

# **Развитие режима вывода пучка из бустера ИФВЭ для прикладных исследований**

В.И. Безкровный, А.С. Гуревич, Г.А. Лосев, Ю.В. Миличенко, В.А. Пономаренко,  
Н.И. Правоторов, Г.А. Саматов, В.Н. Толпекин, П.И. Угорич, А.В. Феофилов  
*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

Быстроциклический протонный синхротрон (бустер ИФВЭ) является инжектором пучка в ускоритель У-70. Конечная энергия ускоренных в нем протонов составляет 1,32 ГэВ. Бустер 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. Первые три импульса служат для тренировки и выхода на стационарный режим ряда технологических систем, остальные используются для ускорения пучка. В зависимости от режима работы в бустере может быть ускорено за один цикл от  $2,0 \cdot 10^{11}$  до  $9,0 \cdot 10^{11}$  протонов.

В существующей схеме вывода имеются две ветви выводного канала [1]. По одной из них пучок транспортируется в основной ускоритель, по другой выводится на поглотитель, представляющий из себя стальной куб со стороной 2,6 м. В конце прямой ветви канала, направленной на поглотитель, имеется зона площадью  $\sim 15$  м<sup>2</sup>, где можно устанавливать экспериментальное оборудование и вести исследования с пучком. В настоящее время здесь размещена установка ИТЭФ по измерению энерговыделения в материалах различных мишеней при облучении их протонами [2].

С использованием обычного варианта разводки пучка достаточно запрета на инжекцию в У-70 (отключение поворотного магнита), чтобы ускоренный бустерный пучок номинальной энергии выводился на поглотитель. Однако в тех случаях, когда для исследований требовалась пониженная энергия пучка, совместная работа У-70 и экспериментальной установки исключалась. Типичным для облучения мишеней являлся режим автономной работы бустера в прямую ветвь канала. Кроме изменения энергии в этом режиме возможно управление и другими параметрами пучка.

## **1. Автономный режим работы бустера**

В бустер инжектируются протоны с энергией 30 МэВ. При этом линейный ускоритель ЛУ-30 выдает ток длительностью 10 мкс, который может регулироваться в пределах  $30 \div 80$  мА. Эмиттансы пучка из ЛУ-30 по горизонтальному и вертикальному направлениям одинаковы и равны  $4\pi$  см·мрад (для 95% тока). Импульсный разброс частиц  $\Delta p/p$  составляет  $\pm 3,0 \cdot 10^{-3}$ . Интенсивность ускоренного пучка зависит от вида инжекции. В бустере используются режимы от одно- до четырехоборотной инжекции пучка. Длительность оборота — 1,34 мкс. При многооборотной инжекции эффективный горизонтальный эмиттанс накопленного пучка возрастает до  $40\pi$  см·мрад. Изменяя величину тока из ЛУ-30 и количество оборотов инжекции, можно регулировать яркость пучка.

В процессе ускорения исходный пучок, заполняющий всю орбиту, группируется в сгусток, продольный размер которого уменьшается с ростом энергии. Так, в стандартном режиме работы с конечной энергией 1,32 ГэВ сгусток занимает 22% от оборота, что соответствует длительности 80 нс, и имеет импульсный разброс  $\pm 2,7 \cdot 10^{-3}$ .

Управляя амплитудой ВЧ- поля ускоряющих станций, можно увеличивать длину выводимого сгустка, одновременно снижая величину импульсного разброса. В приведенном выше случае предельное удлинение сгустка составляет около 160 нс при разбросе  $\Delta p/p = \pm 1,3 \cdot 10^{-3}$ .

Вывод пучка осуществляется с помощью трех бамп-магнитов БМ1÷БМ3, септум-магнита СМ2 и ударного кикер-магнита УМ1. Запуск УМ1 синхронизируется с фазой ускоряющего ВЧ-напряжения, так чтобы в момент вывода передний фронт нарастания тока ( $\tau_n \sim 100$  нс) помещался в часть оборота, не содержащую пучка.

Энергия выводимого пучка может изменяться в широких пределах. Нет каких-либо принципиальных ограничений на работу систем вывода, начиная с уровня 200 МэВ. Дискретность перестройки энергии определяется точностью измерения магнитного поля в цикле ускорения. Привязка к полю ведется с помощью реперного датчика на основе электронного параметрического резонанса и аналогового интегратора с шагом 5 Гс. Таким образом, при настройке вывода на выбранную энергию относительная ошибка  $\Delta W/W$  не превышает значений  $2,4 \cdot 10^{-3}$  на нижней и  $5,9 \cdot 10^{-4}$  — на верхней границах диапазона.

К настоящему времени освоен вывод в области энергий  $W = 0,8 \div 1,32$  ГэВ. Размеры пучка на облучаемых образцах составляют  $\sim 5 \times 5$  см<sup>2</sup> и могут варьироваться в зависимости от начальных параметров, режима оптики канала и места установки образца. Положение центра тяжести пучка регулируется дипольными корректорами.

Следует особо отметить возможность решения более тонких прикладных задач. В режиме однооборотной инжекции с укороченными длительностями импульса тока в вводных бамп-магнитах можно накапливать и ускорять до  $3,0 \cdot 10^{11}$  протонов за цикл. При этом дополнительно вводится вторая гармоника ускоряющего поля, что позволяет уменьшить импульсный разброс в пучке. В частности, на уровне энергии 1,32 ГэВ его величина  $\Delta p/p$  составит  $\pm 5,0 \cdot 10^{-4}$ . Кроме того, любой выведенный сгусток можно сопроводить протоколом, содержащим частоту обращения и орбиту пучка, измеренными за  $10 \div 20$  мкс до вывода, и контролировать энергию с точностью, лучшей чем  $10^{-3}$ .

## 2. Режимы вывода пучка при работе бустера в составе ускорительного комплекса

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 прямой ветви канала. Программируются также задержки, синхронизирующие включение систем относительно основных таймерных импульсов.

Режим МПП позволяет в течение коротких остановок основного ускорителя вести облучение экспериментальной установки и оперативно за один суперцикл возвращаться к исходным условиям инжекции пучка в У-70.

В 1996 году завершена отработка режима внутрипакетного программирования (ВПП). Он создает возможность в тех случаях, когда У-70 не потребляет максимальной интенсивности, т.е. используется не весь пакет импульсов, выводить пучок в оставшихся импульсах на экспериментальную установку. При этом количество им-

пульсов, величина интенсивности в них и уровень энергии выводимых частиц программируются.

К особенностям режима ВПП следует отнести “мертвое время” в пакете, необходимое для спадания тока в разводящем поворотном магните при его выключении. В это время все системы бустера работают, но пучок из линейного ускорителя не инжектируется, и в трех циклах пучок отсутствует.

Чтобы уменьшить паузу в пакете до 160 мс, были внесены изменения в силовую часть источников питания поворотного магнита и элементов оптики канала. Кроме того, потребовалась модернизация схемы управления магнитами БМ1÷БМ3 и СМ2, так как в штатном варианте любое изменение внутри пакета управляющих сигналов на входе импульсных источников воспринималось как сбой и вызывало их отключение.

В процессе разработки различных режимов вывода пучка была создана новая система контроля импульсных и ударных источников, включающая в себя встроенные в источники микроконтроллеры и IBM PC в качестве ЭВМ верхнего уровня. Та же машина связана с контроллером, используемым для ввода информации об интенсивности пучка в разных точках канала.

Работа бустера в режиме ВПП отображена на рис.1, где приведена копия с экрана дисплея. В качестве примера показаны данные о состоянии ряда источников, а также интенсивность сгустков на входе в У-70 и перед экспериментальной установкой.

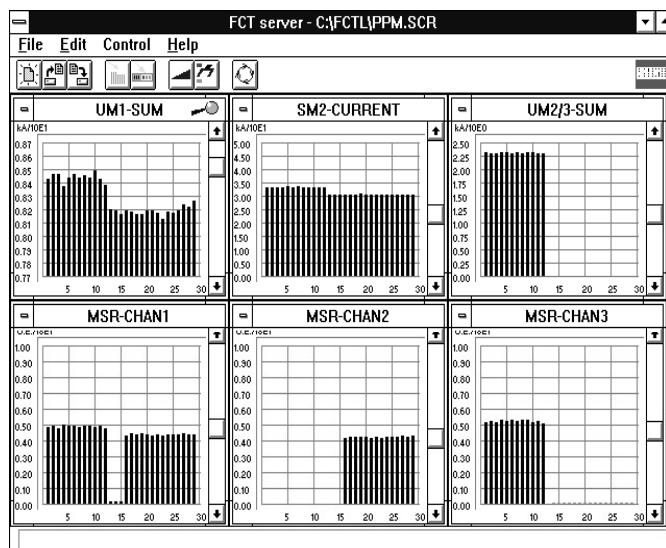


Рис. 1: Переход на пониженную энергию в режиме ВПП.

UM1-SUM — ток выводного кикер-магнита; SM2 — ток выводного септум-магнита; UM2/3-SUM — ток вводного (в У-70) кикер-магнита; MSR-CHAN1 — интенсивность сгустков в начале канала вывода; MSR-CHAN2 — интенсивность сгустков перед экспериментальной установкой; MSR-CHAN3 — сгустков перед вводом в У-70.

## Заключение

Новый режим внутрипакетного программирования снижает стоимость прикладных исследований и обеспечивает высокую эффективность их проведения. Период времени, доступный для выполнения экспериментов, становится сравнимым с дли-

тельностью сеанса работы ускорительного комплекса. При этом имеется возможность вести исследования только в устойчивых режимах работы бустера с наилучшей повторяемостью параметров пучка от цикла к циклу.

### **Список литературы**

- [1] Алеев Е.А., Брук В.Л. и др. В сб.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — М.: Наука, 1977, т. 1, с. 42.
- [2] Беляков-Бодин В.И., Дубинский В.Д. и др. Атомная энергия, 1991, вып. 5, т. 70, с. 339.
- [3] Безкровный В.И., Клименков Е.В. и др. В сб.: Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. — Протвино, 1994, т. 4, с. 157.