

## УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Н.Н. Алексеев, А.Е. Большаков, М.А. Веселов, Л.Л. Гольдин, Ю.Б. Зудинов,  
Б.И. Круглов, П.И. Лебедев, В.И. Николаев, К.К. Оносовский, Э.И. Потрясова,  
В.Г. Шевченко, М.В. Щелканов, И.В. Чувило

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

А.А. Васильев

Государственный комитет по использованию атомной энергии, Москва

### Введение

Ускорители легких ионов обычно рассчитываются на два возможных отношения заряда ионов к их массе:  $Z/A = 1$  (протоны) и  $Z/A = 1/2$  (легкие ядра). В то же время ускорители, предназначенные для ускорения как легких, так и тяжелых ионов, должны по необходимости работать при разных значениях  $Z/A$  и, следовательно, при различных законах связи частоты ускоряющего и индукции магнитного поля. В ускорителях, рассчитанных на разные  $Z/A$ , возникает возможность ускорять ионы, сохранившие небольшое или даже заметное число электронов. Один из главных вопросов, возникающих при разработке таких ускорителей, заключается в том, чтобы решить, следует ли пользоваться этой возможностью. При ускорении голых ядер ослабляются требования к вакууму и достигается максимально возможная для данной магнитной системы энергия ускоренных частиц. При ускорении ионов, сохраняющих часть электронов, упрощается конструкция инжектора и становится возможным простой способ вывода ускоренных частиц путем их перезарядки на мишени, но несколько уменьшается предельная энергия и становятся более жесткими требования к вакууму.

Принятый в ИТЭФ проект предусматривает ускорение неполностью ободренных ионов, а на первой стадии ускорения — даже ионов с небольшими зарядностями (начиная с  $Z/A \sim 1/20$ ). При этом нужно, чтобы давление в камере не превосходило  $\sim 10^{-10}$  тор, и необходимо второе магнитное кольцо для промежуточной перезарядки тяжелых ионов. При переходе от иона к иону приходится перестраивать закон связи частоты с магнитным полем. Все это влечет за собой некоторое усложнение проекта, но окупается способностью ускорителя работать с самыми разными  $Z/A$ , а значит, с любыми ионами, с разными источниками и с различными схемами инжекции и ускорения. Последняя возможность открывает широкую дорогу для совершенствований, и поэтому представляется нам особенно важной.

### Состав и схема работы ускорителя

Сооружение протон-тяжелоионного ускорительного комплекса /1, 2/ производится на базе действующего протонного синхротрона ИТЭФ на энергию 9,3 ГэВ и начато в 1984 г.

Схема ускорения протонов остается без изменений. Для ускорения тяжелых ионов дополнительно устанавливаются источник, инжектор и второе магнитное кольцо, располагающееся в том же туннеле и имеющее меньший периметр, чем имеющееся. Усовершенствуются почти все технологические системы ускорителя. Сооружается автоматизированная многопроцессорная система управления ускорителем, в задачи которой входят диагностика, управление токами в цепях коррекции, построение — для каждого значения  $Z/A$  — закона связи частоты ускоряющего и индукции магнитного поля, сбор и отображение

информации, выдача многочисленных управляющих сигналов, расчет и осуществление различных программ коррекции магнитного поля и т.д.

Схема работы ускорителя строится следующим образом. Ионы, выходящие из источника, ускорятся в резонансном ускорителе типа ИЛУ-2 и переводятся в основное кольцо. В зависимости от начального значения  $Z/A$  ионы могут пропускаться через ИЛУ один раз или дважды. В последнем случае после первого ускорения (в двух последовательных зазорах резонансного высокочастотного ускорителя) ионы поворачиваются на  $270^\circ$  и проходят через вторую ускорительную двухазорную систему, перпендикулярную первой. Двойное ускорение необходимо для ионов с малыми начальными значениями  $Z/A$ . По выходе из ИЛУ ионы перезаряжаются, транспортируются по ионопроводу и вводятся в имеющееся ускоряющее кольцо. Если при этом удастся достичь  $Z/A \approx 0,5$ , то ионы ускорятся в этом кольце до энергии 3,5 ГэВ/н и медленно наводятся на перезарядную мишень. Ободренные до голых ядер ионы покидают ускоритель и транспортируются к экспериментальным установкам. Если же столь высоких отношений  $Z/A$  достичь не удастся, ионы ускорятся в имеющемся ускорительном кольце до энергии, необходимой для получения  $Z'/Z \approx 0,9$ , быстро наводятся на перезарядную мишень, покидают ускоритель и инжектируются во второе (вспомогательное) магнитное кольцо. Это кольцо на первой стадии реконструкции не будет служить для ускорения и предназначено только для временного удерживания перезаряженных ионов. В дальнейшем оно будет превращено в ускоряющее.

После вывода частиц во вспомогательное кольцо магнитное поле первого кольца снижается и его ускоряющая система перестраивается так, чтобы в него можно было возвратить перезаряженные ионы из второго кольца. Затем эти частицы ускорятся и выводятся также на перезарядку, как это было описано ранее. В первом режиме частота следования циклов сохраняется (25 в минуту), а во втором снижается.

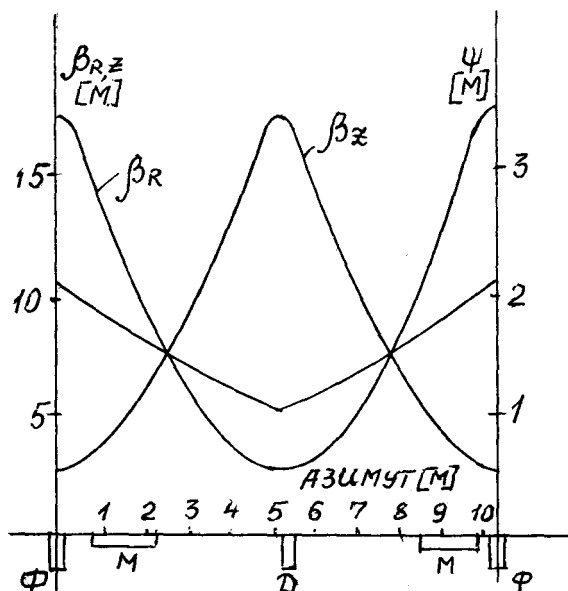
Перевод частиц из основного во вспомогательное кольцо и обратно производится за один оборот посредством быстрых систем ввода-вывода.

### Основные параметры вспомогательного кольца

Вспомогательное кольцо строится по системе ФОДО и состоит из 42 заворачивающих магнитных блоков (БЗ) и 42 квадрупольных линз. Все магнитные элементы включены последовательно и питаются постоянным током. Для сокращения сроков и стоимости при сооружении этого кольца решено использовать магнитные элементы (заворачивающие и фокусирующие магнитные блоки), которые были разработаны для бустера ИФБЭ /3/. Магнитная структура кольца состоит из 21 периода.

На рисунке приведены период магнитной структуры и расчетные значения  $\beta_{z,z}$ -функций  $\psi$ -функция.

Рабочая область бетатронных частот  $5,5 < Q_{\beta,z} < 6,0$ .



Характеристические функции периода:  
 $\beta_z, \beta_x$  - параметры Твисса,  
 $\psi$  - дисперсионная функция.

Основные расчетные параметры вспомогательного кольца следующие:

Периметр орбиты, м	223
Число периодов	21
Схема фокусировки	ФОДО
Число бетатронных колебаний:	
по радиусу	5,75
по вертикали	5,75
Критическая энергия (кинетическая), ГэВ/н	4
Число заворачивающих магнитов	42
Длина заворачивающего магнита по полю, м	1,472
Число квадрупольных линз	21Ф+21Ц
Число больших прямолинейных промежутков в периоде	2
Длина большого промежутка, м	2,84
Радиус кривизны траектории в магните, м	9,37
Апертура заворачивающего магнита, $R \times Z$ , мм	170x74
Апертура квадрупольных линз (диаметр вписанного круга), мм	150

Для питания магнитов вспомогательного кольца будут использованы источники питания напряжением, рассчитанные на ток до 5 кА при напряжении до 1 кВ. Для коррекции горизонтальных возмущений орбиты предусматриваются 42 источника тока, нагруженные на дополнительные обмотки заворачивающих магнитов. Вертикальные возмущения равновесной орбиты будут корректироваться при помощи 21 источника тока, нагруженных на дипольные обмотки вспомогательных универсальных линз. Для коррекции азимутальных гармоник магнитного поля из дополнительных обмоток квадрупольных линз будут собраны 8 корректирующих цепей. Коррекция нелинейных резонансов производится при помощи 42 универсальных корректирующих линз.

#### Вакуумная система

Разработка вакуумной системы ускорителя в настоящее время закончена. Изготовлен первый участок новой вакуумной камеры (1/8 часть кольца), который будет установлен в работающем магнитном кольце.

Вакуумная камера имеет овальную форму (140x80 мм), изготовлена из нержавеющей стали IX18Ni10T, имеет гладкую электрополированную поверхность. Толщина стенки - 0,4 мм. Механическая прочность обеспечивается ребрами жесткости. Внутри камеры по всей ее длине расположены трубки, покрытые снаружи нераспыляемым геттером из пористого титана (для пучка требуется размер 110x80). Магниторазрядные насосы НМД-04 установлены с интервалом 4 метра. Камера снабжена нагревателем, обеспечивающим ее прогрев до 400°С (непосредственно в зазоре магнита). После 48 часов прогрева и последующей активации геттера в камере получен вакуум  $(1-3) \cdot 10^{-11}$  тор.

#### Система ввода/вывода пучка и каналы транспортировки

Инжектор связывается с синхротроном ионорд, и будут установлены 4 импульсных поворотных магнита (ионопровод обходит сепараторы существующего выводного тракта) и 28 квадрупольных линз. Последние 4 линзы согласуют эмиттанс ионного пучка с аксептансом ускорителя У-10. Посадка ионов на орбиту осуществляется с помощью электростатического инфлектора.

Однооборотный вывод ионов из существующего кольца во вспомогательное производится с помощью ударного ферритового магнита, набрасывающего пучок на перезарядную мишень. После взаимодействия с мишенью ионы резко изменяют зарядность, заворачиваются внутрь и попадают в тракт перевода пучка во вспомогательное кольцо. В этом тракте установлены два поворотных магнита и четыре квадрупольные линзы с независимым импульсным электропитанием. Для ввода ионов во вспомогательное кольцо и последующего их вывода устанавливаются ударные магниты. Система ввода в основное кольцо состоит из быстрого септумного магнита, электростатического инфлектора и двух ударных магнитов.

#### Система диагностики пучка

Для контроля тока пучка, покидающего источник, и на выходе инжектора будут установлены трансформаторы тока и цилиндры Фарадея. Для анализа пучка по зарядностям на выходе из ис-

точника разрабатывается электродинамический анализатор. Энергетический спектр пучка на выходе инжектора измеряется при помощи магнитного спектрометра. Поперечный фазовый объем пучка исследуется при помощи коллимирующих щелей и ионизационных профилометров на микроканальных пластинах.

В качестве основных датчиков, обеспечивающих информацию о параметрах пучка, ускоряемого в синхротроне, используются трансформаторы тока, пикап-электроды, резистивные датчики и ионизационные профилометры на микроканальных пластинах. Аппаратура диагностики пучка во вспомогательном кольце аналогична аппаратуре синхротрона У-10.

#### Состояние работ

Источники тяжелых ионов на основе  $\text{CO}_2$ -лазера и электронного циклотронного резонанса находятся в процессе изготовления. Изготовлен и налажен дуоплазмотронный источник ионов гелия. В импульсе длительностью 20 мкс от него получен ток с амплитудой 250 мА. Этот источник будет служить для предварительной наладки инжектора, тракта транспортировки пучка в синхротрон У-10, систем диагностики и т.д. Возможно, что на нем удастся получать и ионы более тяжелых элементов.

Изготовлена и предварительно налажена система ВЧ питания инжектора. Завершаются по-

лировка его вакуумного резонатора и изготовление трубок дрейфа. Собрана система вакуумной откачки резонатора.

Заканчивается изготовление магнитной системы ионпровода связи инжектора с синхротроном У-10. Начаты работы по изготовлению электродинамического анализатора и магнитного спектрометра пучка.

Проводятся работы по усовершенствованию ускоряющей системы основного кольца. Вдвое поднята максимальная скорость нарастания магнитного поля. Проведены первые опыты по перезавхвату частиц в процессе ускорения.

Изготовлен первый участок новой вакуумной камеры ускорителя. Развернуто изготовление других участков камеры.

Изготовлено около 1/2 заворачивающих блоков вспомогательного магнитного кольца.

#### Литература

1. Большаков А.Е. и др. Комплекс ИТЭФ для ускорения протонов и тяжелых ионов. Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984., том II, с.3-7.
2. Алексеев Н.Н. и др. Физическое обоснование проекта протонтяжелоионного ускорительного комплекса на базе протонного синхротрона ИТЭФ. Препринт ИТЭФ - 110, 1985.
3. Адо Ю.М. и др. Кольцевой инжектор ускорителя ИФВЭ. - Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1977. т. I, с. 42.

#### Discussion

Вопрос из зала. Когда вы собираетесь окончить проектирование и начать эксперименты?

Н.Н.Алексеев. Ситуация такова: по нашим планам мы к концу этого года надеемся ввести мощность в инжектор, получить те самые 3 МВ на наших трубках дрейфа и с начала следующего года начать совместную наладку источника ионов с инжектором. По предварительным планам ввод пучка в кольцо намечался на начало 88 года. С января 1988 г. мы должны ввести тяжелые ионы в кольцо и начать ускорение.