

УДК 621.384.6

ФОРИНЖЕКТОР НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ В ФАЗОТРОН ОИЯИ

*О. К. Беляев^б, В. В. Кобец^а, И. Г. Мальцев^б, И. Н. Мешков^а,
В. Б. Степанов^б, Е. М. Сыресин^а, В. А. Тепляков^б*

^аОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна

^бИнститут физики высоких энергий, Протвино, Россия

Для увеличения интенсивности и качества выведенного пучка на фазотроне ОИЯИ ведутся работы над проектом внешней инжекции, позволяющей увеличить ток выведенного протонного пучка на порядок. Для этой цели планируется создание системы внешней инжекции в фазотрон на двухсекционном линейном ускорителе отрицательных ионов водорода. Дано обоснование возможности создания линейного ускорителя отрицательных ионов водорода, рассмотрены вопросы разработки ускоряющей структуры, системы ВЧ-питания, конструкции ускорителя.

The project of external injection into JINR synchrocyclotron is aimed to increase the intensity and quality of extracted beam. Expected increase of the beam current is about one order of magnitude. For this aim one plans to create a system of external injection into synchrocyclotron based on a two-section linear accelerator for negative ions of hydrogen. In this paper the motivation of a possibility of constructing the linear accelerator at required parameters is given. The questions of accelerating structure, RF-systems and accelerator design are discussed.

Для увеличения интенсивности и качества выведенного пучка на фазотроне ОИЯИ осуществляются работы над проектом внешней инжекции, позволяющей увеличить ток выведенного протонного пучка на порядок. В настоящее время внутренний ток в фазотроне составляет 5 мкА при частоте модуляции 250 Гц и времени захвата 20 мкс, т. е. при макроскважности 200. Таким образом, импульсный ток составляет 1 мА в течение времени захвата, или $1,25 \cdot 10^{11}$ частиц. Предполагается увеличить число частиц в импульсе до $1,25 \cdot 10^{12}$.

Для этой цели планируется создание системы внешней инжекции в фазотрон на двухсекционном линейном ускорителе отрицательных ионов водорода. Ускоренные отрицательные ионы водорода перезаряжаются на газовой мишени. Нейтральный пучок инжектируется в фазотрон, где перезаряжается в протоны, которые и захватываются в режим ускорения. Ключевым элементом схемы внешней инжекции в фазотрон является ускоритель отрицательных ионов водорода. Ускоритель должен иметь основные характеристики, указанные в табл. 1.

Выбор ускоряющей структуры с выходной энергией 5 МэВ был обусловлен высокими требованиями к параметрам пучка при работе с малой скважностью. Структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) [1] обеспечивает требуемое качество пучка, но при энергиях выше 2–3 МэВ в такой структуре падает

эффективность и, соответственно, темп ускорения. Для дальнейшего ускорения применяются структуры Альвареца или с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ) [2]. Переход от структуры с ПОКФ к другим ухудшает параметры пучка и требует специального согласования. Поэтому для получения пучков с энергией до 5 МэВ и малым эмиттансом, узким спектром, минимальным отсевом частиц, что особенно важно при большом среднем токе пучка, имеет смысл применить структуру с ПОКФ, несмотря на падение темпа ускорения.

Таблица 1

Сорт частиц	Ионы Н ⁻
Ток ускоренных частиц, мА	50
Энергия на выходе, МэВ, секция 1	2
секция 2	5
Длительность импульса, мкс	80
Частота повторения импульсов, Гц	250
Рабочая частота (18,1 × 8), МГц	144,5
Эмиттанс пучка, π · мм · мрад	1
Разброс по энергиям, %	±2

В ИФВЭ предложено изменение формы модуляции электродов [3], позволяющее увеличить темп ускорения в структуре с ПОКФ [4]. На основании этого предлагается применить в создаваемом ускорителе на энергию 5 МэВ структуры с ПОКФ и увеличенным темпом ускорения.

Были просчитаны два варианта геометрии ускоряюще-фокусирующего канала структуры с ПОКФ. В обоих вариантах при 100 %-м токопрохождении пучок с током 50 мА имеет нормализованный эмиттанс $\leq 0,05 \pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$, а первая секция ускорителя с выходной энергией 2 МэВ содержит около 140 периодов ускорения. В геометрии варианта 1 трапецеидальная модуляция начинается со 108-го периода, что обеспечивает высокий темп ускорения. Вариант 2 базируется на начальной части существующего ЛУСИ [5] на энергию 2 МэВ с синусоидальной модуляцией электродов. Трапецеидальная применяется на участке ускорения 2–5 МэВ. Ускоритель второго варианта имеет большие потери ВЧ-мощности и большую длину. Результаты расчетов двух вариантов приведены в табл. 2.

ВЧ-напряжение на электродах структуры создается с помощью резонатора. Наибольшее распространение для работы со структурами с ПОКФ получил четырехкамерный резонатор (4К-резонатор). В ИФВЭ для структур с ПОКФ применяются разноконтурные 4К-резонаторы — 2Н-резонаторы. Разноконтурность обеспечивает относительную частотную расстройку между рабочим и ближайшим мешающим типом колебаний $\sim 10^{-2}$, что исключает необходимость принятия специальных мер по устранению влияния мешающих типов колебаний. Расчет, проведенный в двумерном приближении, дает следующие геометрические размеры и радиотехнические параметры 2Н-резонатора для вариантов 1 и 2 при напряжениях на резонаторах, указанных в табл. 2 (см. табл. 3).

Создание линейного ускорителя с ВЧК-фокусировкой связано с решением ряда задач, обусловленных работой элементов конструкции под воздействием тепловых потоков

от диссипативных потерь ВЧ-мощности. Наибольшие трудности возникают при стабилизации геометрических размеров ускоряюще-фокусирующего канала из-за жесткого допуска на смещение электродов относительно оси ускорения, обусловленного динамикой пучка [6].

Таблица 2

Параметры ускоряющей структуры	ПОКФ 2 МэВ	ПОКФ 5 МэВ	ЛУСИ 2 МэВ	ЛУСИ 2 МэВ
Энергия инжекции, МэВ	0,1	2,0	0,098	1,9
Выходная энергия, МэВ	2,0	5,0	1,9	5,0
Ток ускоренных протонов, мА	50	50	50	50
Напряжение на резонаторе, кВ	130	130	150	150
Рабочая частота ВЧ-поля, МГц	144,8	144,8	144,8	144,8
Толщина электродов, мм	9,5	9,5	10,94	10,94
Средний радиус апертуры, мм	7	7	8,82	8,82
Минимальный радиус апертуры, мм	4,2	4,22	6,68	5,2
Эффективность ускорения	0,005–0,643	0,643–0,65	0,002–0,32	0,32–0,65
Средний темп ускорения, МэВ/м	0,61	0,72	0,5	0,77
Максимальная напряженность на поверхности электродов, кВ/см	240	240	225	235
Токопрохождение пучка в канале, %	100	100	100	100
Коэффициент захвата при $I = 50$ мА, %	99	—	97	—
Эмиттанс входного пучка, $\pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$	0,05	—	0,04	—
Среднеквадратичный эмиттанс выходного пучка, $\pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$ ($\approx 87\%$ пучка)	0,044	0,045	0,044	0,043
Разброс по энергии, %	7,0	4,0	5,9	3,2
Разброс по фазам, град	45	32	50	40
Длина согласователя, мм	181,32	—	221,18	—
Длина ускоряюще-фокусирующего канала, м	3,27	3,43	3,8	3,9

Для определения величины отклонений электродов от проектного положения при введении номинальной ВЧ-мощности в резонатор ускоряющей системы решалась задача термоупругости. Решение проводилось в два этапа. На первом этапе решалась задача теплопроводности, на втором — термоупругости. Результаты решения задачи теплопроводности служили исходными данными для задачи термоупругости. В расчетах использовался пакет программ HAST [7].

Задачи решались применительно к импульсному режиму работы ускорителя, имеющему скважность 30. При этом средняя плотность теплового потока на внутренней поверхности резонатора составляет 1358 Вт/м^2 , на наружной поверхности резонатора 163 Вт/м^2 , на внутренней поверхности контейнера 172 Вт/м^2 . Интенсивность теплообмена на поверхности каналов зависит от расхода охлаждающей воды и их геометрических размеров. Расчеты показали, что ускоряюще-фокусирующие электроды смещаются относительно исходного положения на -2 мкм по оси x и $+15$ мкм по оси y (центр координатных осей лежит на оси ускорителя).

Поскольку контейнер устанавливается на шаровых опорах, то он не имеет ограничений по деформациям в определенном направлении. В этой задаче нас интересует деформация места крепления резонатора. По проведенным расчетам она составляет 10 мкм в направлении от оси контейнера.

Таблица 3

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
Внутренний радиус резонатора, мм	86	89
Внешний радиус резонатора, мм	102	109
Радиус контейнера, мм	260	260
Собственная добротность	15900	16350
Погонная емкость, пФ/м	108	102
Погонные потери, кВт/м	54	64
Относительные потери, %, <ul style="list-style-type: none"> на внутренней поверхности резонатора на внешней поверхности резонатора на электродах на внутренней поверхности контейнера 	<ul style="list-style-type: none"> 75 7 5 13 	<ul style="list-style-type: none"> 75 7 5 13

Для получения полной картины деформаций нужно наложить деформацию контейнера на деформацию 2Н-резонатора. Деформация электродов 2Н-резонатора по оси y компенсируется деформацией контейнера и составляет 5 мкм. Следовательно, конструкция 2Н-резонатора сохраняет положение электродов относительно оси ускорения в заданном допуске 50 мкм в импульсном режиме работы ускорителя со скважностью 30. Расход охлаждающей воды 1 кг/с через резонаторы и 0,5 кг/с через контейнер на каждый погонный метр ускорителя. Полученные значения деформации сечения 2Н-резонатора позволяют рассчитать уход частоты резонатора, что необходимо для надежной работы системы автоматической подстройки частоты секции ускорителя.

Аналог 2Н-резонатора ускорителя ЛУСИ длиной 700 мм был испытан в режиме малой скважности вплоть до непрерывного. Из результатов испытаний следует возможность обеспечения ухода электродов от оси за счет термодформации, не превышающей 20 мкм при мощности потерь в стенках 2Н-резонатора, соответствующей данным табл. 3. Такая деформация находится в пределах допуска. Изменение резонансной частоты при этом не превышает 90 кГц и устраняется элементами подстройки частоты.

Как следует из вышеизложенного, ускоряющая система с ПОКФ для инжектора в фазотрон построена по схеме двойного Н-резонатора. Она состоит из двух секций. Каждая секция представляет собой контейнер, внутри которого установлены резонаторы, нагруженные ускоряющее-фокусирующими электродами. Контейнеры и резонаторы изготавливаются из сплава АМГ-6. Этот материал неоднократно использовался в конструкциях ускорителей ИФВЭ.

В режиме, в котором предполагается работа ускорителя (скважность 30), как показывают расчеты [7] и эксперимент, предлагаемая конструкция ускорителя вполне применима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Капчинский И. М., Тепляков В. А.* Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой // ПТЭ. 1970. №2.
2. *Капчинский И. М.* Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.
3. *Zherebtsov A.* Using the 3D Electric Fields for Calculations of the RFQ Parameters // Proc. of the II Intern. BDO Workshop, St. Petersburg, Russia, 1995.
4. *Belyaev O. et al.* IHEP Experience on Creation and Operation of RFQs // Proc. of the 2000 Intern. Linac Conf., USA. Report No. MOD21. V. 1. P. 259.
5. Линейный ускоритель ЛУСИ: Проспект на Междунар. научно-техн. выставке-ярмарке идей и технологий «Будущее России». Протвино, 1994.
6. *Жеребцов А. В., Мальцев А. П., Тепляков В. А.* Препринт ИФВЭ 90-29. Протвино, 1990.
7. *Абрамов А. Г. и др.* Программное обеспечение для расчета температурных полей и деформаций конструкции ускоряющих структур. Препринт ИФВЭ 84-64. Серпухов, 1984.