧ и ВЧ-

пробником, а также юстировочными устройствами и змеевиками для водоохлаждения теплонагруженных узлов. Рабочая частота ВЧ-колебаний ускоряющей системы 41,2 МГц. Диапазон подстройки частоты триммером порядка 200 кГц. Расчетная мощность активных потерь около 20 кВт в каждом резонаторе (при амплитуде ВЧ-напряжения 60 кВ).

Система высокочастотного питания состоит из модуля стабилизации и управления (разработка НИИЭФА) [2] и усилителя ВЧ-мощности (фирма «Coaxial Power System», Великобритания).

Модуль стабилизации и управления системой ВЧ-питания предназначен для:

- генерирования основной частоты 41,2 МГц;
- манипуляции ускоряющего напряжения и его синхронизации с работой остальных систем циклотрона;
- измерения и стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах;
- настройки и стабилизации собственной частоты резонансной системы;
- настройки и стабилизации собственной частоты резонансной системы циклотрона;
- автоподстройки частоты резонансной системы на частоту питающего напряжения;
- питания банчера.

Конструктивно модуль состоит из базовой и дочерней плат, встроенных в промышленный компьютер, установленный в стойку усилителя ВЧ-мощности.

Усилитель ВЧ-мощности должен обеспечить выходную мощность 80 кВт на частоте 41,2 МГц. Усилитель с блоками питания размещается в стойке (Рис.3), которая будет установлена в подвале экспериментального зала. Передача ВЧ-мощности в резонансную систему осуществляется гибким коаксиальным фидером.



Рис.3. Усилитель ВЧ-мощности

Система внешней инжекции, обеспечивающая генерацию, формирование и транспортировку пучка отрицательных ионов водорода от внешнего источника в циклотрон через аксиальное отверстие в полюсе, размещается под электромагнитом. Система разработана с учетом опыта, полученного при создании аналогичных систем для современных циклотронов НИИЭФА СС-189 и МСС-30/15.

Циклотрон оснащается двумя штатными и тремя диагностическими пробниками, а также обдирочным устройством.

Штатные пробники предназначены для контрольных измерений тока пучка при нормальной эксплуатации циклотрона. Диагностические пробники предназначены для измерения тока пучка в процессе пусконаладочных работ, и при эксплуатации циклотрона должны быть заменены штатными пробниками и обдирочным устройством.

Все пробники имеют:

- дистанционный привод для перемещения по радиусу с точностью $\pm 0,5$ мм;
- теплоотвод выделяемой пучком мощности 200...400 Вт;
- одинаковые присоединительные размеры, электрические и водяные разъемы, что обеспечивает их взаимозаменяемость.

Диапазон перемещения диагностических пробников по радиусу – от минимально допускаемого конструкцией положения до максимального радиуса ускорения.

Диапазон перемещения штатных пробников по радиусу определяется минимальной и максимальной энергией выводимого пучка ионов (40 и 80 МэВ).

Обдирочное устройство оснащено приводом, позволяющим оперативно регулировать радиус (в пределах 450 мм) и азимутальный угол установки перезарядной фольги с учетом требуемого диапазона конечных энергий ионов. Головка обдирочного устройства выполнена в виде "трехпалого веера", на котором закреплены три тонкие углеродные фольги. Предусмотрена возможность дистанционного поворота головки, что позволяет устанавливать под пучок любую из трех фольг. Таким образом, нарушение вакуума в вакуумной камере циклотрона потребует только после выхода из строя всех трех фольг.

Система электропитания циклотрона включает в себя:

- главный распределительный щит на максимальную потребляемую мощность 500 кВт;
- источники и системы вторичного электропитания потребителей.

В перечень потребителей входят: система внешней инжекции, основной электромагнит, система вывода и транспортировки пучка, система высокочастотного питания, вакуумная система циклотрона, система водоохлаждения, система управления.

Электропитание системы внешней инжекции обеспечивается источниками производства фирм Lambda и Spellman, размещенными в двух стойках. Питание магнитов и линз осуществляется системой электропитания фирмы BRUKER, Франция (Рис.4).

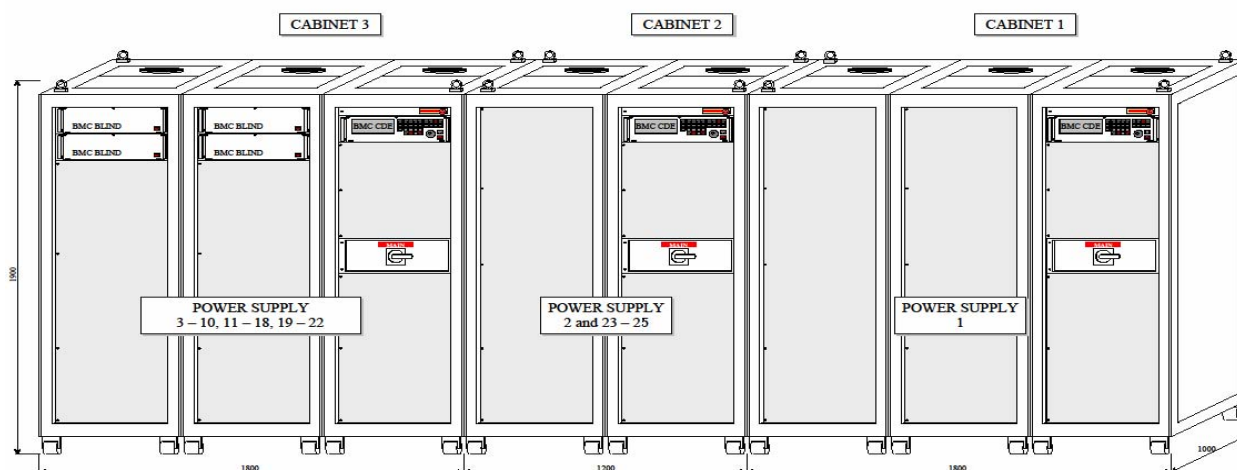


Рис.4. Система электропитания магнитов и линз

Для получения высокого вакуума в камере циклотрона используются два криогенных насоса, а в системах внешней инжекции и транспортировки пучка – турбомолекулярные насосы. Вакуумная система строится на импортном оборудовании, учтен неудачный опыт применения отечественного криогенного насоса в составе циклотрона СС-18/9 в пос. Песочный.

Система водоохлаждения должна отводить от теплонагруженных элементов циклотрона суммарный тепловой поток порядка 500 кВт и стабилизировать с точностью 1...2° температуру рабочего теплоносителя на входе в эти элементы. Система водоохлаждения и термостабилизации выполняется по двухконтурной гидравлической схеме. По внутреннему контуру циркулирует рабочий теплоноситель (дистиллированная вода), охлаждающий теплонагруженные элементы циклотрона, а по внешнему контуру проходит хладагент (техническая вода). Передача тепла от рабочего теплоносителя к хладагенту осуществляется в высокоэффективном пластинчатом разборном теплообменнике. Для рассеивания – сброса в атмосферу тепла, выделившегося при работе циклотрона, система водоохлаждения по внешнему контуру подключается к штатной системе оборотного водоохлаждения. При температуре наружного атмосферного воздуха выше 25°C отвод тепла производится через водо-водяной чиллер, предусмотренный в данном проекте.

Распределение подачи рабочего теплоносителя по теплонагруженным узлам циклотрона осуществляется через гидрошкафы.

Система автоматизированного управления имеет архитектуру распределенного типа и состоит из контроллеров Mitsubishi и Advantech и компьютеров, каждый из которых отвечает за управление одной или несколькими подсистемами циклотрона.

Главным звеном системы управления является промышленный компьютер (центральный), который производит опрос подчиненных ему контроллеров, передает собранную информацию на компьютеры пульта управления, принимает, производит арбитраж и распределение команд, пришедших от компьютеров пульта управления.

Обмен данными центральный компьютер осуществляет по сетевым интерфейсам трех типов: сеть

верхнего уровня – Ethernet, сети нижнего уровня ProfiBus DP и RS-485. Сетью Ethernet связаны центральный компьютер, два компьютера пульта оператора и компьютер управления ВЧ-системой. Сетью ProfiBus DP соединены центральный компьютер, контроллеры управления устройствами циклотрона и ионпровода, вакуумной системой и системой водоохлаждения, блоки измерения вакуума и стойка питания магнитов и линз. Сетью RS-485 связаны центральный компьютер, контроллеры блока управления стойкой питания инжектора и блока управления высоковольтной стойкой.

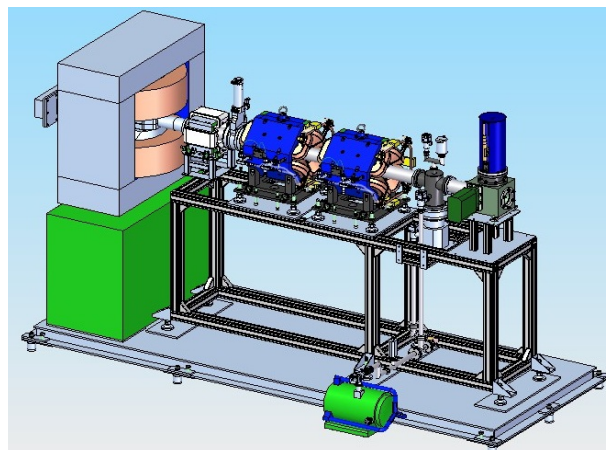


Рис.5. Первый участок системы транспортировки

Система транспортировки пучка циклотрона Ц-80 предназначена для доставки выведенного из циклотрона пучка протонов к местам расположения конечных устройств. К настоящему времени полностью определен и разработан первый участок системы транспортировки (Рис.5), включающий в себя (по ходу пучка) согласующий электромагнит, корректирующий электромагнит, дублет квадрупольных линз и диагностическое устройство, содержащее цилиндр Фарадея и датчик плотности пучка.

На следующем этапе работ будут определены, согласованы и разработаны каналы транспортировки к местам расположения конечных устройств (мишеней для наработки радионуклидов, офтальмологического кресла, синхротрона С-230). При этом должны быть решены три серьезные проблемы, не рассматривавшиеся на первом этапе работ:

– формирование узких протонных пучков для офтальмологии. Должны быть согласованы параметры пучков. Потребуется разработка комплекта коллиматоров, линз и магнитов;

– реализация режима работы циклотрона с ультранизким duty cycle (порядка 10^{-4}) для инжекции протонного пучка в синхрофазотрон. Обеспечивать такой режим с помощью ВЧ-генератора нецелесообразно (из-за переходных процессов в резонансной системе). Наиболее разумный способ – применение импульсного режима работы одного из источников питания системы внешней инжекции;

– транспортировка протонного пучка с минимальными потерями из экспериментального зала (от уровня «0») в подвал (до уровня «-6 м»). Расстояние между квадрупольными линзами, установленными на этих уровнях – больше девяти метров.

К настоящему времени разработано и, в основном, изготовлено оборудование циклотрона и первого участка системы транспортировки выведенного пучка протонов. Ведутся испытания систем и оборудования на стендах НИИЭФА. Для формирования магнитного поля изготавливаются новые сектора и шиммы. Начата реконструкция помещений для раз-

мещения оборудования. После завершения испытаний и подготовки помещений оборудование будет поставлено в ПИЯФ и смонтировано в экспериментальном зале, подвале экспериментального зала, в пультовой и помещении водоподготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 D.M. Seliverstov, N.K. Abrossimov, M.V. Chernova, E.M. Ivanov, G.A. Riabov. Presents status of the PNPI Medicine Center on the Base of 1000 MeV Proton Synchrocyclotron and Constructed 80 MeV Cyclotron for $I = 100$ mkA and the Development program // *CERN-Switzerland. Physics for Health in Europe. Workshop 2-4 February 2010*. 2010, Abstract ID: 127, p.36.
- 2 И.Н. Васильченко, В.Г. Мудролюбов, А.П. Строкач. Новый модуль управления и стабилизации ВЧ-системы циклотрона МСС-30/15 // *ВАИТ. Сер. «Электрофизическая аппаратура»*. Издательство: «Янус», 2010, в.5(31), с.43.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

MAJOR TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE C-80 CYCLOTRON SYSTEM

P.V. Bogdanov, Yu.N. Gavrish, A.V. Galchuck, S.V. Grigorenko, V.I. Grigoriev, Yu.D. Menshov, V.G. Mudrolyubov, V.I. Ponomarenko, A.P. Strokach, S.S. Tsygankov, S.A. Artamonov, E.M. Ivanov, G.F. Micheev, G.A. Ryabov, V.M. Samsonov

The C-80 cyclotron system is intended to produce proton beams with an energy of 40...80 MeV and current up to 200 μ A. The cyclotron will provide the commercial production of a wide range of isotopes for medicine, realization of proton beam therapy of eye diseases and superficial oncologic diseases as well as possibilities for fundamental and applied researches. The C-80 cyclotron is supposed to be used as an injector of the C-230 synchrotron, which serves for additional acceleration of the extracted proton beam to energies of the order of 230 MeV. This will allow the Bragg's peak-based treatment procedures to be applied in the proton therapy of oncologic patients.

ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСУ Ц-80

П.В. Богданов, Ю.М. Гавриш, А.В. Галчук, С.В. Григоренко, В.І. Григор'єв, Ю.Д. Меньшов, В.Г. Мудролюбов, В.І. Пономаренко, А.П. Строкач, С.С. Циганков, С.А. Артамонов, Є.М. Іванов, Г.Ф. Міхеев, Г.А. Рябов, В.М. Самсонов

Циклотронний комплекс Ц-80 призначений для отримання протонних пучків з енергією 40...80 MeV і струмом до 200 мкА. Циклотрон забезпечить виробництво широкого спектра ізотопів медичного призначення в комерційних масштабах, проведення протонної променевої терапії очей і поверхневих форм онкологічних захворювань, а також можливість фундаментальних і прикладних досліджень. Циклотрон Ц-80 передбачається використовувати в якості інжектора синхротрона С-230, що здійснює доприскорення виведеного протонного пучка до енергій близько 230 MeV, що дозволить проводити протонну терапію онкологічних захворювань за методиками, заснованими на використанні піку Брегга.