

УДК 621.384

УСКОРИТЕЛЬ-НАКОПИТЕЛЬ ИТЭФ-ТВН

Н. Н. Алексеев, Г. Н. Акимов, П. Н. Алексеев, В. Н. Балануца, Б. И. Булькин, Б. А. Волков, С. В. Гапоненко, В. В. Гачурин, Ю. М. Горячев, В. Н. Евтихович, А. С. Журавлев, В. П. Заводов, В. С. Завражнов, П. Р. Зенкевич, Н. Е. Иванов, М. М. Кац, А. В. Кириллов, С. В. Кирюхин, Ю. К. Кондратов, Д. Г. Кошкарев, В. А. Кузнецов, А. Д. Мильяченко, Г. А. Никитин, В. И. Николаев, И. С. Окороков, Э. И. Потрясова, В. Ф. Петрухин, В. И. Романьков, Ю. П. Роцин, В. Г. Самсонов, Д. В. Соснин, Е. А. Сысоев, Б. Ю. Шарков, А. В. Шумиуров, В. А. Щеголев, М. В. Щелканов

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

В ИТЭФ завершен этап реконструкции протонного синхротрона У-10, на основе которого создан ускорительно-накопительный комплекс, позволяющий наряду с протонами ускорять ионы до релятивистских энергий, а также накапливать ионы с энергией несколько сотен МэВ/а.е.м. Физический пуск комплекса выполнен на ионах углерода. Ионы C^{4+} предварительно ускорялись в линейном инжекторе И-3 и в бустерном синхротроне УК, инжектировались по схеме перезарядной инжекции $C^{4+} \rightarrow C^{6+}$ в синхротрон У-10, который использовался либо в качестве накопителя ионов с энергией 200 МэВ/а.е.м., либо для ускорения ионов до энергии 4 ГэВ/а.е.м. Описываются особенности технологической схемы комплекса и результаты экспериментов по оптимизации режима его работы.

The ITER Proton Synchrotron is reconstructed for heavy-ion acceleration to relativistic energy and ions accumulation at energy of several hundreds of MeV/a. m. u. The whole milestones were passed with the beam of carbon ions. The beam of C^{4+} ions had been previously accelerated in two steps — in linear injector I-3 and in booster synchrotron UK. The accelerated beam was transferred from the UK ring to the U-10 ring using the Non-Liouvillian stripping technique ($C^{4+} \rightarrow C^{6+}$) for stacking of C^{6+} batch at an energy of 200 MeV/a. m. u. or for the beam acceleration up to 4 GeV/a. m. u. Current results of activities aimed at experimental investigation of beam dynamics by charge exchange multiple injection process for increasing the beam intensity in accumulator ring are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция ускорительного комплекса ИТЭФ с целью создания на основе протонного синхротрона У-10 тяжелоионного ускорителя-накопителя ИТЭФ-ТВН началась в 1997 г. [1]. При переоборудовании протонного синхротрона в тяжелоионный накопитель сохранилась существующая технология ускорения протонного пучка, а также появилась новая возможность ускорения в У-10 ионов до релятивистских энергий. Основные проектные параметры комплекса даны в табл. 1. В настоящее время завершен первый этап реконструкции, в результате которого создана полностью технологическая схема нового комплекса.

В процессе реконструкции был построен линейный инжектор ионов И-3 на энергию 4 МВ [2], осуществлен физический запуск бустерного ионного синхротрона УК

Таблица 1. Проектные параметры комплекса ИТЭФ-ТВН

Режим работы	Параметры пучка	
Ускоритель протонов	Энергия, ГэВ Интенсивность, c^{-1}	10 10^{11}
Ускоритель ионов	Ускоряемые ионы Энергия, ГэВ/а. е. м. Интенсивность, нуклон/с	до Pb 2–4 $\sim 10^{11}$
Накопитель ионов	Накапливаемые ионы Энергия частиц, МэВ/а. е. м. Энергия пучка, кДж Мощность пучка на мишени, ТВт	до Zn до 700 до 100 до 1

[3], реализована схема перезарядной многократной инжекции ионов из УК в накопительное кольцо, переоборудованное из протонного синхротрона У-10 [4]. В результате пусконаладочных работ получено накопление ядер углерода в кольце У-10 при энергии 200 МэВ/а. е. м., а также ядра углерода ускорены в У-10 до энергии 4 ГэВ/а. е. м. Интенсивность накопленного пучка ядер углерода достигает в настоящее время 10^{10} частиц при интенсивности инжектируемого пучка порядка $5 \cdot 10^8$. Накопленный пучок группируется перед выводом в продольном направлении и выводится в канал транспортировки для использования в экспериментах.

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕЗАРЯДНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Процедура накопления ионов в У-10 основывается на методе перезарядной инжекции с использованием системы однооборотного смещения циркулирующего в накопителе пучка на перезарядную мишень в момент инжекции очередной порции частиц [1, 5]. Таким образом, накопленный пучок проходит через перезарядную мишень всего один раз в каждом цикле инжекции, и возмущающее воздействие мишени на пучок оказывается минимальным.

При инжекции пучок входит в магнитную структуру У-10 (рис. 1) с внутренней стороны кольца в область рассеянного магнитного поля блока Д502, пересекает орбиту на участке блоков Д502–Ф503 и попадает в прямолинейном промежутке 503 с внешней стороны кольца У-10 в магнитный зазор септумного магнита СМГ. Эффективная длина СМГ 0,8 м, апертура 140×60 мм. Максимальная индукция поля 1,2 Тл создается от импульсного источника тока. Длительность импульса 20 мс. Угол поворота пучка в СМГ зависит от заряда и массы иона и для ионов типа C^{4+} составляет 98 мрад. Траектория инжектируемого пучка проходит через магнитные блоки Д504 и Ф505 и перезарядную мишень, размещенную внутри блока Ф505, в 300 мм от его выходного края. Горизонтальное смещение перезарядной фольги относительно равновесной орбиты У-10 выбирается экспериментально при оптимизации условий инжекции. Для перезарядки ионов C^{4+} с энергией 200 МэВ/нуклон использовалась фольга из майлара толщиной 1,5 мг/см².

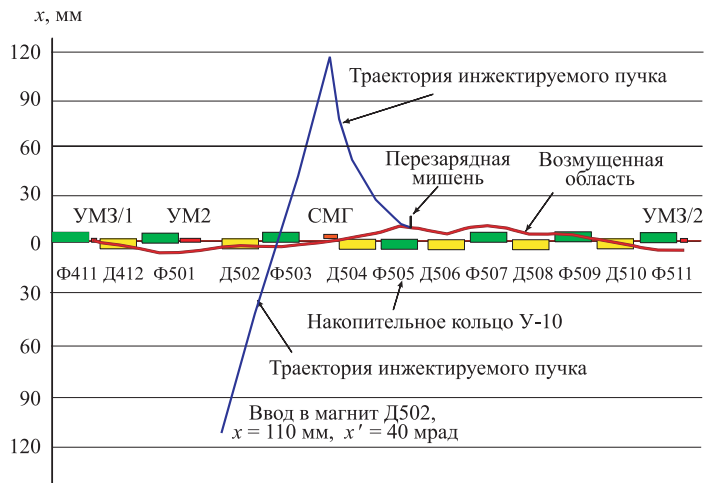


Рис. 1. Траектория инжектируемого пучка

Система однооборотного смещения орбиты У-10, обеспечивающая сопряжение траекторий инжектируемого и циркулирующего пучков в центре перезарядной мишени, построена на трех ударных магнитах (табл. 2), установленных в промежутках 411, 511 и 711. Передний фронт одинаковых по форме импульсов магнитов составляет 250 нс, плоская вершина — 450 нс, задний фронт — 400 нс. Первый ударный магнит отклоняет циркулирующий пучок в 411-м промежутке на угол, при котором смещенная орбита проходит через центр перезарядной мишени. Второй магнит (в промежутке 511) корректирует фазу возмущения орбиты для того, чтобы полностью снять возмущение при помощи третьего магнита в промежутке 711.

Таблица 2. Характеристики ударных магнитов

Количество магнитов	3
Эффективная длина	0,302 м
Максимальная индукция магн. поля	$\leq 0,08$ Тл
Максимальный интеграл индукции поля (BL)	0,025 Тл · м
Апертура вакуумной камеры	90 мм

ОПТИМИЗАЦИЯ НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ

Количество накопленных ионов N_n описывается уравнением

$$\frac{dN_n}{dt} = -\frac{N_n}{\tau_0} - \delta N_n f_{\text{инж}} + n_{\text{инж}} f_{\text{инж}}, \quad (1)$$

где τ_0 — постоянная времени потерь циркулирующего в накопителе пучка; $n_{\text{инж}}$ — количество инжектируемых частиц; $f_{\text{инж}}$ — частота повторения циклов инжекции; δ — доля накопленного пучка, теряемая при инжекции.

Обозначая $\tau_1 = \frac{\tau_0}{1 + \delta f_{\text{инж}} \tau_0}$ — постоянную времени полных потерь частиц в накопителе, получаем выражение для δ через измеряемые величины τ_0 и τ_1 :

$$\delta = \frac{\tau_0 - \tau_1}{f_{\text{инж}} \tau_0 \tau_1}. \quad (2)$$

Из решения уравнения (1)

$$N_{\text{н}}(t) = \frac{n_{\text{инж}} f_{\text{инж}} \tau_0}{1 + \delta f_{\text{инж}} \tau_0} (1 - e^{-t/\tau_0}) \quad (3)$$

находим выражение для предельной интенсивности накопленного пучка

$$N_{\infty} = \frac{n_{\text{инж}}}{1/(f_{\text{инж}} \tau_0) + \delta}, \quad (4)$$

из которого следует, что влияние на интенсивность накопителя частоты повторения циклов $f_{\text{инж}}$ и коэффициента потерь частиц при инжекции δ зависит от состояния накопителя, характеризуемого величиной τ_0 . Увеличение частоты повторения циклов инжекции $f_{\text{инж}}$ эквивалентно увеличению τ_0 , при этом интенсивность накопителя может быть увеличена за счет каждого из этих факторов только при достаточно малой величине δ .

Потери накопленного пучка, описываемые величиной τ_0 , зависят от состояния магнитной системы накопителя, обеспечивающей устойчивость поперечного движения частиц, а также от вакуума в кольцевой камере. При высокой интенсивности накопленного пучка существенным становится также кулоновский сдвиг бетатронной частоты, импедансы связи и эффекты внутрипучкового рассеяния частиц, определяющие в конечном счете предельную интенсивность накопленного пучка.

Доля накопленного пучка, теряемая при инжекции очередной порции частиц, зависит от многих параметров

$$\delta(X, P, \lambda),$$

которые в приведенном выражении условно разделены по трем группам: X — параметры системы инжекции; P — параметры пучка; λ — возмущающие факторы. Настройка системы инжекции (X) определяется параметрами переводного ионопровода, координатами траектории пучка в точке пересечения с перезарядной мишенью, амплитудой однооборотного возмущения орбиты, характеристиками перезарядной мишени. К существенным параметрам пучка (P) относятся энергия, эмиттанс и разброс частиц по импульсам. Под возмущающими факторами (λ) подразумеваются неидеальности системы инжекции, приводящие к увеличению температуры накопленного пучка.

Влияние параметров инжекции на эффективность накопления иллюстрируется диаграммой на рис. 2, отображающей процесс инжекции в поперечном фазовом пространстве. Если вектор (x_0, x'_0) обозначает исходное положение равновесной орбиты в сечении мишени, $(\Delta x_0, \Delta x'_0)$ — однооборотное смещение орбиты при инжекции, (x_1, x'_1) — координаты траектории инжекции в точке пересечения с мишенью, то отклонение вектора (x_1, x'_1) от суммы векторов $\{(x_0, x'_0) + (\Delta x_0, \Delta x'_0)\}$ приводит к инжекции в периферийную часть накопленного пучка либо к потере частиц. Смещение орбиты на вектор $(\Delta x_0, \Delta x'_0)$ выполняется первым ударным магнитом (УМ1), два других магнита (УМ2-3) возвращают орбиту в исходное состояние при условии их согласования (по времени запуска и амплитуде импульсов) с первым магнитом. Рассогласование ударных магнитов приводит к увеличению фазового объема накопленного пучка.

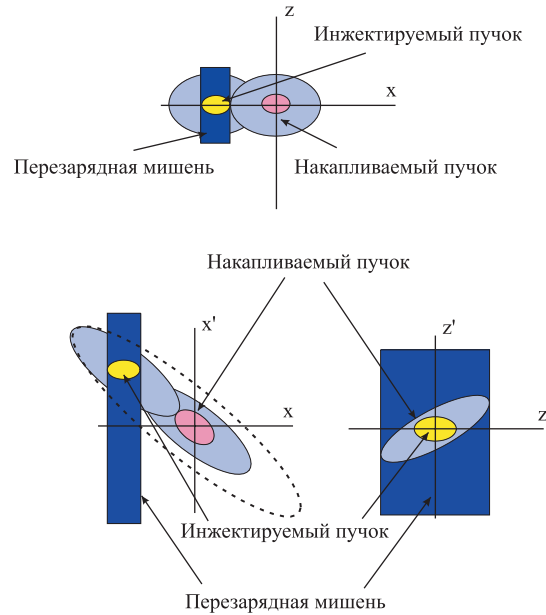


Рис. 2. Схема перезарядной инжекции в фазовом пространстве

Из-за больших углов поворота в переводном ионопроводе траектория инжекции существенно зависит от энергии пучка. Вывод пучка из УК осуществлялся на растущем магнитном поле, величина которого (и, соответственно, энергия пучка) измеряется с достаточной точностью дискретным интегратором (ДИ). Однако синхронизация с ДИ момента вывода пучка оказалась недостаточно эффективной из-за импульсного режима работы магнитных элементов переводного ионопровода: даже небольшое изменение скорости нарастания индукции поля в УК приводило к существенному смещению запуска импульсных источников питания поворотных магнитов ионопровода относительно срабатывания выводного ударного магнита. Удовлетворительный результат был получен при помощи схемы запуска импульсных магнитов системы инжекции от ДИ и последующим отсчетом временного интервала по таймеру для выработки импульса запуска выводного ударного магнита. В этой схеме энергия выведенного пучка меняется со скоростью нарастания индукции поля УК на момент вывода, но это изменение оказалось менее существенным для условий инжекции.

Долговременная стабильность циркулирующего (накапливаемого) пучка достигается коррекцией магнитного поля, компенсирующей равновесную орбиту и бетатронные резонансы. Достаточно высокая энергия накопления пучка в У-10 не позволяет эффективно использовать существующую систему коррекции малых полей, применяемую при ускорении протонного пучка. Поэтому для накопителя У-10 создается новая система коррекции магнитного поля.

Проблемы стабилизации режима накопления связаны в основном с циклическим характером этого процесса и импульсным режимом работы большого числа технологических устройств. Стабильная работа ускорительного комплекса достигается, как правило, в

процессе его долговременной эксплуатации путем последовательного выявления и устранения наиболее существенных дефектов и слабых мест в системах и схемах управления и синхронизации. В частности, в системе многократной инжекции У-10 один из возмущающих эффектов, приводящих к значительной неустойчивости накопления, оказался связан с индуцированной импульсными магнитными элементами э. д. с. в контурах, образованных заземленной в нескольких местах вакуумной камерой, охватывающей магнитные блоки накопителя. Эффект был устранен установкой дополнительных изолирующих вставок в вакуумную камеру, разрывающих замкнутые контуры.

Характеристики пучка, используемого при наладке накопительного кольца У-10, приведены в табл. 3. Впервые накопление было получено 25 марта 2002 г. [6]. Последующие усовершенствования и оптимизация технологии перезарядной инжекции позволили существенно повысить стабильность процесса накопления.

Таблица 3. Характеристика пучка при накоплении в У-10

Схема перезарядной инжекции	$^{12}\text{C}^{4+} \rightarrow ^{12}\text{C}^{6+}$
Энергия, МэВ/а. е. м.	200
Удельный импульс, МэВ/с	2000
Разброс по импульсам, %	$\pm 0,04$
Эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	~ 5

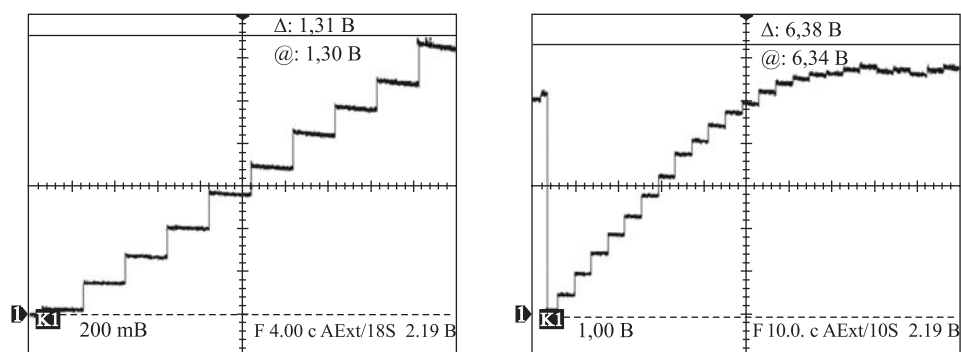


Рис. 3. Осциллограммы интенсивности ядер углерода с энергией 200 МэВ/а. е. м. при накоплении в У-10 ($1\text{В}/2 \cdot 10^9$ ионов)

После получения первого накопления мы провели два двухнедельных наладочных сеанса (в феврале и мае 2003 г.). Осциллограммы процесса накопления, полученные в последнем сеансе, показаны на рис. 3. По мере увеличения интенсивности накапливаемого пучка эффективность инжекции снижается, т. к. растут потери частиц из-за однооборотного возмущения орбиты при инжекции. Осциллограмма потерь накопленного пучка при выключенной системе инжекции, характеризующая качество магнитной системы накопителя и состояние вакуума, приведена на рис. 4, а. Постоянную времени потерь $\tau_0 \sim 160$ с можно объяснить увеличением фазового объема пучка из-за раскачки

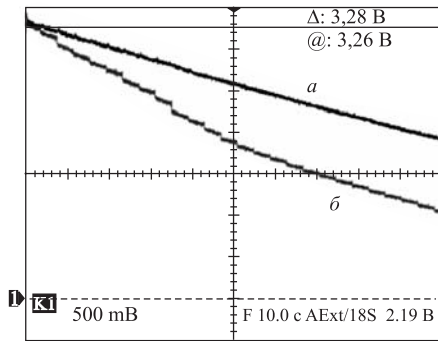


Рис. 4. Осциллограммы потерь накопленного пучка: с выключенной (а) и работающей (б) системой инжекции

$\delta = 0,025$. Таким образом, в соответствии с формулой (4) при существующем качестве системы инжекции количество накопленных ионов не может превысить интенсивность инжектируемого пучка более, чем в 40 раз.

бетатронных колебаний на нелинейных резонансах. Потери частиц из-за рассеяния на остаточном газе при давлении в вакуумной камере накопителя 10^{-8} торр, которое имело место, не являются в данном случае существенными.

При воздействии на циркулирующий пучок ударных магнитов системы однооборотного смещения орбиты с частотой 0,25 Гц постоянная времени потерь уменьшается вдвое до $\tau_1 \sim 80$ с (рис. 4, б). Увеличение темпа потерь объясняется «срезанием» частиц с большими амплитудами бетатронных колебаний при смещении орбиты, а также возмущающим воздействием на пучок «дрожания» импульсов ударных магнитов.

Подставляя в формулу (2) измеренные значения постоянных времени τ_0 и τ_1 , получаем

ПРОДОЛЬНАЯ ГРУППИРОВКА И ВЫВОД НАКОПЛЕННОГО ПУЧКА

Для увеличения плотности накопленного пучка перед выводом на экспериментальную мишень осуществляется продольная группировка частиц при помощи высокочастотного ускоряющего поля. Мы использовали для этой цели один ускоряющий резонатор, настроенный на первую гармонику частоты обращения пучка. Пучок накапливается при напряжении на зазоре ускоряющей станции 1 кВ, перед выводом накопленного пучка

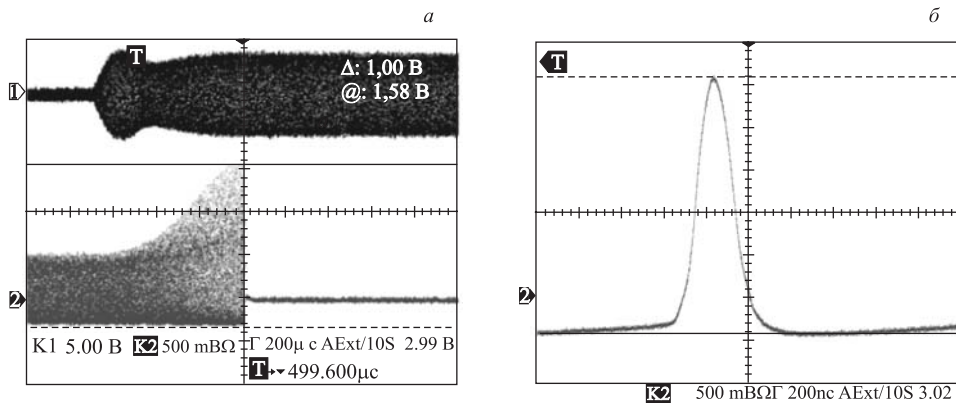


Рис. 5. Осциллограммы продольной группировки накопленного пучка: а) огибающие ВЧ и банча; б) форма банча

напряжение увеличивается до 10 кВ. Как видно из осциллограммы на рис. 5, переходной процесс при 10-кратном увеличении амплитуды напряжения в резонаторе занимает около 300 мкс, при этом амплитуда сигнала банча пучка, и соответственно продольная плотность пучка, увеличивается за время четверти периода синхротронных колебаний более, чем вдвое. В момент достижения максимальной амплитуды банча запускается ударный магнит, и пучок выводится на экспериментальную мишень.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ

Создание бустерного синхротрона УК и системы перезарядной инжекции ионов из УК в У-10 позволило рассмотреть возможность ускорения ионов в У-10 до релятивистской энергии. Дополнительная модификация У-10 состояла в разработке схемы управления магнитными циклами УК и У-10, обеспечивающей необходимую точность согласования энергии инжектируемого пучка с магнитным полем У-10 на момент инжекции, а также при переводе управления радиочастотой на новый задающий генератор, приспособленный для ускорения любого типа ионов.

Отличие схемы однократной инжекции от описанной выше схемы многократной инжекции состоит в том, что не требуется создавать однооборотного возмущения замкнутой орбиты для смещения циркулирующего пучка на перезарядную мишень, осуществляемого при помощи трех ударных магнитов. Достаточно двух ударных магнитов, устраняющих бетатронные колебания инжектированного пучка после прохождения последним перезарядной мишени.

После того как была получена циркуляция инжектированного пучка ядер углерода на растущем поле У-10, процедура наладки ускорения до предельной энергии состояла в оптимизации функции связи радиочастоты ускоряющего поля с магнитным полем У-10. Задача оптимизации упрощалась тем, что первоначальная функция радиочастоты была вычислена для ядер углерода с неплохой точностью ($\sim 10^{-3}$) по аналогичной функции, полученной экспериментально при ускорении протонного пучка с использованием старой системы управления радиочастотой. Точность расчетной функции оказалась достаточной для ускорения ядер углерода с 50 МэВ/а. е. м. до 2 ГэВ/а. е. м. Ускорение до предельной энергии было достигнуто при помощи нескольких линейных итераций функции связи частоты с полем. При выходе на площадку магнитного цикла с энергией пучка 4 ГэВ/а. е. м. потребовалась дополнительная коррекция управляющей функции радиочастоты для компенсации смещения равновесной фазы ускоряющего напряжения. Осциллограмма интенсивности ускоренного пучка показана на рис. 6.

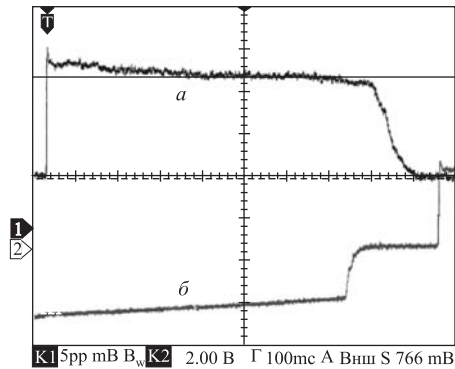


Рис. 6. Осциллограммы ускорения ядер углерода в У-10 до энергии 4 ГэВ/а. е. м.: а) интенсивность пучка ($1В/10^8$ частиц); б) сигнал производной магнитного цикла

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция ускорительного комплекса ИТЭФ является важным этапом обновления экспериментальной базы института и создания новых возможностей для фундаментальных и прикладных исследований с использованием ускоренных пучков заряженных частиц по направлениям релятивистской ядерной физики, физики высокой плотности энергии в веществе, медицинской физики и др. Выбранная схема реконструкции представляется достаточно оптимальной и перспективной, т. к. в ней эффективно используется сложившаяся инфраструктура комплекса и при минимальных затратах на строительные работы и дорогостоящее оборудование создается качественно новая установка с возможностью ее дальнейшего совершенствования.

Наладка созданной в результате реконструкции протонного синхротрона У-10 технологической схемы ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН показала возможность его использования в следующих основных режимах: 1) ускорение протонов до энергии 10 ГэВ; 2) ускорение ионов до энергии, ограниченной максимальной жесткостью магнитного кольца У-10 (34 Тл·м); 3) накопление ионов с энергией несколько сотен МэВ/а. е. м.; 4) ускорение ионов углерода в УК до энергии 300 МэВ/а. е. м. для биологических и клинических исследований по ионной терапии. Дальнейшее развитие комплекса будет направлено на ускорение и накопление более тяжелых ионов, увеличение интенсивности ускоренного и мощности накопленного пучка, а также модернизацию существующих и создание новых экспериментальных установок.

Самые тяжелые ионы (до Рb и тяжелее) смогут ускоряться и накапливаться после увеличения мощности лазера в ионном источнике до 50–100 Дж. Новый лазерный источник ионов планируется установить в следующем году. Кардинальное увеличение (на порядок и более) интенсивности ускоренных ионных пучков будет получено в результате создания сильноточного ионного инжектора И-4 на энергию 7–8 МэВ/а. е. м. В настоящее время проект нового инжектора разработан и начато изготовление его ускоряющей структуры. Для получения предельной мощности накопленного пучка (до 1 ТВт) необходимо максимально увеличить скорость накопления ионов. Существующая конфигурация комплекса позволяет кардинально увеличить темп накопления ионов за счет увеличения частоты повторения циклов ускорения, т. к. магниты, из которых собран бустерный синхротрон УК, рассчитаны на нарастание магнитного поля до величины 50 Тл/с, при которой достигается частота повторения циклов ускорения 20 Гц [6]. Рассматривается также возможность улучшения качества накопленного пучка за счет применения в накопительном кольце электронного охлаждения [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошкарев Д. Г., Алексеев Н. Н., Шарков Б. Ю. Сооружение тяжелоионного накопителя ТВН // Тр. XVI Совещ. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1998. Т. 2. С. 100–105.
2. Alexeev N. N., Bereznitsky S. L., Nikolaev V. I. Beam dynamics in matching channel of IТЭF-TWAC Heavy Ion Injector I-3 // Proc. of EPAC-2000. P. 1283–1285.
3. Алексеев Н. Н. и др. Ускорение ионов C^{4+} в бустерном синхротроне УК ИТЭФ // Тр. XVII Совещ. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000. Т. 2. С. 231–235.

4. *Алексеев Н. Н., Кошкарев Д. Г., Шарков Б. Ю.* Нелиувиллевское накопление ядер углерода в ускорительно-накопительном комплексе ИТЭФ // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, вып. 3. С. 149–152.
5. *Zenkevich P., Alexeev N., Bolshakov A.* Strategy of Intense Ion Beam Accumulation by Use of Charge Exchange Injection // Nucl. Instr. Meth. in Rhys. Res. A. 2001. V. 464. P. 616–620.
6. *Alexeev N. N. et al.* Status of the Terawatt Accumulator Accelerator project // Laser and Particle Beams. 2002. V. 20. P. 385–391.
7. *Syresin E. et al.* Project of TWACElectron Cooler // Physica Scripta. 2003. V. T104. P. 160–163.