

СИСТЕМЫ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЦИКЛОТРОНОВ НИИЭФА

**П.В. Богданов, И.Н. Васильченко, О.Л. Вересов, Ю.Н. Гавриш, С.В. Григоренко,
Ю.В. Зуев, М.Т. Козиенко, В.Г. Мудролюбов, А.П. Строкач, С.С. Цыганков
ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: npkluts@niiefa.spb.su**

Представлены основные параметры и конструктивные особенности систем внешней инжекции, применяемых в современных циклотронах НИИЭФА, предназначенных для наработки медицинских радионуклидов. Их использование вместо традиционного внутреннего источника позволяет существенно увеличить ток ускоряемого пучка и уменьшить натекание рабочего газа в ускорительную камеру, за счет чего снижаются потери пучка в процессе ускорения и уменьшается активация оборудования.

За последнее десятилетие в НИИЭФА разработана серия компактных циклотронов нового поколения – СС-12, СС-18/9 и МСС-30/15 [1-4], предназначенных для наработки диагностических и терапевтических радионуклидов непосредственно в медицинских учреждениях. Характерными чертами этих циклотронов являются: вертикальное расположение медианной плоскости и ускорение отрицательных ионов. При разработке серии циклотронов выполнен комплекс расчетно-теоретических исследований, в результате которых созданы специализированные системы внешней инжекции (СВИ) отрицательных ионов водорода и дейтерия [5].

СВИ построены по единому принципу и включают в себя: плазменный источник ионов с электростатической оптикой для формирования пучка, канал транспортировки с двумя фокусирующими лин-

зами и двумя электромагнитными корректорами, инфлектор, необходимый для поворота пучка из аксиального канала транспортировки в медианную плоскость циклотрона. СВИ оснащены диагностическими устройствами, которые позволяют оперативно измерять характеристики пучка. Некоторые отличия систем, обусловленные конструктивными особенностями и различием требований к параметрам циклотронов, видны из таблицы. В частности, циклотрон СС-12 предназначен только для ускорения отрицательных ионов водорода с током 50 мкА. Это позволило для упрощения системы не включать в ее состав ВЧ-банчер.

Состав и типичная схема СВИ показаны на Рис.1, внешний вид СВИ циклотрона МСС-30/15 представлен на Рис.2.

Параметры системы внешней инжекции циклотронов

Параметры	СС-12	СС-18/9	МСС-30/15
Ускоряемые ионы	H ⁻	H ⁻ /D ⁻	H ⁻ /D ⁻
Энергия инжекции, H ⁻ /D ⁻ , кВ	14,5	18,4/9,2	19,0/9,5
Длина СВИ от ионного источника до медианной плоскости, м	1,42	2,04	2,1
Диаметр отверстия в диафрагме, мм	8	5,5	6,5
Расстояние от эмиссионного отверстия до диафрагмы, мм	250	120	120
Диаметр эмиссионного отверстия ионного источника, мм	5	5	6
Ток пучка ионов H ⁻ /D ⁻ , измеренный за диафрагмой, мА	0,8	1,0/0,5	1,4/0,7
Нормализованный эмиттанс пучка ионов за диафрагмой, п·мм·мрад	0,25	0,3/0,15	0,35/0,18
Фокусирующая линза №1	Электростатическая	Соленоид	Соленоид
Фокусирующая линза №2	Электростатическая	Электростатическая	Электростатическая или соленоид
Высокочастотный банчер	нет	есть	есть
Расстояние между магнитными пробками, мм	53	46	58
Среднее магнитное поле в циклотроне, Тл	1,26	1,26	1,336
Высота инфлектора, мм	20	20	23
Параметр закручивания инфлектора	-0,33	-0,70	-0,28
Потенциалы на электродах инфлектора, кВ	±5,2	±7,3	±6,6
Требуемый диаметр пучка на входе в инфлектор, мм	2,5	2,0	2,5
Допустимый нормализованный эмиттанс пучка ионов на входе в инфлектор, п·мм·мрад	0,40	0,36/0,18	0,42/0,21
Проектный средний ток ускоренного пучка на мишени, мкА	50	100/50	100/50

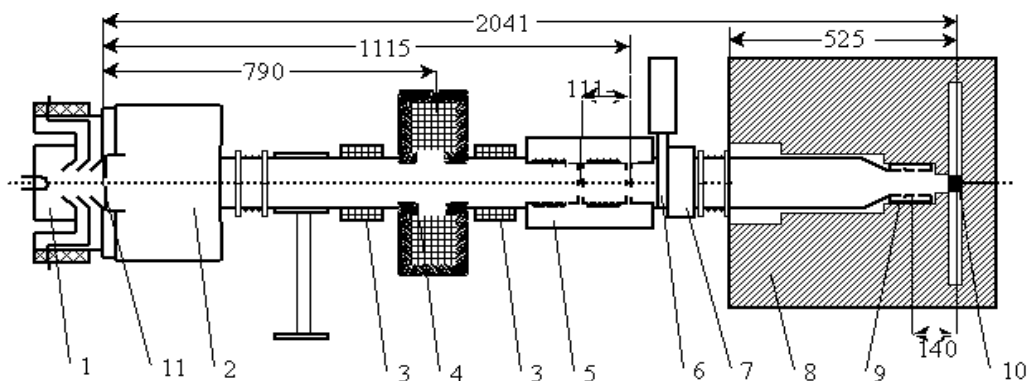


Рис.1. Схема СВИ циклотрона СС-18/9: 1 – источник ионов Н (D); 2 – вакуумная камера; 3 – магнитный корректор; 4 – соленоид; 5 – банчер; 6 – измеритель тока; 7 – шиберный затвор; 8 – магнитопровод циклотрона; 9 – однопотенциальная линза; 10 – инфлектор; 11 – диафрагма



Рис.2. Система внешней инжекции циклотрона МСС-30/15

Объемно-плазменный ионный источник типа «мультикасп» с поперечным магнитным фильтром, описанный в работе [6], имеет съемный катодный блок, обслуживание которого производится без нарушения вакуума в циклотроне. Размеры газоразрядной камеры источника минимизированы. Вакуумная камера, к которой крепится источник, разделена перегородкой на два объема, каждый откачивается собственным турбомолекулярным насосом. Перегородка оснащена диафрагмой для прохождения пучка и ограничения натекания газа в канал транспортировки. В рабочем режиме в первом, примыкающем к источнику, объеме поддерживается давление газа $\sim 5 \times 10^{-5}$ Торр, во втором объеме $\sim 2 \times 10^{-6}$ Торр.

Электростатическая система формирования пучка обладает высокой прозрачностью для вакуумной откачки, а газоразрядная камера погружена в ускоряющую трубку и максимально приближена к диафрагме, что позволило минимизировать длину пути пучка в условиях низкого вакуума. В вакуумной камере СВИ циклотрона СС-12 размещена электростатическая линза, поэтому диафрагма расположена дальше по ходу пучка и имеет больший диаметр.

Для выбора состава и параметров элементов тракта транспортировки определяющее значение имеют геометрия центральной области циклотрона и требования к параметрам пучка на выходе из инфлектора. Малый зазор между магнитными пробками в циклотроне СС-18/9 (45 мм) требует малых размеров инфлектора (высота ≤ 20 мм), а значит, и

невысокой энергии ионов. На основании расчета выбраны значения энергии 18,4 и 9,2 кэВ для ионов Н и D соответственно. При данной энергии, высоте инфлектора 20 мм и магнитном поле в центре циклотрона 1,26 Тл требуется довольно сильное закручивание электродов инфлектора с параметром $k' = -0,7$. Вертикальная расходимость пучка на выходе из инфлектора не должна превышать 80 мрад. Для выполнения этого требования пучок на входе в инфлектор должен иметь диаметр не более 2 мм и величину эмиттанса не более 0,36 π мм-мрад.

Для циклотрона МСС-30/15 требования к пучку на входе в инфлектор (Рис.3) удалось смягчить. Благодаря большей величине среднего магнитного поля (при близкой величине энергии инжекции) закручивание электродов значительно ниже, и допустимые размер пучка и эмиттанс на входе в инфлектор \sim на 20 % выше.



Рис.3. Инфлектор циклотрона МСС-30/15

Для получения необходимого диаметра пучка на входе в инфлектор требуется короткофокусная линза, установленная на небольшом расстоянии от инфлектора. В циклотроне СС-18/9 применена электростатическая однопотенциальная линза, поскольку размеры канала в магнитопроводе малы. При разработке циклотрона МСС-30/15 размеры канала в магнитопроводе были увеличены для того, чтобы разместить в этом канале фокусирующий соленоид. Соленоид был изготовлен и успешно испытан. Показано, что его наличие позволяет увеличить ток ионов D⁺, что не требовалось для данного циклотрона. В результате предпочтение отдано электростатической линзе. В качестве первой фокусирующей линзы, расположенной ближе к ионному источнику, в СВИ обоих циклотронов выбран соленоид.

Для увеличения захвата пучка в режим ускорения в циклотронах СС-18/9 и МСС-30/15 применен банчер, обеспечивающий предварительное группирование ионов. Банчер циклотрона СС-18/9, поставленного в г. Турку, имеет три высокочастотных зазора. Расстояния между серединами среднего зазора и крайних зазоров при этом были выбраны такими, чтобы время пролета одного из типов ионов равнялось нечетному числу полупериодов ВЧ-колебаний. ВЧ-мощность вводилась в устройство группирования таким образом, чтобы высокочастотное электрическое поле возбуждалось только в двух зазорах, расстояние между которыми соответствует типу инжектируемых ионов. Недостаток банчера – сложность конструкции. Банчер оснащен двумя вводами ВЧ-мощности, и при изменении типа инжектируемых ионов необходимо переключение вводов ВЧ-мощности с помощью релейной схемы.

В циклотроне МСС-30/15 применен двухзазорный банчер (Рис.4) с длиной трубки дрейфа "d", рассчитанной по формуле:

$$d = (n - 2/3) \times \frac{(m \times v)}{f \times m_{pr}} - h, \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, $(m \times v)$ – импульс иона, f – частота высокочастотных колебаний, m_{pr} – масса протона, h – величина зазора.

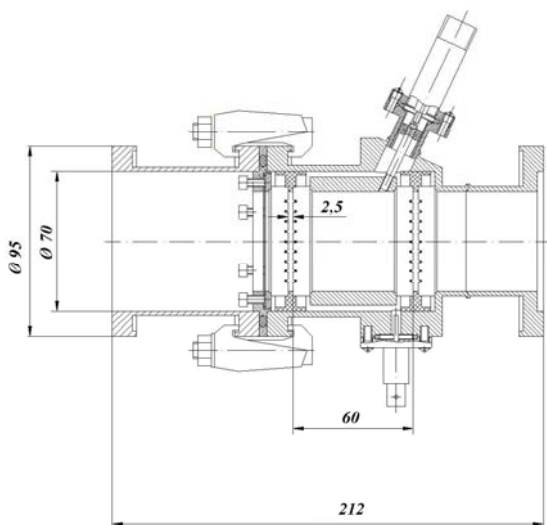


Рис.4. Двухзазорный банчер циклотрона МСС-30/15

При таком выборе длины трубки дрейфа для ионов водорода и дейтерия реализуются одинаковые условия группирования. Равновесный ион водорода (прирост энергии после прохождения двух зазоров отсутствует) пересекает середину первого зазора в фазе высокочастотного электрического поля $+30^\circ$, а середину второго зазора – в фазе -30° . Равновесный ион дейтерия пересекает середины зазоров в фазах -30° и $+30^\circ$ соответственно.

Основным достоинством нового банчера является то, что для обеспечения группирования при изменении типа инжектируемых ионов необходимо и достаточно изменить амплитуду высокочастотного напряжения без каких-либо переключений и перемещений.

Эффективность работы банчера ограничивается действием пространственного заряда пучка и энер-

гетического разброса частиц; влияние указанных факторов возрастает с увеличением времени движения пучка до точки группирования. По этой причине эффективность группирования снижает электростатическая линза, работающая в режиме торможения, особенно сильно при работе с пучком D. Для увеличения тока ускоренного пучка можно использовать электростатическую линзу, работающую в режиме ускорения, либо соленоид в условиях компенсации пространственного заряда пучка ионами остаточного газа.

Циклотрон СС-12 разработан для оснащения небольших ПЭТ-центров, поэтому одним из важнейших параметров считалась себестоимость. СВИ этого циклотрона максимально упрощена: исключен банчер, транспортировка пучка осуществляется при помощи двух однопотенциальных линз, расстояние от ионного источника до медианной плоскости циклотрона уменьшено до 1,42 м. Энергия инжекции снижена до 14,5 кэВ, что позволило уменьшить коэффициент закручивания электродов инфлектора и улучшить согласование эмиттанта пучка с акцептансом ускоряющей системы.

Эффективность захвата в режим ускорения, измеренная в ходе испытаний циклотрона СС-18/9 (г. Турку), при токе пучка ионов H⁺ из источника 1,0 мА и выключенном банчере, составила 7,8%. Включение банчера с амплитудой ВЧ-напряжения 260 В позволило вдвое увеличить эффективность захвата. При данных параметрах инжектора был получен выведенный пучок протонов с энергией 18 МэВ и током 149 мкА.

Эффективность захвата в режим ускорения пучка ионов D⁺ при выключенном банчере составила 8,5% при токе пучка из источника 0,5 мА. Включение банчера позволило увеличить эффективность захвата в режим ускорения до 12,9%. При данных параметрах инжектора был получен выведенный пучок дейтронов с энергией 9 МэВ и током 51 мкА.

На Рис.5 приведена зависимость эффективности захвата в режим ускорения пучка ионов H⁺ от тока пучка из источника в режимах с включенным и выключенным банчером, полученные при испытаниях циклотрона МСС-30/15.

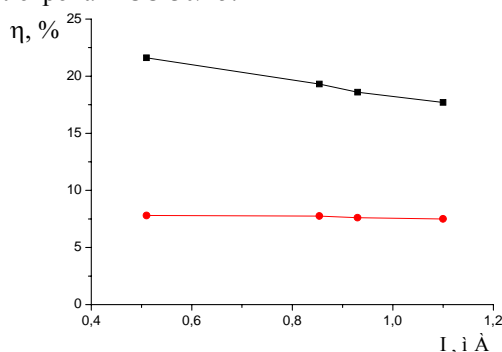


Рис.5. Зависимости эффективности захвата в режим ускорения пучка ионов H⁺ от тока пучка из источника в режимах с включенным (верхняя линия) и выключенным (нижняя линия) банчером

Эффективность рассчитывалась по измеренным цилиндром Фарадея импульсным токам выведенного из циклотрона пучка протонов с энергией 18 МэВ.

Рост эффективности банчера (по сравнению с банчером циклотрона СС-18/9) объясняется тем, что за счет упрощения конструкции его удалось разместить ближе к медианной плоскости циклотрона. Показано, что средний ток выведенного пучка протонов может достигать 200 мкА. Эффективность захвата в режим ускорения ионов D⁺ (при токе пучка из источника 0,32 мА, измеренная на энергии 15 МэВ) составила 16,6 % при включенном банчере и 8,7 % при его отключении.

Результаты проведенных исследований и испытаний использованы при разработке циклотрона Ц-80 для ПИЯФ им. Б.П. Константинова [7]. Циклотрон предназначен для ускорения ионов Н⁺ до энергии 40...80 МэВ и его СВИ имеет ряд существенных отличий от СВИ циклотрона СС-18/9:

- энергия инжекции увеличена до 26 кэВ;
- длина тракта инжекции ~ на 200 мм больше;
- амплитуда ВЧ-напряжения 60 кВ (в циклотроне СС-18/9 – 35 кВ);
- угловая протяженность дуантов 60° вместо 40°, при этом диапазон фаз, в котором ионы захватываются в режим ускорения, составляет ~45°;
- в тракте транспортировки СВИ использованы два солениода;
- ток пучка ионов на выходе источника увеличен до 1,5 мА.

Ожидаемый ток выведенного пучка протонов составит 250...300 мкА.

В настоящее время оборудование СВИ изготовлено и смонтировано, ведутся испытания на стенде НИИЭФА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П.В. Богданов, И.Н. Васильченко, С.В. Григоренко и др. Разработка и реализация проекта циклотрона СС-18/9 // *ВАНТ. Серия «Электрофизическая аппаратура»*. СПб.: Издательство «Янус», 2010, в.5(31), с.21.
2. П.В. Богданов, А.А. Будтов, М.Ф. Ворогушин и др. Разработка конструкции циклотрона СС-12 // *ВАНТ. Серия «Электрофизическая аппаратура»*. СПб.: Издательство «Янус», 2010, в.5(31), с.11.
3. П.В. Богданов, А.А. Будтов, И.Н. Васильченко и др. Медицинский компактный циклотрон МСС-30/15 с регулируемой энергией ускоренных ионов // *ВАНТ. Сер. «Электрофизическая аппаратура»*. СПб.: Издательство «Янус», 2010, в.5(31), с.43
4. P.V. Bogdanov, M.F. Vorogushin, A.V. Galchuk, V.G. Mudrolubov, A.P. Strokach. МСС-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.
5. О.Л. Вересов, С.В. Григоренко, А.В. Сидоров и др. Создание системы внешней инжекции отрицательных ионов Н⁻/D⁻ для циклотрона СС-18/9 // *Труды 11 Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине*. СПб. 2005, с.253.
6. Ю.В. Афанасьев, О.Л. Вересов, С.В. Григоренко, А.П. Строкач, С.Ю. Удовиченко. Исследование источника отрицательных ионов водорода для внешней инжекции в циклотрон // *Труды 10 совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине*. СПб. 2001, с.332.
7. П.В. Богданов, Ю.Н. Гавриш, А.В. Галчук и др. Основные технические характеристики циклотронного комплекса Ц-80 // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования» (58)*. 2012, №3(79), с.10-14.

Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.

EXTERNAL INJECTION SYSTEMS APPLIED IN MODERN CYCLOTRONS DESIGNED AND MANUFACTURED IN NIEFA

P.V. Bogdanov, I.N. Vasilchenko, O.L. Veresov, Yu.N. Gavrish, S.V. Grigorenko, Yu.V. Zuev, M.T. Kozienko, V.G. Mudrolyubov, A.P. Strokach, S.S. Tsygankov

The main parameters and design features of the external injection systems applied in modern cyclotrons designed and manufactured in NIEFA and intended for production of radionuclides for medicine are presented. The use of these external injection systems instead of a traditional internal source allows the current of the accelerated beam to be significantly increased and the in-leakage of the working gas to the acceleration chamber to be reduced, which results in reduced beam losses in the process of acceleration and lower equipment activation.

СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОЇ ІНЖЕКЦІЇ ДЛЯ СУЧАСНИХ ЦИКЛОТРОНІВ НДІЕФА

П.В. Богданов, І.М. Васильченко, О.Л. Вересов, Ю.М. Гавриш, С.В. Григоренко, Ю.В. Зуєв, М.Т. Козієнко, В.Г. Мудролюбов, А.П. Строкач, С.С. Циганков

Представлені основні параметри та конструктивні особливості систем зовнішньої інжекції, що застосовуються в сучасних циклотронах НДІЕФА, призначених для напрацювання медичних радіонуклідів. Їх використання замість традиційного внутрішнього джерела дозволяє істотно збільшити струм прискореного пучка і зменшити натікання робочого газу в прискорювальну камеру, за рахунок чого знижуються втрати пучка в процесі прискорення і зменшується активація обладнання.