

## ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ СЕКЦИЙ В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

*В.И. Бутенко, О.С. Друй, Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика, В.Б. Юферов, В.О. Ильичева*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
Харьков, Украина*

В проектируемых и строящихся мощных ускорителях ионов начальная часть, как правило, состоит из первой секции с пространственно-однородной квадрупольной ВЧ-фокусировкой (ПОКФ, RFQ) и последующих секций с магнитной квадрупольной фокусировкой (МКФ). В данной работе предложен многосекционный ускоритель на основе модернизированной переменного-фазовой фокусировки (МПФФ), в котором для согласования секций применяются короткие сверхпроводящие (СП) соленоиды с напряженностью магнитного поля в несколько тесла. В работе приводятся результаты компьютерного моделирования ускорения дейтронов в таком многосекционном ускорителе, которые показывают целесообразность предложенного подхода. Преимуществом данной концепции является также практический опыт, наработанный в ННЦ ХФТИ по сооружению ионных ускорителей с МПФФ и изготовлению СП-соленоидов.

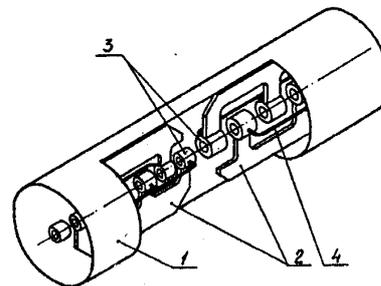
Рассматривается секционный подход к разработке линейного ускорителя дейтронов (протонов) с модернизированной переменного-фазовой фокусировкой (МПФФ) в каждой секции, при этом согласование секций производится с помощью сверхпроводящих (СП) соленоидов. Альтернативным способом согласования секций является применение модулей из квадрупольных магнитных линз. Преимущества квадрупольных линз: поперечное фокусирующее магнитное поле с напряженностью  $H \sim 1$  кЭ, наработанный большой опыт в изготовлении и применении, возможность использования постоянных магнитов. Недостатки квадрупольных линз: фокусировка в одном поперечном направлении сопровождается дефокусировкой в другом, магнитные триплеты занимают много места в продольном направлении (около 1 метра), мощность электропитания пропорциональна  $r^4$  ( $r$  – радиус апертуры), повышенные требования к допускам, сложность настройки, дороговизна постоянных магнитов.

Преимущества СП-соленоидальных линз (в сравнении с квадрупольными): на порядок меньшие допуски, относительная простота изготовления и настройки, хорошая сочетаемость с аксиально-симметричными ускоряющими структурами, в частности, с МПФФ, занимают мало места по длине (порядка 10 см), ожидаемая возможность перехода к СП на жидком азоте. Недостатки СП-линз: магнитное поле с напряженностью  $H$  порядка десятков килоэрсед, требуется установка для производства жидкого гелия; имеются ограничения в связи с чувствительностью сверхпроводимости к радиации.

Ранее сопоставление радиальной фокусировки протонов «теплыми» соленоидальными и квадрупольными линзами, размещенными непосредственно в трубках дрейфа, проводилось И.М. Капчинским [1,2]. Было отмечено, что, несмотря на явные достоинства фокусировки соленоидами, большие динамические усилия, возникающие между пролетными трубками, а также трудности теплоотвода или импульсного питания соленоидов, заставляют отказаться в пользу квадрупольных линз.

Следует отметить, что в настоящее время в мире ведется интенсивная разработка сверхмощных ускорителей протонов для электроядерных энергетических установок, в которых, наряду с квадрупольной фокусировкой, предусмотрено применение СП-резонаторов для ускорения протонов до 1 ГэВ. При этом становится целесообразным применение СП фокусирующих соленоидов вместо «теплых» квадрупольных линз [3]. Для ННЦ ХФТИ применение МПФФ в сочетании с СП-соленоидами является перспективным, поскольку уже имеется опыт в этих вопросах.

В данной работе исследована компьютерная модель ускорителя дейтронов на энергию 23 МэВ при токе 10 мА, предназначенная для генерации нейтронов, в частности, для «подсветки» подкритического ядерного реактора. В качестве модуля ускоряющей структуры выбран Н-резонатор на рабочей частоте  $f=152$  МГц, нагруженный трубками дрейфа, закрепленными на встречных гребенчатых подвесках (Рис.1).



*Рис.1. Ускоряющая структура типа Н.  
1 – корпус резонатора; 2 – подвески трубок дрейфа; 3 – трубки дрейфа; 4 – стабилизирующие петли*

Такая структура формирует ускоряющее поле  $\pi$ -типа вдоль оси резонатора. Длина ускоряющего периода  $L(z)=v(z)/2f$ , где  $v$  – скорость синхронной частицы. Ускоритель состоит из 13 секций. В пределах каждой секции с помощью МПФФ одновременно достигается радиальная фокусировка и продольная фазировка ускоряемых частиц. Первый и последний

периоды каждой секции являются фазирующими. При этом на выходе каждой секции формируются сгустки ускоряемых частиц, сходящиеся в продольном направлении и расходящиеся по радиусу. Для согласования с аксептансом следующей секции на ее входе с помощью соленоидальной СП-линзы формируется сходящийся пучок.

Эффективное согласование секций по продольному движению частиц достигается подбором расстояния между секциями (то есть в области расположения фокусирующего СП-соленоида), при котором для сгустков реализуется оптимальное продольное сжатие. В рассматриваемом проекте ускорителя проведено также сравнение между фокусирующими СП-солеоидами и квадрупольными триплетами. Рассмотрим некоторые существенные результаты компьютерного моделирования.

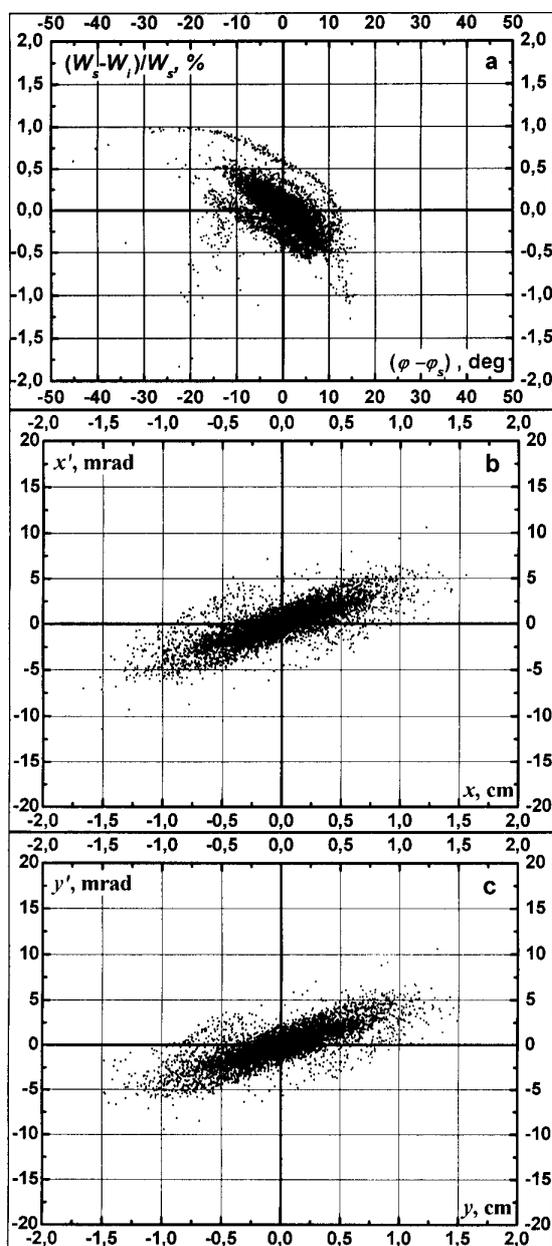


Рис.2. Проекция фазового портрета пучка на выходе из предпоследней, 12-й секции

На Рис.2 представлены проекции фазового портрета пучка на выходе из предпоследней, 12-й секции:  $a$  – на продольную плоскость,  $b$  – на плоскость  $x x'$ ,  $c$  – на плоскость  $y y'$ . Энергия дейтронов 20,5 МэВ, ток 10 мА. Пучок расходящийся, причем его небольшая часть отклоняется от оси на 10 мрад.

На Рис.3 представлены такие же проекции фазового портрета на выходе из расположенной после 12-й секции соленоидальной СП-линзы с параметрами: внутренний радиус 4,0 см, наружный радиус 8,7 см, длина 10 см, средняя плотность тока 15614 А/см<sup>2</sup>, напряженность магнитного поля в центре линзы  $H_{00} = 57,75$  кЭ.

На Рис.4 представлены такие же проекции фазового портрета на выходе из последней секции. Энергия дейтронов 22,8 МэВ, ток 10 мА, среднеквадратичные эмиттансы:  $\text{rms } x = 2,90$  мрад·мм,  $\text{rms } y = 2,87$  мрад·мм,  $\text{rms } r = 4,08$  мрад·мм.

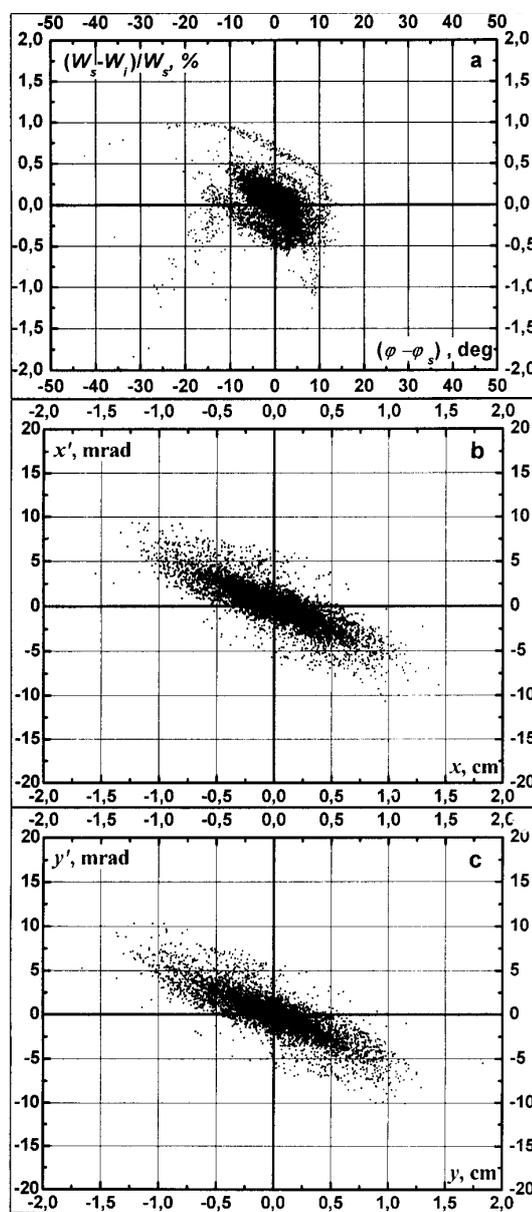


Рис.3. Проекция фазового портрета на выходе из СП-линзы (после 12-й секции)

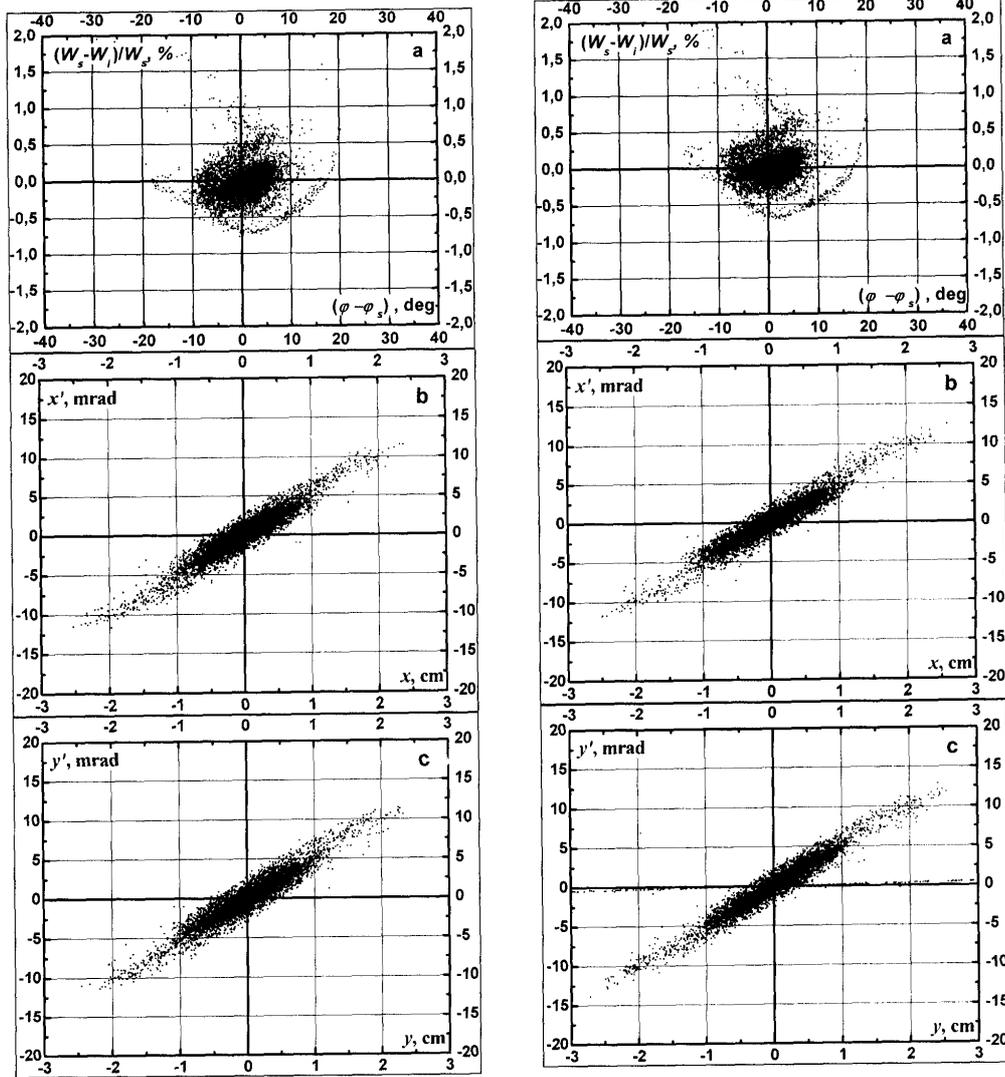


Рис.4. Проекция фазовых портретов на выходе из последней секции. Слева – в случае использования для фокусировки соленоидальных СП-линз, справа – в случае использования квадрупольных линз при кропотливом подборе параметров с целью получения близкого сходства фазовых портретов

На Рис.5 представлены траектории дейтронов с энергией 20,5 МэВ, фокусируемых СП-линзой, установленной между предпоследней и последней секциями. Радиус пучка на входе в линзу  $r_0 = 2,3$  см, угол разлета частиц  $\alpha = 10 r/r_0$  (мрад).

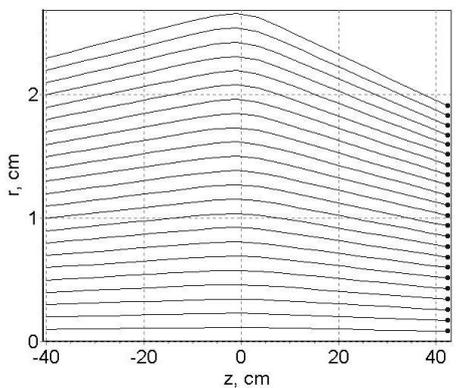


Рис.5. Траектории дейтронов с энергией 20,5 МэВ, фокусируемых СП-линзой, установленной между предпоследней и последней секциями

Напряженность магнитного поля в центре линзы  $H_{00} = 57.75$  кЭ. При этом максимальное отклонение частиц от оси составляет 2,6 см.

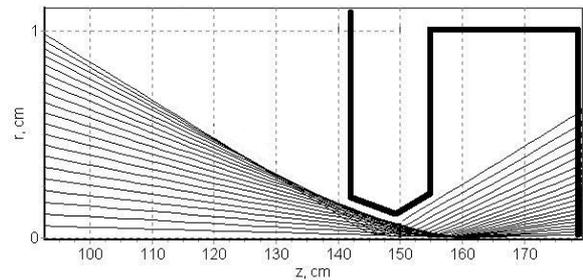


Рис.6. Траектории дейтронов на выходе из ускорителя при фокусировке СП-линзой

На Рис.6 представлены траектории дейтронов на выходе из ускорителя (энергия 22,8 МэВ, ток 10 мА) при фокусировке СП-линзой с параметрами как на Рис.3, но при  $H_{00} = 61,66$  кЭ. Так же, как и в случае Рис.5, пространственный заряд пучка не учитывается, ввиду его малого первеанса. Радиус пучка на выходе из ускорителя  $r_0 = 2,3$  см, угол разлета частиц  $\alpha = 10 r/r_0$  (мрад). Линза широкоапертурная, требо-

вания параксиальности на пучок не налагаются. Отметим, что в области своего минимума радиус пучка составляет около 1 мм, что в принципе позволяет разделить, с помощью соответствующей перегородки с апертурой  $\geq 1$  мм, объемы ускорителя и камеры, в которой дейтронный пучок используется, по уровню радиации, а также по вакууму (последнее в случае применения дифференциальной откачки).

## ВЫВОДЫ

В работе проведено компьютерное моделирование ускорения дейтронов в многосекционном ускорителе на основе МПФФ с использованием СП-линз для согласования секций. Результаты показывают целесообразность предложенного подхода. Преимущество применения СП-соленоидов по сравнению с квадрупольными триплетами выразилось в гораздо более быстром нахождении оптимального варианта ускорения (что, по-видимому, ожидается и при экспериментальной настройке ускорительного комплекса). Кроме того, квадрупольный триплет в продольном направлении занимает значительно больше места, чем СП-соленоид. Отмечено также, что в случае квадрупольных заметные потери частиц в результате попадания их на стенки продолжаются вплоть до 6 МэВ, в то время как для СП-соленоидов эта граничная энергия составляет 3,8 МэВ, что, с учетом зависимости сечения реакций от энергии дейтронов, предопределяет существенно меньшую радиационную нагрузку. Следует отметить, что в мощных линейных ускорителях ионов для прикладных целей большое внимание уделяется вопросам,

связанным с наведенной радиацией на стенках и на выходе ускорителя. В этом отношении СП-линзы с радиусом апертуры существенно большим, чем радиус пучка, могут значительно уменьшить потери частиц на стенках. Соответствующая СП-линза на выходе из ускорителя (см., например, Рис.6) позволит направить ускоренный пучок в радиационно экранированную камеру с передней защитной стенкой, размещенной в области кроссовера пучка, с целью существенного ограничения выхода вторичной радиации через отверстие для входа пучка.

Авторами данной работы, с учетом имеющегося практического опыта, выполнены компьютерное моделирование, инженерные расчеты и эскизный проект сверхпроводящих магнитных линз для фокусировки пучков дейтронов с энергией до 23 МэВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Капчинский. *Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях*. М.: «Атомиздат», 1966, с.310.
2. И.М. Капчинский. Сильноточные линейные ускорители ионов // *УФН*. 1980, т.132, вып.4, с.639-661.
3. Г.И. Бацких, Б.П. Мулин, И.В. Чувило и др. Сильноточные линейные ускорители для электродренной энергетики с использованием сверхпроводящих устройств // *XVI Сессия по ускорителям заряженных частиц, Россия, Протвино*, 1998, т.1, с.203-211.

## APPLICATION OF SUPERCONDUCTING SOLENOIDS FOR SECTION MATCHING IN LINEAR ACCELERATORS

*V.I. Butenko, O.S. Druj, B.I. Ivanov, N.G. Shulika, O.N. Shulika, V.B. Yuferov, V.O. Il'icheva*

At present, an initial module of all powerful ion accelerators that are either under construction or on a designing stage, consists of first section with spatially uniform quadruple focusing (RFQ) and several consecutive sections with magnetic quadruple focusing (MQF). This paper deals with a multi-section accelerator based on a modified alternating-phase focusing (MPAF) with section matching provided by short superconducting solenoids (SCS) with magnetic field intensity about several tesla. The practicality of the structure is confirmed by (i) numerical simulation results of deuteron acceleration in the multi-section accelerator and (ii) experience gained at the NSC KIPT in designing and constructing SCSs and ion accelerators based on MPAF.

## ЗАСТОСУВАННЯ НАДПРОВІДНИХ СОЛЕНОЇДІВ ДЛЯ УЗГОДЖЕННЯ СЕКЦІЙ У ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ

*В.І. Бутенко, О.С. Друй, Б.І. Іванов, М.Г. Шуліка, О.М. Шуліка, В.Б. Юферов, В.О. Ільчова*

У потужних прискорювачах іонів, що проектуються й споруджуються, початкова частина, як правило, складається з першої секції із просторово-однорідним квадрупольним ВЧ-фокусуванням (ПОКФ, RFQ) і наступних секцій з магнітним квадрупольним фокусуванням (МКФ). У даній роботі запропонований багатосекційний прискорювач на основі модернізованого змінно-фазового фокусування (МЗФФ), у якому для узгодження секцій застосовуються короткі надпровідні (НП) соленоїди з напруженістю магнітного поля у кілька тесла. У роботі приводяться результати комп'ютерного моделювання прискорення дейтронів у такому багатосекційному прискорювачі, які показують доцільність запропонованого підходу. Перевагою даної концепції є також практичний досвід, напрацьований у ННЦ ХФТІ по спорудженню іонних прискорювачів із МЗФФ і виготовленню НП-соленоїдів.