

# ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ: ДЕТЕКТОРЫ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

УДК 621.384.6

## СОВРЕМЕННЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЦИКЛОТРОНЫ НИИЭФА ДЛЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ

*П.В. Богданов, И.Н. Васильченко, Ю.Н. Гавриш, А.В. Галчук, С.В. Григоренко,  
А.Н. Кужлев, Ю.Д. Меньшов, В.Г. Мудролюбов, В.И. Пономаренко, А.П. Строкач  
ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: npkluts@niiefa.spb.su*

В НИИЭФА им. Д.В. Ефремова разработан модельный ряд компактных циклотронов: СС-12, СС-18/9, МСС-30/15, предназначенных для наработки радионуклидов непосредственно в медицинских учреждениях. Циклотроны обеспечивают ускорение отрицательных ионов водорода и дейтерия, инжектируемых из внешних источников. Вывод пучков протонов и дейтронов осуществляется путем перезарядки ускоренных отрицательных ионов на углеродных фольгах. Электромагниты циклотронов имеют броневое исполнение с вертикальным расположением медианной плоскости.

Важнейшим фактором, определяющим благополучие любого государства, является здоровье населения.

В настоящее время на учете в онкологических учреждениях России состоит более 2,5 миллионов больных. Почти 60% заболеваний впервые регистрируются на третьей или четвертой стадии заболевания. Очевидно, что эффективность медицинской помощи больным с онкологическими заболеваниями напрямую зависит от уровня развития и внедрения в медицинскую практику современных методов диагностики, в первую очередь радионуклидной. К сожалению, Россия в этой области существенно отстает от мирового уровня. Для ликвидации этого отставания 17 февраля 2011 г. было принято Постановление Правительства Российской Федерации №91, утверждающее Федеральную целевую программу «Развитие фармацевтической и медицинской промышленности Российской Федерации на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». Программой, в частности, предусматривается производство значительного количества циклотронов для оснащения центров радионуклидной диагностики. Циклотроны будут использоваться в качестве основного электрофизического оборудования для получения медицинских радионуклидов.

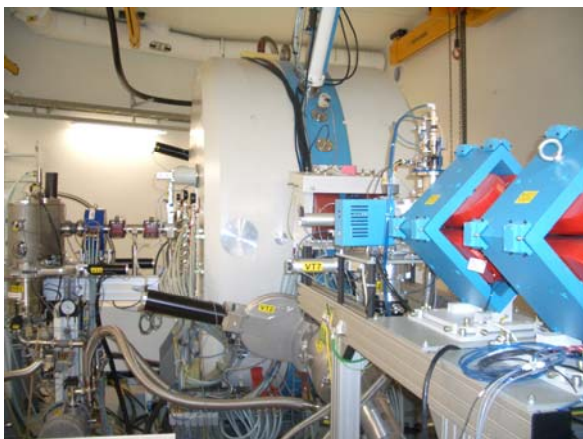
В НИИЭФА им. Д.В. Ефремова разработан ряд современных компактных циклотронов (см.Табл.),

предназначенных для наработки радионуклидов непосредственно в медицинских учреждениях [1,2,3]. При разработке особое внимание было уделено снижению уровня радиационной опасности. Во-первых, применено броневое исполнение основных электромагнитов с ограниченным числом отверстий в броне. При этом вакуумные камеры являются частью обратных магнитопроводов, а резонансные системы полностью размещены в вакуумных полостях электромагнитов. Во-вторых, в качестве ускоряемых частиц выбраны отрицательные ионы водорода и дейтерия, а выпуск пучков протонов и дейтронов практически без потерь осуществляется за счет перезарядки на тонких углеродных фольгах. В-третьих, циклотроны оснащены системами внешней инжекции, что значительно уменьшает поступление рабочего газа из источника в вакуумную камеру, облегчает получение высокого вакуума и, следовательно, сокращает потери ионов в процессе ускорения за счет перезарядки на молекулах остаточного газа. Кроме того, по периметру вакуумной камеры (в медианной плоскости) установлены специальные экраны из алюминиевого сплава (баффлы), обеспечивающие поглощение протонов/дейтронов, появление которых вызвано этими потерями ионов.

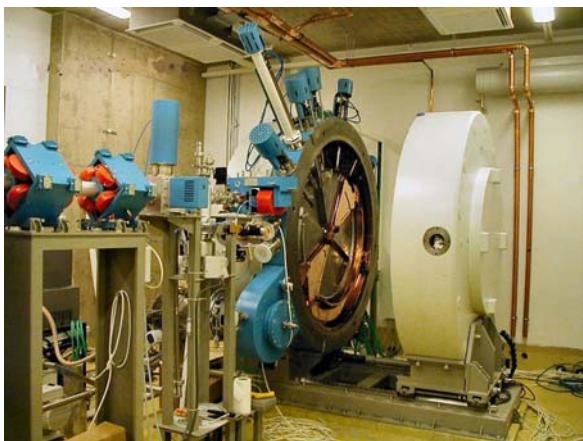
*Основные технические характеристики циклотронов НИИЭФА*

Циклотрон, модель	МСС-30/15	СС-18/9	СС-12
Ускоряемые ионы	H <sup>-</sup> /D <sup>-</sup>	H <sup>-</sup> /D <sup>-</sup>	H <sup>-</sup>
Выпущенные ионы	H <sup>+</sup> /D <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> /D <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
Энергия, МэВ	18...30/9...15	18/9	12
Ток, мкА	100/50	100/50	50
Энергопотребление в рабочем режиме, кВт	120	70	40
Вес электромагнита, т	41	20	10
Частота ВЧ-колебаний, МГц	40,68	38,2	76,4
Выходная мощность системы ВЧ-питания, кВт	25	25	15
Производимые радионуклиды	УКЖ, КЖ, а также ДЖ: натрий-22, кобальт-57, кадмий-109, церий-139 и др.	УКЖ, а также КЖ: рубидий-81, йод-123, индий-111, таллий-201, галлий-67, иттрий-87 и др.	УКЖ: углерод-11, азот-13, фтор-18, кислород-15

Циклотрон МСС-30/15 (Рис.1) предназначен для использования в крупных радиологических центрах, заинтересованных не только в рутинной наработке радионуклидов, но и в создании новых перспективных радиофармпрепаратов [4]. Циклотрон обеспечивает ускорение отрицательных ионов водорода и дейтерия до энергий в диапазоне 18...30 и 9...15 МэВ соответственно. Проектный ток выведенных пучков протонов и дейтронов – 100 и 50 мкА соответственно. Циклотрон оснащен двумя портами для вывода ускоренных пучков в два канала системы транспортировки. Пилотный экземпляр циклотрона МСС-30/15 изготовлен, поставлен в университет г. Ювяскюля, Финляндия, и введен в эксплуатацию в 2010 г.



*Рис.1. Общий вид циклотрона МСС-30/15. Видны система внешней инжекции и один из каналов системы транспортировки пучков к удаленным мишеням*



*Рис.2. Общий вид циклотрона СС-18/9 с открытой вакуумной камерой*

Циклотрон СС-18/9 (Рис.2) может обслуживать диагностические центры в небольшом регионе. Циклотрон обеспечивает ускорение отрицательных ионов водорода и дейтерия до энергий 18 и 19 МэВ соответственно. Проектный ток выведенных пучков протонов и дейтронов 100 и 50 мкА соответственно. Циклотрон имеет три порта для вывода ускоренных пучков – два для установки мишеней непосредственно на патрубках электромагнита и третий для транспортировки пучков к удаленным мишеням. Два таких циклотрона введены в эксплуатацию в ПЭТ-центрах г. Турку, Финляндия, и пос. Песочный, Санкт-Петербург, третий циклотрон поставлен

в ПЭТ-центр г. Снежинска, проведены приемосдаточные испытания.

Циклотрон СС-12 обеспечивает ускорение отрицательных ионов водорода до энергии 12 МэВ при проектном токе 50 мкА и предназначен исключительно для производства ультракороткоживущих радионуклидов. Циклотрон оснащен двумя портами для вывода протонных пучков. В качестве опции конкретному заказчику может быть поставлена система транспортировки пучков к удаленным мишеням.

Циклотроны НИИЭФА имеют ряд принципиальных особенностей, отличающих их от циклотронов других фирм:

- вертикальное расположение медианной плоскости электромагнита, что обеспечивает удобный доступ к устройствам, расположенным в вакуумной камере, путем отодвигания подвижной части электромагнита по направляющим. Очевидно, что при этом не требуется система гидроподъема верхней балки, а обслуживание системы внешней инжекции может проводиться непосредственно с пола. При традиционном исполнении система внешней инжекции размещается либо в подвальном помещении, либо на верхней балке;

- ускорение ионов водорода и дейтерия в циклотронах СС-18/9 и МСС-30/15 осуществляется на фиксированной частоте с использованием второй и четвертой гармоник частоты обращения;

- радиальное распределение среднего магнитного поля при изменении типа ускоряемых ионов корректируется без дополнительных обмоток за счет оперативного перемещения специальных шиммов.

Во всех моделях циклотронов применена двухдуантная ускоряющая система, полностью размещенная в объеме вакуумной камеры и закрепленная на боковой поверхности корпуса камеры. Дуанты вблизи оси электромагнита связаны перемычкой. Система снабжена охлаждаемым вводом ВЧ-мощности, конденсаторами для неоперативной настройки частоты, триммером АПЧ и ВЧ-пробником.

Высокочастотный генератор включает в себя модуль стабилизации и управления и усилитель ВЧ-мощности. ВЧ-генератор с системой электропитания размещен в стойке, установленной вне циклотронного зала в помещении систем питания и управления. Передача ВЧ-мощности в ускоряющую систему осуществляется через гибкий коаксиальный фидер.

В состав системы внешней инжекции входят: мультипольный источник ионов с ионно-оптической системой доускорения и фокусировки пучка, соленидальная линза, электромагнитные корректоры, электростатическая линза, ВЧ-банчер (в циклотронах СС-18/9 и МСС-30/15), спиральный инфлектор и токоввод инфлектора, а также две стойки питания с блоками управления.

Высокий вакуум в вакуумных камерах циклотронов обеспечивается криогенным насосом (в циклотроне МСС-30/15 – двумя насосами), в трактах внешней инжекции и транспортировки – турбомолекулярными насосами.

Система электропитания основного магнита, магнитов и линз системы транспортировки пучков поставляется фирмой Bruker.

Отвод тепла от теплонагруженных элементов оборудования циклотрона осуществляется системой водоохлаждения и термостабилизации, выполненной по двухконтурной схеме. По внутреннему контуру циркулирует рабочий теплоноситель – дистиллированная вода, непосредственно охлаждающая теплонагруженные узлы циклотрона. Во внешнем контуре, предназначенном для охлаждения рабочего теплоносителя внутреннего контура, применяется обратная «техническая» вода, подаваемая из штатной системы оборотного водоохлаждения здания.

Управление работой всех систем циклотронов полностью автоматизировано и осуществляется оператором с помощью компьютера. Система автоматизированного управления имеет архитектуру распределенного типа и состоит из контроллеров и компьютеров, каждый из которых отвечает за управление одной или несколькими подсистемами циклотрона. Главным звеном системы является промышленный компьютер, который производит опрос подчиненных ему контроллеров, передает собранную информацию на компьютеры пульта управления, принимает, производит арбитраж и распределение команд, пришедших от компьютеров пульта управления.

Наиболее удачное размещение систем питания и управления представлено на Рис.3.



Рис.3. Стойки систем питания и управления циклотрона МСС-30/15 в г. Ювяскюля

При разработке циклотронов МСС-30/15 и СС-18/9 задача повышения тока выведенных пучков не ставилась, однако, в процессе пусконаладочных работ были получены токи 200 и 70 мкА протонов и дейтронов соответственно. Были также реализованы режимы с одновременным выводом пучков на две мишени (при любом заданном соотношении токов).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П.В. Богданов, И.Н. Васильченко, С.В. Григоренко, Е.А. Ламзин, В.П. Кухтин, Ю.И. Стогов, А.П. Строкач, С.Е. Сычевский, Н.Ф. Шилкин. Разработка и реализация проекта циклотрона СС-18/9 // *ВАНТ. Серия «Электрофизическая аппаратура»*. СПб.: «Янус», 2010, в.5(31), с.21.
2. П.В. Богданов, А.А. Будтов, М.Ф. Ворогушин, А.В. Галчук, В.И. Пономаренко, А.В. Сидоров, С.А. Силаев, А.П. Строкач, С.Е. Сычевский. Разработка конструкции циклотрона СС-12 // *ВАНТ. Серия «Электрофизическая аппаратура»*. СПб.: «Янус». 2010, в.5(31), с.11.
3. П.В. Богданов, А.А. Будтов, И.Н. Васильченко, М.Ф. Ворогушин, С.В. Григоренко, В.Г. Мудролюбов, С.А. Силаев, Ю.И. Стогов, А.П. Строкач, С.Е. Сычевский, Н.Ф. Шилкин. Медицинский компактный циклотрон МСС-30/15 с регулируемой энергией ускоренных ионов // *ВАНТ. Серия «Электрофизическая аппаратура»*. СПб.: «Янус», 2010, в.5(31), с.43.
4. P.V. Bogdanov, M.F. Vorogushin, A.V. Galchuk, V.G. Mudrolubov, A.P. Strokach. MСС-30/15 Cyclotron – parameters, adjusting works and their results // *XXII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2010*, September 27-October 1, 2010, Protvino, Moscow Region, Russia.

Статья поступила в редакцию 23.05.2011 г.

### MODERN COMPACT CYCLOTRONS FOR NUCLEAR MEDICINE DESIGNED AND MANUFACTURED IN NIEFA

*P.V. Bogdanov, I.N. Vasilchenko, Yu.N. Gavrish, A.V. Galchuk, S.V. Grigorenko, A.N. Kuzhlev, Yu.D. Menshov, V.G. Mudroyubov, V.I. Ponomarenko, A.P. Strokach*

A series of compact cyclotrons, the СС-12, СС-18/9 and МСС-30/15, intended for the production of radionuclides for diagnostics and therapy directly in medical institutions has been designed and manufactured in NIEFA. These cyclotrons provide the acceleration of negative hydrogen and deuterium ions injected from external sources. Beams of accelerated particles are extracted by stripping negative ions to protons and deuterons by carbon foils. Shielding-type electromagnets with the vertically located median plane are applied in these cyclotrons.

### СУЧАСНІ КОМПАКТНІ ЦИКЛОТРОНИ НДІЕФА ДЛЯ ЯДЕРНОЇ МЕДИЦИНИ

*П.В. Богданов, І.М. Васильченко, Ю.М. Гавриш, А.В. Галчук, С.В. Григоренко, А.Н. Кужльєв, Ю.Д. Меньшов, В.Г. Мудролюбов, В.І. Пономаренко, А.П. Строкач*

В НДІЕФА ім. Д.В. Єфремова розроблений модельний ряд компактних циклотронів: СС-12, СС-18/9, МСС-30/15, призначених для напрацювання радіонуклідів безпосередньо в медичних установах. Циклотрони забезпечують прискорення негативних іонів водню і дейтерію, інжектіваних із зовнішніх джерел. Вивід пучків протонів і дейтронів здійснюється шляхом перезарядки прискорених негативних іонів на вуглецевих фольгах. Електромагніти циклотронів мають броньоване виконання з вертикальним розташуванням медіанної площини.