

## Оптимизация конфигурации ионного инжектора И-3 для протон-ионного ускорительного комплекса ИТЭФ

Н.Н.Алексеев, С.Л.Березницкий, А.Е.Большаков, В.И.Николаев,  
ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Двухзоровый линейный инжектор И-3, работающий на частоте 2,7 МГц при напряжении на ускоряющем зазоре до 3 МВ, предназначен для предварительного ускорения тяжелых ионов с отношением заряда к массе в диапазоне от 0,2 до 0,5 до энергии 1-2 МэВ/н. Конфигурация инжектора оптимизировалась методами численного моделирования для получения максимальной величины захвата пучка в режим ускорения по продольному и поперечному движениям с учетом расталкивающих сил пространственного заряда. При величине тока пучка на входе ускорителя до 10 мА удастся ускорить до 70% частиц с нормализованным поперечным эмиттансом  $5 \cdot 10^{-10}$  м·мрад и разбросом по импульсам ускоренных частиц в пределах  $\pm 0,5\%$ . Приводятся методика и результаты моделирования, описывается оптимизированная конфигурация инжектора, обсуждаются пути дальнейшего улучшения его параметров.

### Введение

Ионный инжектор И-3 для протон-ионного ускорительного комплекса ИТЭФ был сконструирован в 1985 году /1/ на основе импульсного линейного ускорителя электронов ИЛУ-2, созданного в ИЯФ (г. Новосибирск) /2/. Инжектор И-3 был запущен в ИТЭФ на ионах с отношением заряда к массе  $< 0,1$  с током ускоренных частиц около 1 мА. В связи с новым проектом модернизации протон-ионного ускорительного комплекса ИТЭФ, в котором предполагается создать ускорительно-накопительный комплекс тяжелых ионов (установку ИТЭФ-ТВН), способный генерировать пучки предельно высокой мощности (до 1 ТВт), были пересмотрены основные параметры инжектора и оптимизирована его конфигурация с целью увеличения тока ускоренного до энергии 1-2,0 МэВ/н пучка ионов с отношением заряда к массе в диапазоне 0,2-0,5.

### Конструкция инжектора

Схема линейного канала ионного инжектора И-3 показана на рис.1. Инжектор является импульсным линейным ускорителем резонаторного типа с одной пролетной трубкой и двумя ускоряющими зазорами, работающий на частоте 2,6-2,8 МГц при напряжении на ускоряющем зазоре до 3 МВ. Ускоряющий резонатор собран из четвертьволновой спиральной линии с подвешенной на конце пролетной трубкой, помещенной в цилиндрический стальной бак, являющийся одновременно вакуумным кожухом ускорителя. Резонансная частота LC-контура резонатора определяется индуктивностью спиральной линии и распределенной емкостью спирали с пролетной трубкой на внутреннюю стенку бака.

Резонатор позволяет ускорять с той или иной эффективностью практически любые заряженные частицы до энергии, определяемой типом ионов, амплитудой ускоряющего напряжения и длиной пролетной трубки. При постоянной частоте и ограниченной сверху амплитуде ускоряющего напряжения максимальная энергия иона достигается, при определенной, оптимальной длине пролетной трубки, которая тем больше, чем выше отношение заряда иона к его массе. В окрестности максимального значения энергия ускоренного иона слабо зависит от длины пролетной трубки. По результатам расчетов мы изготовили пролетную трубку длиной 1,8 м, которая является оптимальной для ионов с  $z/A=0,35$  при амплитуде ускоряющего напряжения  $U=2$  МВ.

На входе ускоряющего резонатора размещается согласующий канал, предназначенный для транспортировки ионного пучка от источника, а также для размещения высо-

кочастотного группирователя частиц, устройства сепарации ионов с заданным отношением заряда к массе (фильтр Вина) и датчиков для измерения параметров пучка.

Выбранные положение и геометрические размеры группирователя обеспечивают для заданных типов ионов близкие к оптимальным условия группировки при напряжении до 10 кВ.

Для поперечной фокусировки пучка изготовлены простые по конструкции аксиально-симметричные электростатические линзы. Достаточно большие абберации, характерные для линз данного типа, приводят к некоторому увеличению эмиттанса пучка, в основном из-за нелинейного отклонения периферийных частиц. Особенно сильной является абберация в короткофокусных линзах. Такая линза устанавливается в непосредственной близости от первого ускоряющего промежутка резонатора и фокусирует пучок в пятно малого размера на входе промежутка. Абберация этой линзы, выраженная в нелинейных угловых отклонениях частиц, оказывается в существенной мере скомпенсированной быстрым темпом ускорения, кардинально уменьшающим угловой разброс пучка на малом пролетном расстоянии.

### **Методика расчета**

Моделирование поперечного и продольного движений частиц в линейном канале, а также выбор оптимальной структуры канала основывались на следующих расчетах:

1. Двухмерный расчет поля и моделирование поперечного движения частиц в вертикальной плоскости симметрии резонатора.
2. Моделирование продольного движения частиц в ускоряющей структуре с четырьмя ускоряющими промежутками (пролетными трубками группирователя и резонатора) для осевого пучка с учетом разброса частиц по импульсам.
3. Моделирование поперечного движения частиц с учетом пространственного заряда для аксиально-симметричного пучка в аксиально-симметричной структуре с фокусирующими электростатическими линзами и ускоряющими промежутками.

Для описания пучка на входе в аксиально-симметричную структуру принималась статистическая модель с усеченным по поверхности  $x^2+y^2=R^2$  нормальным законом распределения частиц в поперечном фазовом пространстве  $(x, x', y, y')$  и условием аксиальной симметрии.

### **Характеристики продольного движения**

Для резонатора с одной пролетной трубкой и двумя ускоряющими зазорами равновесная фаза ускоряющего напряжения и область продольного захвата частиц в режим ускорения могут быть определены достаточно условно, так как за два прохождения ускоряющего зазора частицы только начинают синхротронное движение, и сепаратриса еще не успевает сформироваться. В результате, продольный аксептанс ускорителя оказывается достаточно большим для ионов в широком диапазоне отношений заряда к массе.

На рис.2 показаны зависимости, характеризующие ускорение в И-3 не сгруппированного предварительно пучка от ускоряющего напряжения для ионов с разным отношением заряда к массе. Видно, что все рассматриваемые ионы достаточно эффективно ускоряются, при этом разброс частиц по энергии увеличивается с уменьшением их однозарядной массы. На рис.3 отображен процесс ускорения пучка ионов с  $z/A=0,5$ , сгруппированного в области фаз ускоряющего напряжения, соответствующей верхнему максимуму энергии, соответствующие параметры выходного пучка в зависимости от амплитуды группирующего напряжения приводятся на рис.4.

### **Поперечная фокусировка**

Поперечный аксептанс всего канала определяется фокусирующими свойствами его начальной части, где велико влияние пространственного заряда, и геометрией ускоряющей структуры, в которой существенное влияние на поперечное движение частиц может оказывать краевое поле первого ускоряющего промежутка, а также провисание поля из-за вертикальной асимметрии резонатора. Результаты расчета зависимости смещений тра-

ектории пучка из-за вертикальной асимметрии резонатора от длины первого ускоряющего промежутка и радиуса электрода показывают, что при радиусе электродов 250 мм и длине ускоряющего промежутка менее 300 мм смещение траектории пучка незначительно и может не приниматься во внимание.

Параметры поперечного движения, связанные с фокусирующими свойствами ускоряющих промежутков, рассматривались для аксиально-симметричной структуры. Величина поперечного акцептанса резонатора зависит в основном от фокусирующих свойств первого ускоряющего промежутка. Оптимизация краевого фокусирующего поля в этом промежутке достигается с помощью сетки, увеличивающей акцептанс канала более чем в пять раз. Оптимальный входной размер пучка, при котором достигается максимальная величина акцептанса, равен  $\pm 9$  мм. Небольшое смещение фокуса вперед по движению пучка от начала ускоряющего зазора незначительно увеличивает акцептанс, при заметном смещении фокуса в любую сторону — акцептанс падает. Прохождение пучка через согласующий канал обеспечивается с помощью трех электростатических линз. Наибольшая пропускная способность согласующего канала с апертурой 80 мм достигается при расходимости пучка на входе в канал порядка  $\pm 20$ – $30$  мрад и поперечном размере, близком к апертуре фокусирующих линз. В этом случае удается транспортировать без потерь пучок с нормализованным эмиттансом до  $12 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  при нулевом токе и не менее  $5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  при токе пучка до 10 мА. Огибающая пучка с учетом сил пространственного заряда показана на рис.1.

### **Заключение**

Полученные в результате моделирования характеристики линейного канала представляются достаточно близкими к оптимальным, хотя и остаются определенные резервы их улучшения. Выходные параметры пучка по продольному движению можно, по-видимому, улучшить за счет увеличения длины первого ускоряющего промежутка, компенсируя тем или иным способом провисание ускоряющего поля. Поперечный акцептанс резонатора можно увеличить, например, с помощью самарий-кобальтовых квадрупольных линз, размещенных внутри пролетной трубки. Характеристики согласующего канала можно улучшить использованием линз с меньшими aberrациями. Возможно потребуется также уточнение структуры согласующего канала под реальные параметры пучка от ионного источника. Таким образом, мы не рассматриваем структуру и характеристики линейного канала ионного инжектора И-3 как окончательные и предполагаем их улучшать на основе дополнительной информации, которая будет получена при наладке и запуске инжектора.

### **Литература**

1. Алексеев Н.Н., Веселов М.А. и др. Физическое обоснование проекта протон-тяжелоионного ускорительного комплекса на базе протонного синхротрона ИТЭФ. - М., Препринт ИТЭФ, 1985, №110.
2. Макаров И.Г. и др. Запуск импульсного линейного ускорителя с энергией 3,5 МэВ - инжектора для однооборотной инжекции электронов в синхротрон. Новосибирск, Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1968.

### Схема линейного канала ионного инжектора И-3

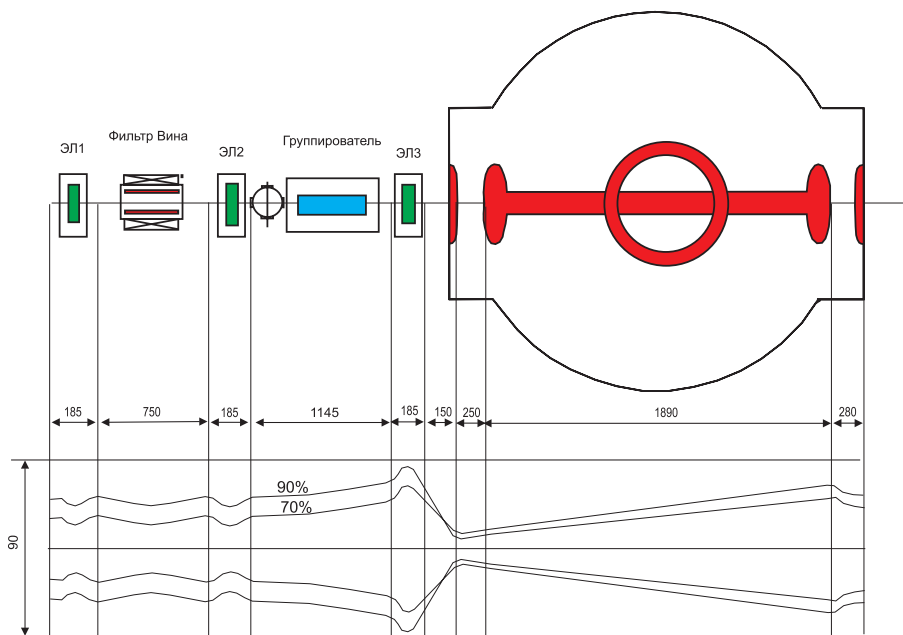


Рис.1. Схема линейного канала ионного инжектора И-3. Огибающая пучка для ионов с  $z/A=1/3$ ,  $E_0=40$  кВ,  $U=2$  МВ,  $\epsilon_n = 9 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ ,  $I=10$  мА.

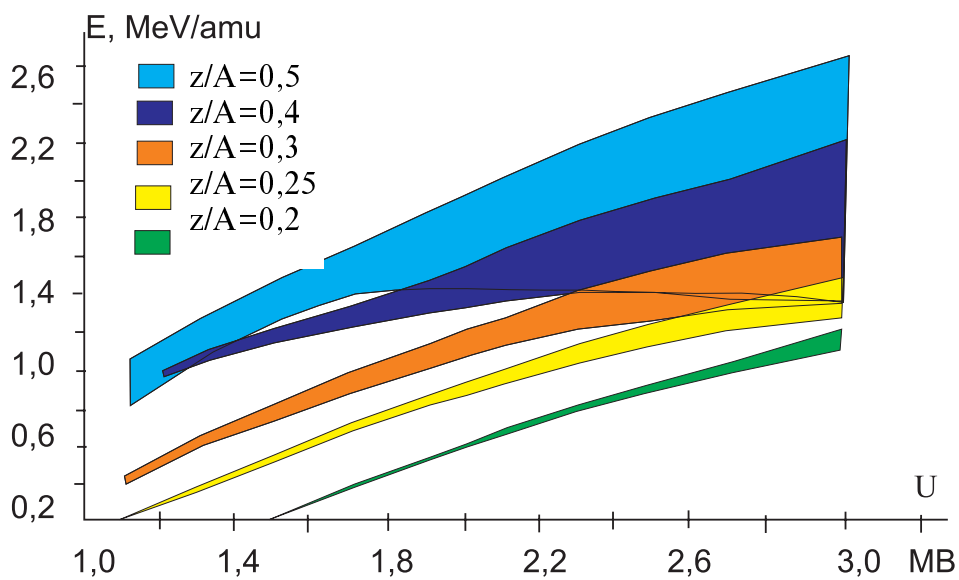


Рис.2 Энергия ускоренных ионов от напряжения на пролетной трубке в И-3.

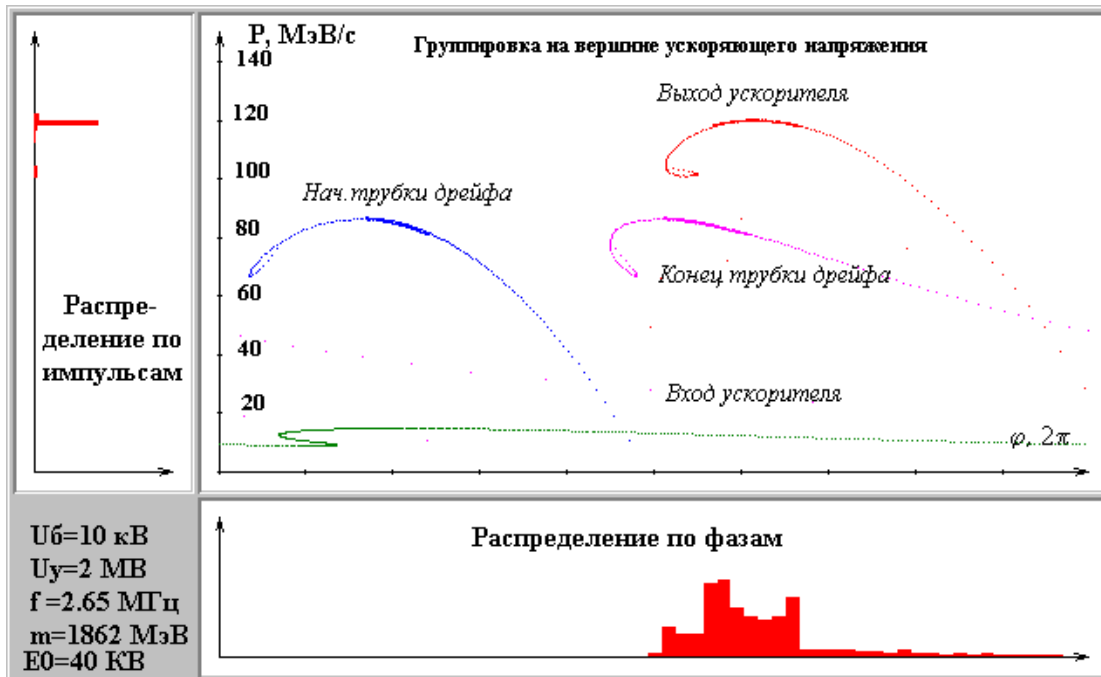


Рис.3. Диаграмма продольного движения ионов с  $z/A=1/2$  при ускорении в И-3.

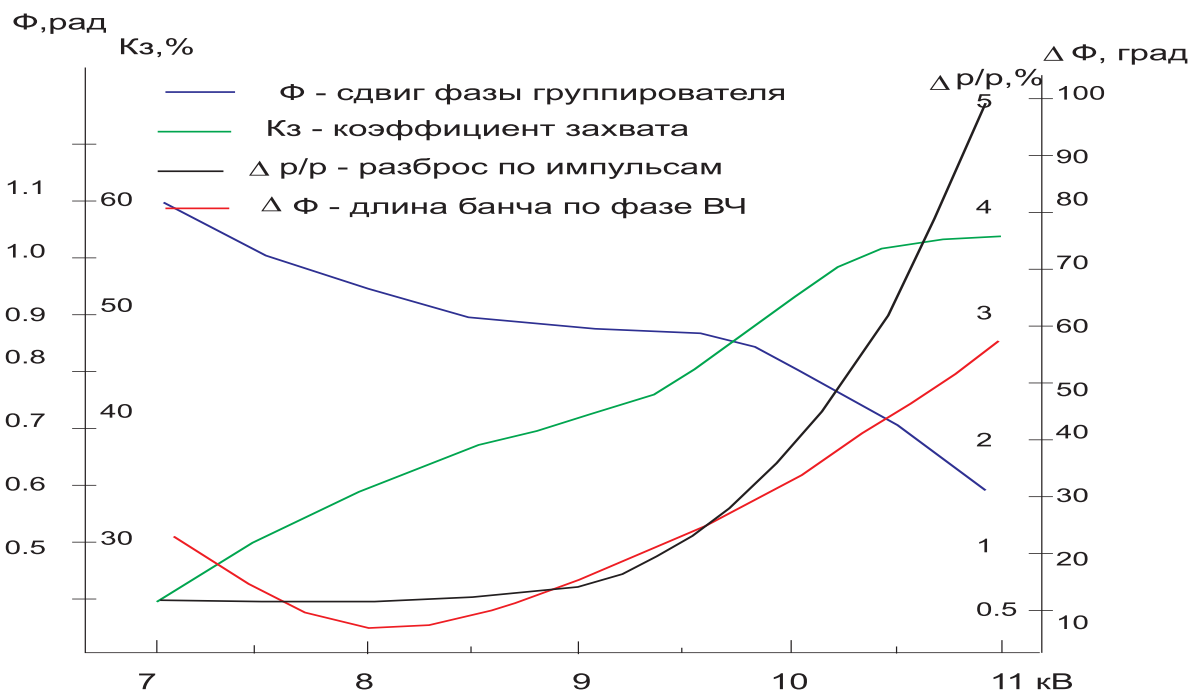


Рис.4. Параметры пучка на выходе И-3 от напряжения группирователя для ионов с  $z/A=1/2$ ,  $U_y=2 \text{ МВ}$ ,  $E_0=40 \text{ кВ}$ ,  $f=2.65 \text{ МГц}$ , группировка на вершине ускоряющего напряжения.