

Модернизация бустера ИФВЭ для ускорения пучка ионов углерода

А.С. Гуревич, В.М. Мохов, Е.С. Нелипович, В.А. Пономаренко,
В.И. Столповский, Е.Ф. Троянов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

В ИФВЭ рассмотрена возможность создания медицинского облучательного центра на базе существующих ускорительных установок. Для лучевой терапии планируется использование пучка ионов углерода C_{12}^{+6} , ускоренного в быстроциклическом синхротроне — бустере ИФВЭ. Бустер является инжектором протонного пучка в ускоритель У-70. Он работает в пакетно-импульсном режиме с частотой повторения импульсов 16,6 Гц при частоте следования пакетов $\sim 0,1$ Гц. Количество импульсов в пакете может изменяться, но не превышает 32. Конечная энергия ускоренных протонов составляет 1,32 ГэВ.

В работе представлены основные решения по модернизации бустера, касающиеся вопросов инжекции, ускорения и вывода пучка ионов C_{12}^{+6} из ускорительной установки. Согласно требованиям на пучок, в бустере должно ускоряться не менее 10^9 ионов C_{12}^{+6} за импульс. Конечная энергия ионов C_{12}^{+6} составит ~ 420 МэВ/нуклон, что соответствует длине пробега ионов в воде ~ 30 см.

1. Инжекция и накопление пучка ионов углерода

В существующей схеме инжекции пучок протонов, ускоренных в линейном ускорителе ЛУ-30 до энергии 30 МэВ, подводится к начальному промежутку первого периода магнитной структуры бустера, где расположен вводной септум-магнит СМ1. Многооборотный ввод пучка обеспечивается работой септум-магнита и четырех ударных бамп-магнитов УБМ1÷УБМ4, установленных симметрично относительно участка ввода. При этом индукция магнитного поля в заворачивающих магнитах бустера составляет ~ 1400 Гс, а частота обращения частиц 746 кГц.

В схеме инжекции ионов C_{12}^{+6} будут использоваться линейный ускоритель И-100 и новый канал транспортировки (рис. 1). Трасса канала заканчивается в начале 10-го периода.

К промежутку подводятся ионы с энергией 9,64 МэВ/нуклон, что соответствует полю инжекции $B_{инж} = 1564$ Гс и частоте обращения $F_{инж} = 431,4$ кГц на равновесной орбите бустера. Для накопления за один оборот пучка $N_{инж} = 10^9$ ионов необходим ток в импульсе

$$I_{инж} = N_{инж} \cdot F_{инж} \cdot z \cdot q = 4,14 \cdot 10^{-4} \text{ А,} \quad \text{где } z = 6, \quad q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

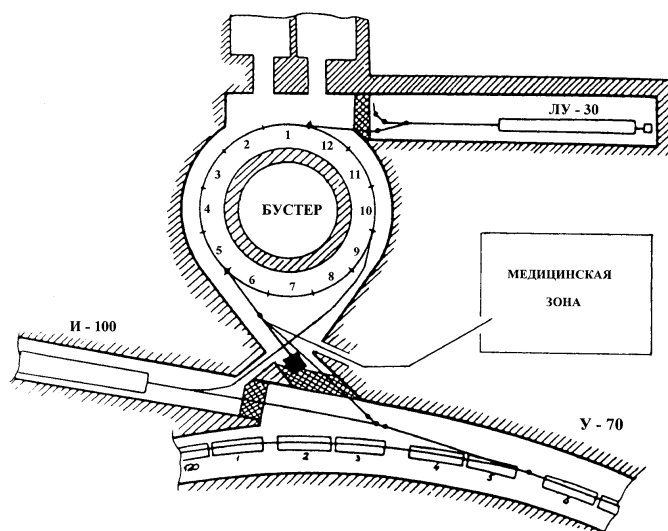


Рис. 1: Схема инжекции и вывода пучков из бустера.

Поскольку на выходе линейного ускорителя предполагается иметь ток ионов на уровне ~ 10 мА, то вполне достаточным является выбор однооборотной инжекции пучка в бустер. Рассмотрение различных вариантов инжекции показало, что оптимальной следует считать схему с установкой в 10-ом периоде нового септум-магнита (начальный промежуток) и нового ударного бамп-магнита (в триплете между линзами 10Д и 10Ф2). По техническим характеристикам септум- и бамп-магниты для инжекции C_{12}^{+6} аналогичны используемым сейчас для инжекции протонов. Пучок ионов будет вводиться в середину промежутка под углом 174 мрад к равновесной орбите и на расстоянии в 109 мм от нее.

В выбранном варианте инжекции протонного пучка и пучка ионов C_{12}^{+6} полностью связаны, что позволяет рассчитывать на быструю перестройку режимов работы комплекса бустера при переходе от ускорения протонов к ускорению ионов углерода.

2. Ускорение пучка ионов C_{12}^{+6}

Вдоль орбиты пучка размещены 9 ускоряющих станций (УС), каждая из которых развивает амплитуду ВЧ-напряжения до 10 кВ. На участке нарастания магнитного поля (длительностью около 30 мс) частота станций перестраивается от 746 до 2750 кГц.

Для ускорения пучка ионов C_{12}^{+6} необходимо существенное изменение режима работы УС. В частности, ввод пучка в бустер с использованием канала из И-100 требует освобождения начального промежутка 10-го периода от установленной там ускоряющей станции, и количество станций уменьшается до 8. Кроме того, необходимо изменение частотного диапазона перестройки станций в соответствии с частотой обращения ускоряемого пучка ионов. Энергии ионов 420 МэВ/нуклон соответствует поле вывода $B_{выб} = 11400$ Гс. Это несколько меньше, чем при работе с протонами (~ 12000 Гс). При ускорении ионов частота обращения пучка увеличивается от 431 до 2190 кГц, имея диапазон перекрытия 5,1.

Были рассмотрены различные возможности реализации режима ускорения ионного пучка и, соответственно, реконструкции УС. В качестве основного выбран вариант с перезахватом пучка со второй кратности на кратность 1. При этом ускоряющие станции разделяются на две группы, каждая из которых управляется своим задающим генератором.

Первая группа начинает ускорение на 2-ой кратности с радиочастотой 862 кГц, вследствие чего в вакуумной камере ускорителя формируются два сгустка ионов. Вторая группа УС вначале выключена и начинает наращивать амплитуду в момент, когда частота обращения достигает 740 кГц (рис. 2б). Некоторое время обе группы работают вместе, причем частота первой группы должна быть строго в два раза больше, а сдвиг фазы между ними меняется по определенному закону. В это время начинается перезахват, два сгустка частиц сближаются. Затем амплитуда первой группы снижается, два сгустка сливаются в один, и дальнейшее ускорение продолжает вторая группа станций.

Такой перезахват известен в физике ускорителей [1], однако он обычно применяется на плате магнитного поля.

Численное моделирование процесса ускорения ионов углерода C_{12}^{+6} с учетом быстрого нарастания поля в магнитном цикле бустера (рис. 2а) показало, что эффективность ускорения может достигать 94%. При этом, если импульсный разброс $\Delta p/p$ в инжектируемом пучке составляет величину $\pm 2,0 \cdot 10^{-3}$, то ускоренный сгусток будет иметь при выводе следующие параметры:

Длина сгустка 10 м; длительность 50 нс; импульсный разброс $\pm 3,0 \cdot 10^{-3}$.

Дополнительно были смоделированы режимы ускорения с уменьшенным количеством станций, что эквивалентно аварийной ситуации. При выходе из строя по одной станции в группе величина эффективности падает до 50%. Учитывая повышенную надежность,

которая должна поддерживаться в работе с медицинским пучком, следует обеспечивать необходимый режим ускорения и в случае отказа 2 станций, т.е. двумя группами по три станции. Расчеты показывают, что в варианте с перезахватом пучка требуется увеличение мощности УС в $2,5 \div 3$ раза.

Для подтверждения расчетов на бустере ИФВЭ был проведен эксперимент по перезахвату протонного пучка со второй кратности на кратность 1 в стандартном цикле ускорения. Существующая аппаратура позволяет двум, выделенным из девяти, ускоряющим станциям работать на второй гармонике частоты обращения [2]. Оказалось, что перезахват возможен, хотя процесс довольно чувствителен к параметрам ускоряющих станций.

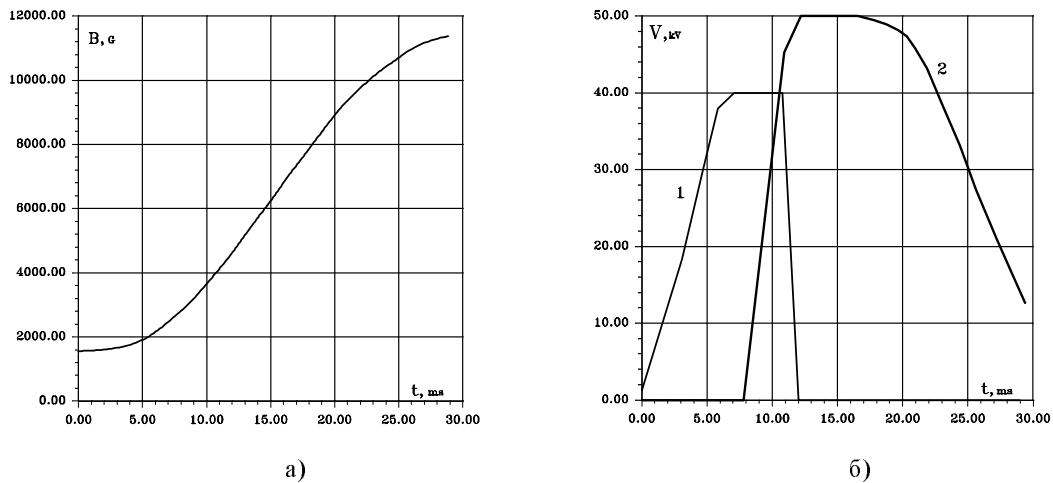


Рис. 2: Изменение: а) магнитного поля; б) амплитуды первой (1) и второй (2) групп УС во время ускорения ионов углерода.

3. Диагностика пучка ионов углерода в бустере

Существующие средства контроля за интенсивностью, размерами и орбитой пучка рассчитаны на ускорение 10^{11} протонов за цикл. Эквивалентный уровень сигналов необходим также для работы обратной связи, поддерживающей стабильное положение пучка в апертуре вакуумной камеры в процессе ускорения. Пучок с 10^9 ионов углерода имеет заряд, соответствующий числу $6 \cdot 10^9$ протонов, из чего следует необходимость дополнительного усиления сигналов в ~ 16 раз. Переход на 2-ю кратность ускорения требует еще примерно двукратного усиления.

Таким образом, доработка аппаратуры диагностики пучка должна обеспечить общее усиление сигналов в ~ 30 раз. Исследования, проведенные с целью определения уровня помех в сигналах с пикап-электродов, показали, что при имеющейся конструкции электродов и трассах передачи сигналов такая доработка возможна.

4. Вывод пучка ионов C_{12}^{+6} из бустера

Вывод пучка ионов (как и протонов) осуществляется с помощью трех бамп-магнитов БМ1÷БМ3, септум-магнита СМ2 и ударного кикер-магнита УМ1. Дискретность перестройки энергии определяется точностью измерения магнитного поля в цикле ускорения. Привязка к полю ведется с помощью реперного датчика на основе электронного парамагнитного резонанса и интегратора с шагом 5 Гс. При настройке вывода на выбранную энергию в районе $W \simeq 400$ МэВ/нуклон относительная ошибка $\Delta W/W$ не превысит значения

$1,0 \cdot 10^{-3}$. Начальные эмиттансы ионного пучка в режиме однооборотной инжекции будут не более $E_{x,z} = 100 \pi$ мм·мрад, что с учетом адиабатического затухания соответствует в выводимом пучке значениям $E_x \sim E_z \sim 14 \pi$ мм·мрад.

Работа систем вывода обеспечивает на выходе септум-магнита положение пучка со среднеквадратичным отклонением 1,1 мм, а аналогичная ошибка по углу не превышает 0,55 мрад.

Ранее для повышения эффективности использования бустера в прикладных исследованиях был создан режим межпакетного программирования (МПП) параметров систем вывода и транспортировки пучка [3]. Реализуется он на основе программирования от пакета к пакету величины поля вывода, токов питания выводных устройств и магнитооптических элементов головной части выводного канала, включающей в себя две квадрупольные линзы и поворотный магнит. Эта часть канала будет использоваться при транспортировке пучка в медицинскую зону.

Режим МПП позволит не только в автономном режиме работы бустера, но и в совместной работе с У-70 в течение коротких остановок основного ускорителя вести облучение пациентов и оперативно за один суперцикл возвращаться к исходным условиям инжекции пучка в У-70.

Заключение

Для эффективной работы установки в режиме ускорения ионов углерода необходимо создать новую систему ввода, реконструировать ускоряющие станции и систему диагностики пучка. Состав выводного оборудования, а также головная часть выводного канала остаются без изменений и обеспечивают вывод пучка в направлении медицинской зоны.

Список литературы

- [1] R.Garoby. New RF-Gymnastics for the anti-protons production beam. CERN PS/OP/Info 89-1.
- [2] Vorobjev V.K., Klimenkov E.V. et al. A second radio-frequency harmonic in the U-70 booster. Proc. EPAC-90, Nice, 1990, v. 2, p. 1020.
- [3] Безкровный В.И., Клименков Е.В. и др. В сб.: Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т.4, с.157.