

УДК 621.384.6.01

## КОМБИНИРОВАННАЯ ФОКУСИРОВКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ИОНОВ

С.С. Тишкин

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
ул. Академическая, 1, Харьков 61108, Украина  
e-mail: tishkin@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 31 марта 2008 г.

Рассмотрен трехмерный вариант переменного-фазовой фокусировки в линейных ускорителях ионов – комбинированная высокочастотная фокусировка (КВЧФ). КВЧФ представляет собой модифицированную переменного-фазовую фокусировку (МПФФ) с включением в фокусирующий период высокочастотных квадрупольных. Предложен метод расчета ускорителей с фокусировкой высокочастотным полем, основанный на анализе «локальной устойчивости» неравновесных частиц. Представлена интегрированная среда разработки APFRFQ, позволяющая производить все этапы расчета тракта линейного ускорителя в интерактивном режиме. Приведен сравнительный анализ двух способов фокусировки МПФФ и КВЧФ на примере предобдирочной секции линейного ускорителя многозарядных ионов. Рассчитан ускоряюще-фокусирующий тракт мощного протонного ускорителя промежуточного диапазона энергий, построенный на принципе КВЧФ. Рассмотрена возможность применения КВЧФ для ускорения тяжелых ионов с отношением массового числа к зарядовому ( $A/Q$ ) = 65.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** линейный ускоритель ионов, ток пучка, эмиттанс пучка, переменного-фазовая фокусировка, высокочастотная квадрупольная фокусировка, электроядерные технологии

Одной из серьезных проблем, возникающих при создании мощных линейных ускорителей ионов, является разработка менее сложной фокусировки, чем фокусировка магнитными квадрупольными линзами. Альтернативой использованию внешних фокусирующих устройств является применение самого ускоряющего ВЧ-поля для обеспечения устойчивого движения пучка заряженных частиц. Впервые на такую возможность указали В.В. Владимирский [1], М.Л. Гуд [2], и Я.Б. Файнберг [3].

Практическое решение данной задачи в области низких энергий было получено в 1969г. В.В. Владимирским, В.А. Тепляковым и И.М. Капчинским [4]. Предложенный ими вариант фокусировки ВЧ-полем - пространственно-однородная квадрупольная фокусировка (ПОКФ), применяется во всех современных линейных ускорителях ионов в качестве начальной части (НЧУ).

Иное положение дел с применением ВЧ-фокусировки сложилось в промежуточном диапазоне энергий от 3 до 100 МэВ. Несмотря на конструктивную простоту, хорошую совместимость со сверхпроводящими структурами, серьезная разработка данного типа фокусировки ведется лишь несколькими научными центрами: ИФВЭ на базе двойного зазора [5,6] и ННЦ ХФТИ на базе модифицированной переменного-фазовой фокусировки (МПФФ) [7-9]. Единственным действующим линейным ускорителем, работающим без применения специальных электромагнитных устройств для фокусировки частиц, является протонный инжектор на 30 МэВ. Этот ускоритель, получивший название «УРАЛ-30», был введен в строй в ИФВЭ в 1981г. Такое осторожное отношение к идее использования ВЧ-фокусировки в среднем диапазоне, с нашей точки зрения, вызвано недостаточным исследованием ее потенциальных возможностей.

Целью данной работы является исследование возможностей ВЧ-фокусировки в наиболее общем виде, включая ВЧ-квадрупольную, МПФФ и их комбинацию на основе детального анализа динамики пучка с учетом кулоновских сил и реальной геометрии ускоряющего канала.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В наиболее общем виде задача построения ускоряюще-фокусирующего тракта линейного ускорителя с ВЧ-фокусировкой должна быть трехмерной и включать в себя все известные механизмы создания радиально-фазовой устойчивости пучка. В настоящее время используются два метода обеспечения радиальной устойчивости частиц – это ВЧ-квадрупольная и МПФФ фокусировки. Исторически сложилось так, что эти два направления развивались параллельно, не пересекаясь друг с другом. И хотя их совместное использование является физически непротиворечивым, вопрос об использовании комбинированной ВЧ-фокусировки (КВЧФ) долгое время не рассматривался.

Впервые такой вариант фокусировки был предложен в работе [10] для ускорителя протонов в диапазоне энергий 3-40 МэВ. В данной работе использовалось приближение квадратной волны [11] и не содержалось методики расчета параметров ускоряюще-фокусирующего тракта линейного ускорителя с учетом реальной геометрии канала, электрической прочности зазоров и расталкивающих кулоновских сил сгустка заряженных частиц. Без детального учета всех этих факторов невозможно говорить о конкурентоспособности предлагаемого вида фокусировки в сравнении с другими типами. Именно целью данной работы является исследование воз-

возможностей ВЧ-фокусировки в наиболее общем виде, включая ВЧ-квадрупольную, МПФФ и их комбинацию на основе детального анализа динамики пучка с учетом кулоновских сил и реальной геометрии ускоряющего канала.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕГО ТРАКТА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ С ФОКУСИРОВКОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА РАЗРАБОТКИ APFRFQ

Разобьем весь ускоряюще-фокусирующий канал ускорителя на отдельные периоды фокусировки. Структура каждого такого периода в зависимости от энергии ускоряемых ионов, с учетом продольной и радиальной устойчивости движения частиц определяется с помощью разработанной автором программы APFRFQ0. Обычно для определения устойчивости радиального движения частиц в ускорителях с магнитными квадрупольными линзами достаточно использовать диаграмму Глюкстерна-Смита [12], которая позволяет определить набег фазы радиальных колебаний для частиц близких к равновесной. В ускорителях с фокусировкой высокочастотным полем фокусирующие-дефокусирующие силы являются функциями фазы пролета неравновесными частицами фокусирующего периода, которая в свою очередь связана с существенно нелинейными продольными колебаниями самих частиц. В этом случае использование диаграммы устойчивости не позволяет определить, каков допустимый размах фазовых колебаний при сохранении радиальной устойчивости.

В отличие от диаграммы Глюкстерна-Смита в данной программе используется метод, который позволяет определить набег фазы радиальных колебаний не только для синхронной частицы одного фокусирующего периода, но и для всех неравновесных частиц с учетом их фазового движения. Кроме того, имеется возможность провести подобный анализ для любой группы фокусирующих периодов, включая всю ускоряющую структуру в целом, снимая требования к строгой периодичности ускоряюще-фокусирующего канала, присутствующие при построении диаграммы Глюкстерна-Смита. Последнее обстоятельство важно с практической точки зрения, так как всегда ускоряюще-фокусирующий канал состоит из фокусирующих периодов с различными фокусирующими свойствами и не может рассматриваться как строго периодическая структура.

Суть разработанного метода заключается в следующем. Пусть пучок с ненулевым зарядом проходит через фокусирующий период. Требуется определить устойчивость радиального движения неравновесных частиц в полях, созданных реальной конфигурацией трубок дрейфа, объемным зарядом пучка, с учетом связи радиального и поперечного движения. Значение координаты и скорости радиального движения для каждой такой частицы на входе и на выходе фокусирующего периода связаны между собой матрицей фокусирующего периода [11]:

$$\begin{vmatrix} r \\ V_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_0 \\ V_{r_0} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Условием устойчивости является

$$\cos \mu = \left| \frac{T_{11} + T_{22}}{2} \right| < 1, \quad (2)$$

где  $\mu$  - набег фазы Флоке на одном фокусирующем периоде.

Элементы матрицы  $\|T\|$  в общем случае зависят от геометрических размеров структуры электрического поля в зазорах, скорости ионов, объемного заряда сгустка и начальных условий влета частицы в фокусирующий период. Значит, для каждой частицы пучка существует своя «локальная» матрица фокусирующего периода, коэффициенты которой полностью определяют характер движения этой частицы. Задача непосредственного определения коэффициентов «локальных» матриц фокусирующего периода в реальном случае не является тривиальной. Однако их можно определить, используя тот факт, что матрица фокусирующего периода определена, если известны два линейно независимых решения для фокусирующего периода. Для нахождения коэффициентов «локальных» матриц фокусирующего периода используем следующий прием. Синхронно с вхождением сгустка в фокусирующий период через малые промежутки времени (в данной реализации в фазовых координатах через каждый градус) будем инжектировать в начало фокусирующего периода по две «пилотные» частицы в приосевой области с начальными условиями:

$$\begin{aligned} r_0 &= 0; & V_{r_0} &\neq 0; \\ r_0 &\neq 0; & V_{r_0} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Затем интегрируем уравнения движения численными методами на периоде фокусировки в суммарном поле создаваемом объемным зарядом сгустка и трубками дрейфа, при этом автоматически учитывается связь про-

дольного и поперечного движения. Получив значение  $r$  и  $V_r$  на выходе фокусирующего периода, находим для неравновесных частиц:

$$T_{11} = \frac{r}{r_0}, \quad T_{22} = \frac{V_r}{V_{r_0}}. \quad (4)$$

Анализ движения неравновесных частиц позволяет определить набор синхронных фаз, коэффициентов зазоров, амплитуд ВЧ-поля и квадрупольных градиентов в ускоряющих зазорах, при которых можно свести к минимуму зависимость набег фаз неравновесных частиц от фазы пролета фокусирующего периода, что является одним из условий не возрастания эмиттанса, согласованного с каналом пучка.

Значения коэффициентов матрицы фокусирующего периода  $\|T\|$  для синхронной частицы можно использовать для построения согласованных между собой фокусирующих периодов с различными фокусирующими свойствами. Необходимость такой процедуры возникает в ускорителях с ПФФ. Дело в том, что в ПФФ «фокусирующий период», строго говоря, не является периодом, так как не обладает свойствами периодичности из-за падения фокусирующих свойств осесимметричного зазора с ростом скорости частиц. Поэтому для обеспечения необходимой жесткости фокусировки требуется увеличивать общее число ускоряющих зазоров на последующих фокусирующих периодах тракта ускорителя. Однако, несмотря на различие периодов, очевидно, что в центре фокусирующего участка огибающая центральной части пучка должна иметь максимальное значение. Напомним, что ускоряющий зазор с положительной синхронной фазой является фокусирующим для радиального движения и дефокусирующим (дефазирующим) для продольного, зазор с отрицательной синхронной фазой действует наоборот. Пусть ускоряюще-фокусирующий период начинается и заканчивается в середине фазированного периода. Поскольку огибающая пучка пропорциональна модулю функции Флоке [11], то она должна иметь на границах периода экстремальные значения. Условием экстремальности является:

$$T_{11} = T_{22}. \quad (5)$$

В качестве примера применения предложенного метода рассмотрим ускоряюще-фокусирующий канал начальной части ускорителя протонов с энергией инъекции 150 кэВ с использованием МПФФ. Этот пример интересен тем, что именно в начальной части ускорителя происходит захват пучка в режим ускорения и формирования основных параметров сгустка заряженных частиц, которые сильно влияют на дальнейшую динамику пучка. Задача НЧУ заключается в том, чтобы при максимальном коэффициенте захвата частиц в режим ускорения создать сгусток частиц максимально сжатого по фазам при минимальном росте эмиттанса пучка. Отметим, что для малых энергий ускоряемых частиц происходит быстрое изменение скорости частиц, а, следовательно, и свойств ускоряющих периодов. В данном случае наиболее простым способом получить согласованные между собой периоды фокусировки является повышение электрической напряженности поля в зазоре пропорционально росту скорости частиц. На рис. 1 показан фазовый портрет моноэнергетического пучка после 1-го и 4-го фокусирующих периодов, на рис. 2 представлен общий набег фазы радиальных колебаний неравновесных частиц на первых четырех периодах с учетом их фазовых колебаний. Как следует из представленных графиков, частицы, захваченные в режим ускорения по продольному движению, находятся в области радиальной устойчивости и мало чувствительны к фазе пролета фокусирующих периодов. Данный подход был применен для расчета ускоряюще-фокусирующего тракта предобдирочной секции линейного ускорителя ионов (ЛУМЗИ) ННЦ ХФТИ для ускорения ионов  $\text{He}_4^+$  [13]. Детальные характеристики этой секции мы рассмотрим ниже, здесь же отметим, что в настоящее время структура изготовлена и находится в стадии настройки.

Программа APFRFQ0 является составной частью интегрированной среды разработки сильноточных линейных ускорителей ионов с фокусировкой ВЧ-полем APFRFQ, которая включает три основных уровня.

На первом этапе используются ускоряюще-фокусирующие поля в виде «квадратной волны», что позволяет абстрагироваться от конкретности полей в реальных зазорах и довольно быстро анализировать разные варианты ускоряюще-фокусирующих периодов.

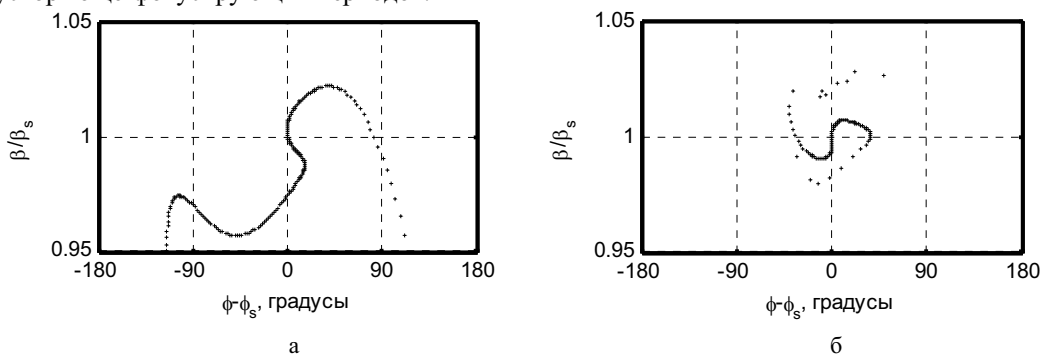


Рис. 1. Фазовый портрет моноэнергетического пучка в ускорителе с МПФФ:  
а) - после первого фокусирующего периода;  
б) - после четвертого фокусирующего периода.

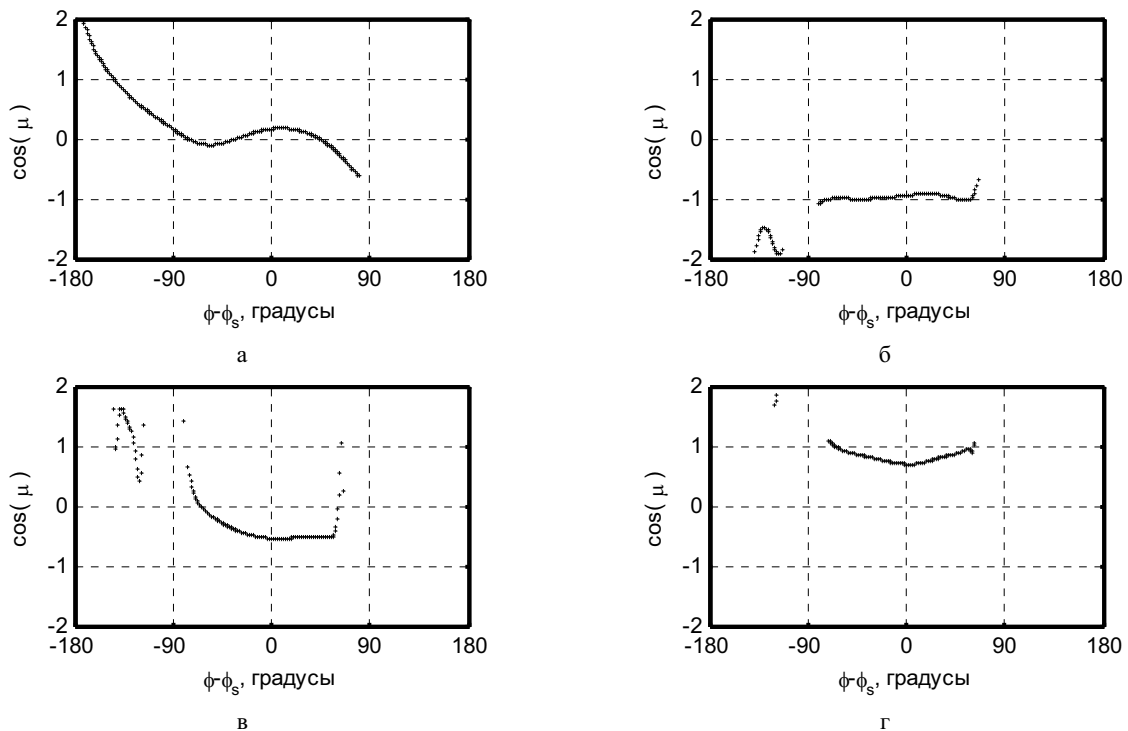


Рис. 2. Набег фазы радиальных колебаний неравновесных частиц с учетом их фазового движения в зависимости от фазы влета в ускоряющую структуру: а) - первый фокусирующий период; б) - второй фокусирующий период; в) - третий фокусирующий период; г) - четвертый фокусирующий период.

На следующем шаге полю «квадратной» волны требуется сопоставить эквивалентную реальную геометрию ускоряющих зазоров. Для расчета полей в реальных структурах используется метод вычисления полей, основанный на одном из вариантов метода интегральных уравнений – методе вспомогательных зарядов (МВЗ). Согласно этому методу потенциал квазиэлектростатического поля представлен в виде суперпозиции полей точечных зарядов, расположенных вне рассматриваемой области. Величины  $N$  зарядов находятся из граничных условий в  $N$  точках поверхности электродов. Задание величины зарядов внутри электродов эквивалентно использованию определенной плотности заряда на поверхности электродов. Этот метод для решения трехмерных квазиэлектростатических задач со сложной формой электродов был реализован автором в программе RFQFLD [14]. Программа позволяет рассчитывать поля в структурах с ПОКФ с полукруглыми электродами, моделированными по синусоидальному или трапецеидальному закону для периодических и непериодических структур, а также для участка поперечного согласования – «раструба». Методические расчеты, проведенные с помощью программы RFQFLD, показали, что МВЗ по сравнению с сеточными методами обладает следующими преимуществами.

1. В случае присутствия открытых границ не требуется их искусственного замыкания. В методе МВЗ открытые граничные условия выполняются автоматически.
2. Решение ищется только в той области, где это необходимо. В частности, при расчете динамики пучка необходимо знать распределение электрического поля в области взаимодействия его с пучком заряженных частиц, т.е. только в приосевой области.
3. Высокая точность решения, в том числе и на поверхности электродов.
4. Простота программной реализации.

В данной реализации программа RFQFLD позволяет сделать расчет квазиэлектростатических полей для осесимметричных ускоряющих зазоров и для зазоров с квадрупольной симметрией с учетом их реальной геометрии и привести их в соответствие с параметрами «квадратной волны». На рис. 3 представлено распределение потенциала поля в сечении квадрупольного зазора, совпадающего с одной из плоскостей квадрупольной симметрии. Черные точки – вспомогательные заряды, белые кружки – точки наблюдения, расположенные на поверхности электродов.

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=L} = 0; \quad \varphi|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad \varphi_1 = -1, \quad \varphi_2 = 1, \quad (6)$$

где  $L$  – длина ускоряющей ячейки,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциал левой и правой трубки дрейфа.

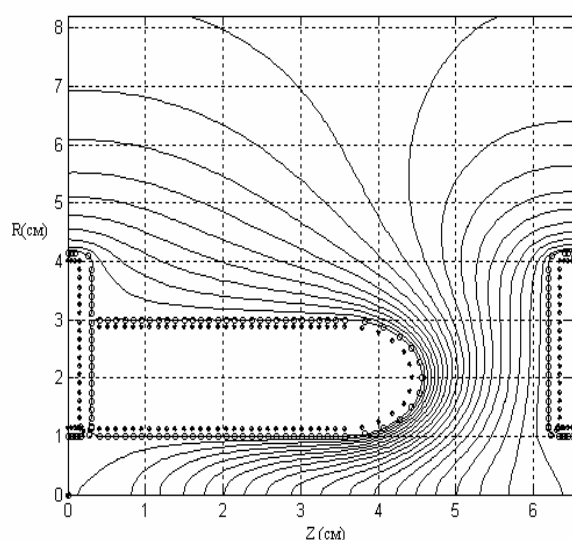


Рис. 3. Расчет трехмерных квазиэлектростатических полей в ускоряющих зазорах методом вспомогательных зарядов

### ВАРИАНТЫ УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩИХ КАНАЛОВ С КОМБИНИРОВАННОЙ ВЧ-ФОКУСИРОВКОЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ Сравнительный анализ характеристик двух типов предобдирочной секции ЛУМЗИ

Табл. 1. Параметры двух вариантов предобдирочной секции ЛУМЗИ для ускорения  $\text{He}_4^+$

Параметры	МПФФ	КВЧФ
Рабочая частота	47,2 МГц	47,2 МГц
Энергия инъекции	30 кэВ/н	30 кэВ/н
Выходная энергия	1МэВ/н	1МэВ/н
Длина канала	237,7см	222 см
Число зазоров	32	26
Апертура (радиус)	0,75-1,5 см	0,75-1см
Структура фокусирующего периода	ДФФФД	ОДФОО
Распределение фаз синхронных частиц на фокусирующем периоде	$-90^0, 75^0, 60^0$ $0^0, -60^0$	$-70^0, 10^0, 10^0$ $0^0, 0^0$
Максимальное поле на поверхности электродов	175 кВ/см	175 кВ/см
Максимальный ускоренный ток	14 мА	35 мА
Коэффициент захвата пучка при нулевом токе инъекции	42%	60%
Выходной rms эмиттанс при максимальном токе	0,616	0,289
$\varepsilon_x (rms)$	мм мрад	мм мрад
$\varepsilon_y (rms)$	0,581	0,268
	мм мрад	мм мрад

друг от друга. Это позволяет строить ускоряюще-фокусирующие каналы линейных ускорителей ионов с чисто ВЧ-фокусировкой, которые не уступают классическим ускорителям, использующим внешние фокусирующие устройства. Основной вопрос, возникающий при построении канала с КВЧФ - это возможность обеспечения требуемой жесткости поперечной фокусировки при обеспечении электрической прочности «рогатого» зазора. Данный пример показывает, что принципиальных трудностей здесь не возникает.

Заключительной задачей является анализ влияния эффектов объемного заряда на динамику пучка и, при необходимости, корректировка геометрии структуры с учетом этого фактора. Для этой цели программа APFRFQ имеет встроенную подпрограмму интегрирования уравнений движения, визуализации динамики частиц, расчета выходных характеристик пучка и программу коррекции геометрии структуры. Расчет влияния кулоновских сил производится методом крупных частиц с использованием двух моделей расчета. Для осесимметричных задач используется модели частица – сетка (PM) и частица-частица (PP), для трехмерных задач – модель PP [15]. Кроме этого в данной программе имеется возможность при построении ускоряюще-фокусирующего тракта линейного ускорителя использовать концепцию KONUS (Combined  $0^0$  Synchronous Particle Structure) с заменой магнитных квадрупольных линз на ВЧ-квадруполи.

Эффективность применения комбинированного метода фокусировки ВЧ-полями рассмотрим на следующем конкретном примере. В таблице 1 приведены основные параметры двух видов предобдирочной секции ЛУМЗИ с использованием различных типов ВЧ-фокусировки: модифицированной переменного-фазовой (рис. 4а) и модифицированной переменного-фазовой с включением элементов ВЧ-квадрупольной фокусировки (рис. 4б).

Преимущество такого комбинированного метода заключается в следующем. В МПФФ для создания устойчивости движения сгустка заряженных частиц используется один единственный механизм – осесимметричное ВЧ поле. При этом обеспечить радиальную устойчивость движения сгустка заряженных частиц возможно лишь за счет ослабления продольной устойчивости и наоборот. Такая жесткая связь между устойчивостью продольного и поперечного движения сильно ограничивает величины предельно ускоряемых токов в случае ПФФ. Ликвидировать такую связь можно используя структуру ускоряюще-фокусирующего периода МПФФ с включением дополнительного механизма обеспечения радиальной устойчивости движения пучка заряженных частиц в виде ВЧ-квадрупольного поля [1]. В этом случае устойчивость радиального и поперечного движения сгустка заряженных частиц можно обеспечить независимо

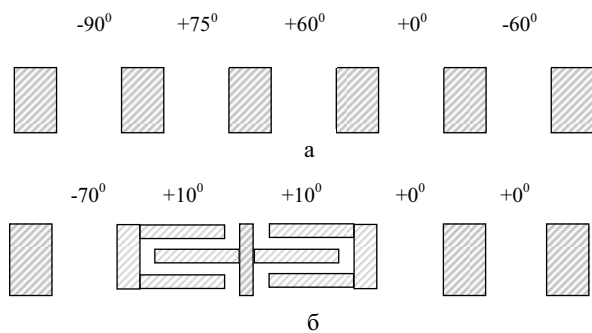


Рис. 4. Ускоряюще-фокусирующий период и распределение фаз синхронных частиц в ускоряющих зазорах: а) - МПФФ; б) - КВЧФ

рис. 6, на котором представлен общий набег фаз радиальных колебаний неравновесных частиц с учетом их фазовых колебаний на всей длине ускоряющей структуры с КВЧФ и нулевым током инжекции. Как видно из графика, коэффициент захвата по продольному движению составляет  $210^0$ . При этом захваченные в режим ускорения по фазовому движению частицы лежат в области радиальной устойчивости. Очевидно, что применение группирователя на входе ускоряющего канала может значительно увеличить это значение. Отметим, что обеспечить такую область захвата при ПФФ без значительного ухудшения качества пучка проблематично.

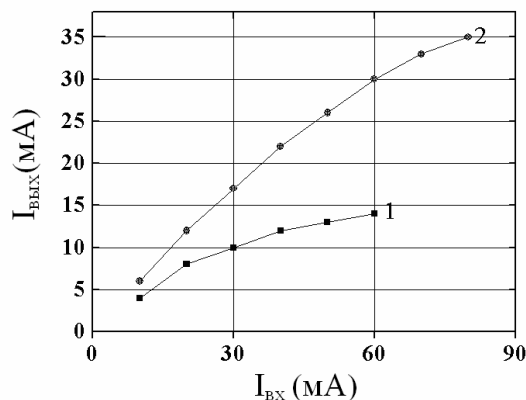


Рис. 5. Зависимость ускоренного тока от тока инжекции: 1 - МПФФ, 2 - КВЧФ

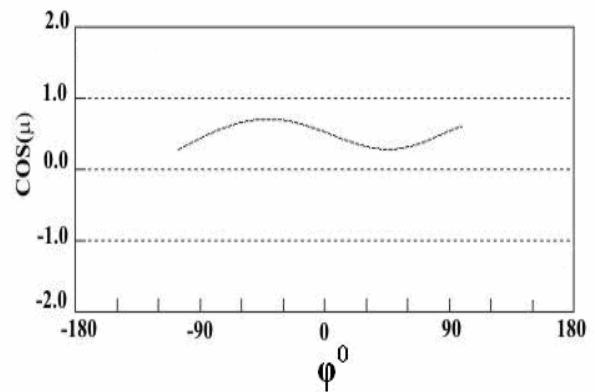


Рис. 6. Набег фазы радиальных колебаний неравновесных частиц на всей длине ускоряющего тракта в зависимости от фазы влета в ускоряющую структуру для КВЧФ

Приведенный пример показывает следующие особенности КВЧФ.

1. Отсутствие жесткой связи между продольной и поперечной устойчивостью движения частиц позволяет сформировать ВЧ-полем эффективную потенциальную яму для захвата пучка в режим ускорения, по глубине, не уступающей потенциальной яме ускорителя с автофазировкой и внешними фокусирующими устройствами.
2. Отсутствует ограничение на радиальную устойчивость неравновесных частиц, совершающих фазовые колебания со значительной амплитудой.
3. Существует возможность построения ускоряюще-фокусирующего тракта линейного ускорителя с минимальным влиянием ВЧ-поля на рост эмиттанса пучка в процессе ускорения.

#### Ускоряюще-фокусирующий тракт протонного ускорителя промежуточного диапазона энергий

Общую структурную схему мощных линейных ускорителей протонов, предназначенных для электродерных технологий, можно представить следующим образом. В качестве НЧУ используется структура RFQ с выходной энергией 3-7 МэВ, промежуточная часть ускорителя (ПЧУ) – это структуры с трубками дрейфа и внешней фокусировкой магнитными квадрупольями с выходной энергией 40-100 МэВ, и основная часть ускорителя (ОЧУ) с выходной энергией 1 ГэВ. Основные требования к таким ускорителям - это надежность и малые потери частиц в процессе ускорения. Рассмотрим с этой точки зрения наиболее спорную в концептуальном плане промежуточную часть ускорителя. Применение электромагнитных или магнитотвердых квадрупольных линз приводят к значительному усложнению и удорожанию ускоряющих структур, что, в конечном счете, не может не сказаться на их надежности. Как было отмечено выше, наиболее простой структурой с технологической точки

зрения является структура с применением ВЧ-фокусировки. В таблице 2 представлены параметры ускорителя с КВЧФ (рис. 7).

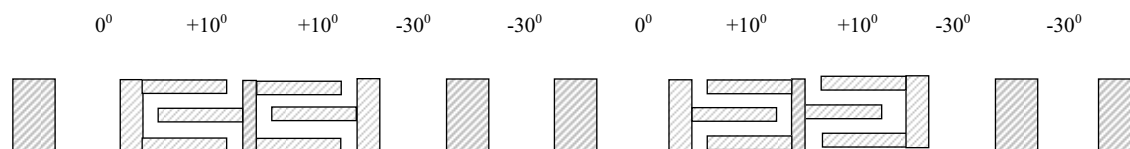


Рис. 7. Ускоряюще-фокусирующий период сильноточного протонного ускорителя с КВЧФ для промежуточных энергий и распределение фаз синхронных частиц в ускоряющих зазорах

Табл. 2. Основные параметры ускоряющего тракта протонного ускорителя с КВЧФ

Рабочая частота	350 МГц
Энергия инжекции	3 МэВ
Выходная энергия	40 МэВ
Длина канала	740 см
Апертура (радиус)	0,75-1 см
Структура фокусирующего периода	ОФФОООДДОО
Распределение фаз синхронных частиц в ускоряющих зазорах на периоде фокусировки	$0^0, +10^0, +10^0, -30^0, -30^0$ $0^0, +10^0, +10^0, -30^0, -30^0$
Число зазоров	94
Максимальная напряженность электрического поля в осесимметричном зазоре	200 кВ/см

На рис. 8, 9, 10 представлены основные входные и выходные параметры пучка для различных значений входных токов: 0 мА, 100 мА, 303 мА. В таблице 3 приведены значения входных и выходных нормализованных эмиттансов пучка, в таблице 4 Twiss параметры  $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$ , согласованного с каналом пучка, рост поперечного эмиттанса  $\Delta\varepsilon_x, \Delta\varepsilon_y$  пучка и коэффициент трансмиссии пучка  $T_p$ . Величины входных токов выбраны из следующих соображений. Расчет динамики пучка при нулевом токе инжекции позволяет определить величину роста эмиттанса чисто за счет ВЧ-поля в отсутствии кулоновских сил. Рост поперечных эмиттансов при нулевом токе составля-

ет  $\Delta\varepsilon_x = 4,1\%$ ,  $\Delta\varepsilon_y = 3,7\%$ , т.е. влияние ВЧ-поля на рост эмиттанса в данном варианте фокусировки является несущественным. Импульсный ток 100 мА - это расчетный ток для данного ускорителя. Рост эмиттансов  $\Delta\varepsilon_x = 18,1\%$ ,  $\Delta\varepsilon_y = 28,2\%$  при коэффициенте трансмиссии пучка  $T_p = 100\%$  являются приемлемыми значениями. Максимальный ток, при котором начинается потери пучка ( $T_p = 99\%$ ), составляет 303 мА.

Табл. 3. Входные и выходные эмиттансы пучка протонного ускорителя

Входные параметры пучка				Выходные параметры пучка			
I мА	$\varepsilon_x$ (rms) мм мрад	$\varepsilon_y$ (rms) мм мрад	$\varepsilon_z$ (rms) град кэВ	I мА	$\varepsilon_x$ (rms) мм мрад	$\varepsilon_y$ (rms) мм мрад	$\varepsilon_z$ (rms) град кэВ
0	0,243	0,241	192,73	0	0,253	0,250	238,94
100				0,287	0,309	245,20	
303				0,474	0,414	315,34	

Табл. 4. Входные Twiss параметры, рост поперечных эмиттансов и коэффициент трансмиссии пучка

Входные параметры пучка				Выходные параметры пучка			
I мА	$\alpha_x$ безр.	$\beta_x$ см/рад	$\alpha_y$ безр.	$\beta_y$ см/рад	$\Delta\varepsilon_x$ %	$\Delta\varepsilon_y$ %	$T_p$ %
0	-0,0107	55,27	0,0072	11,42	4,1	3,7	100
100	-0,0106	98,26	0,0074	20,30	18,1	28,2	100
303	-0,0107	221,1	0,0076	45,66	95,1	71,8	99

Рассмотрим вопрос согласования сильноточного пучка с протяженным ускоряюще-фокусирующим каналом ускорителя. В общей постановке данная задача является довольно сложной, поэтому для её решения прибегают к различного рода упрощениям. В частности, пучок называется согласованным, если начальные условия для пучка на входе ЛУ таковы, что на протяжении фокусирующего канала огибающая пучка постоянна или является периодической функцией. Следуя этому определению, начальные условия для согласованного пучка можно найти, используя один фокусирующий период. Однако такой подход не вполне корректен и может приводить к значительным ошибкам.

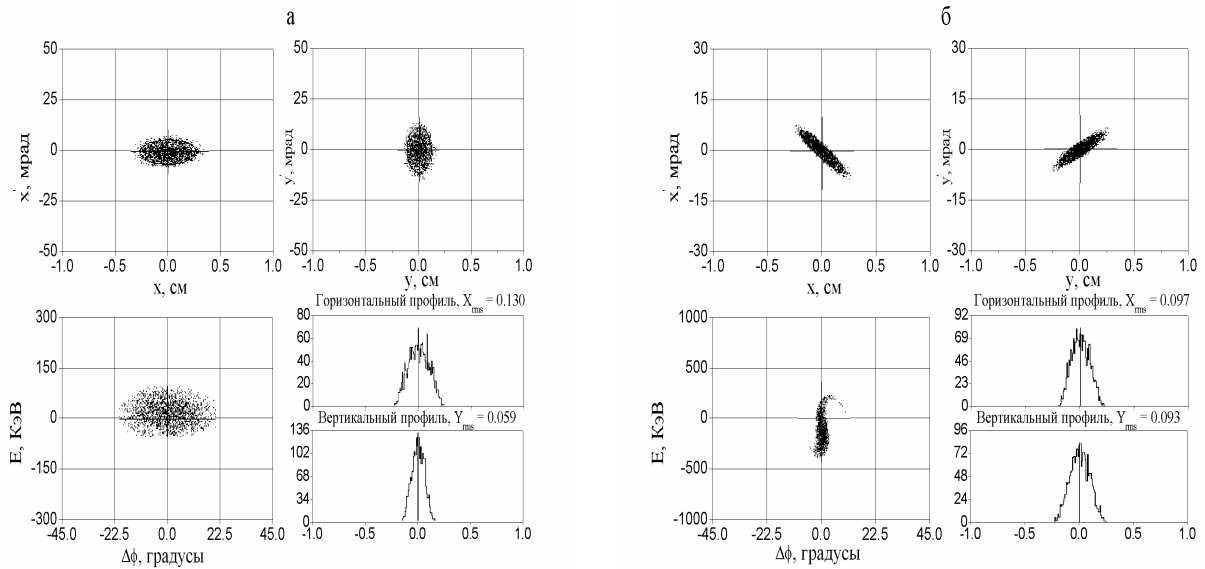


Рис. 8. Параметры пучка при токе инжекции 0 мА: а) – входные параметры; б) – выходные параметры

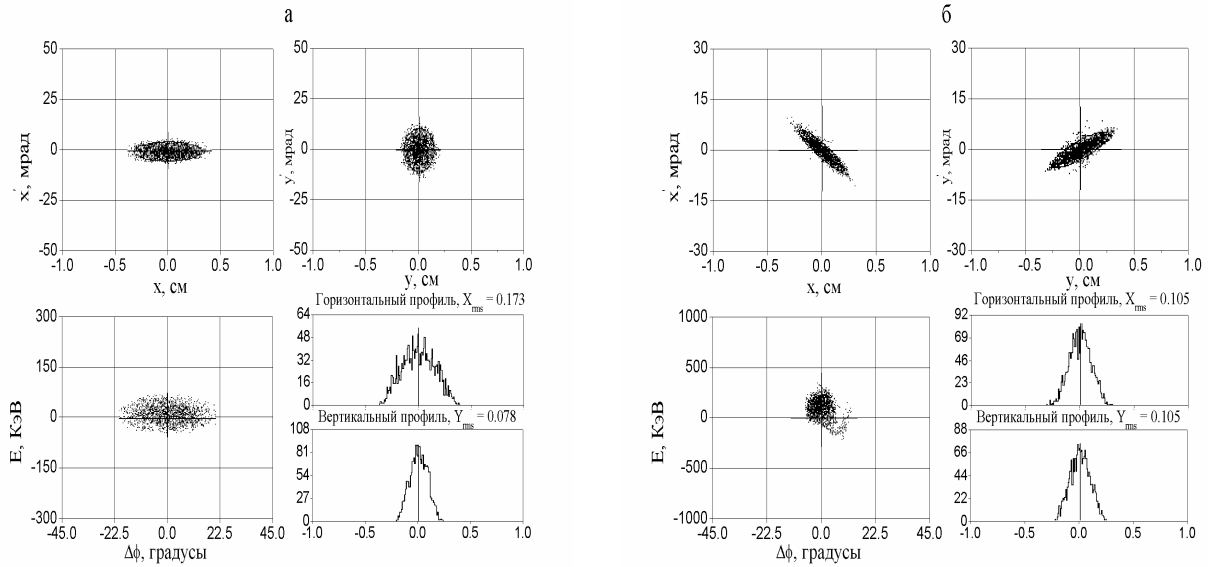


Рис. 9. Параметры пучка при токе инжекции 100 мА: а) – входные параметры; б) – выходные параметры

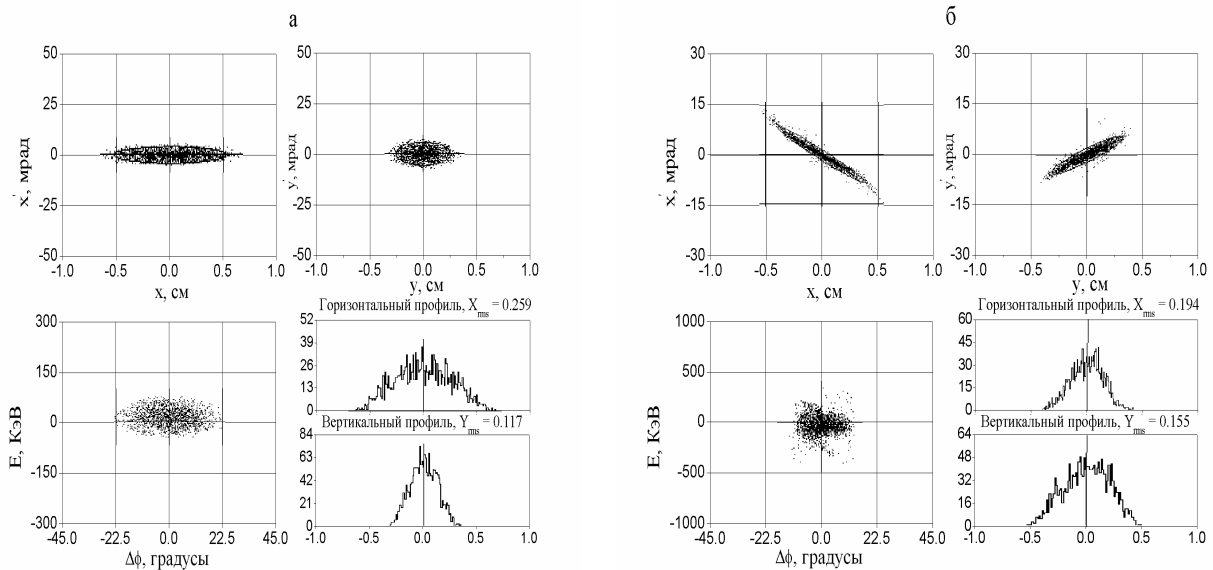


Рис. 10. Параметры пучка при токе инжекции 303 мА: а) – входные параметры; б) – выходные параметры



Во-первых, не учитывается продольное движение неравновесных частиц, во-вторых, предполагается периодичность ускоряющего канала и, в-третьих, для существования периодического решения для огибающей пучка требуется специальная функция распределения частиц в шестимерном фазовом пространстве. Сформулируем задачу согласования сильноточного пучка с протяженным фокусирующим каналом линейного ускорителя в наиболее общем виде. Будем считать, что пучок согласован с каналом, если в процессе ускорения рост его эмиттанса минимальный при максимальном токопрохождении. Такое определение учитывает всю динамику в произвольной ускоряющей структуре с учетом нелинейности высокочастотных и кулоновских полей, причем на функцию распределения частиц в фазовом пространстве не накладывается никаких ограничений. Метод решения подобных задач описан в работе [16]. Для рассматриваемого случая автором разработана программа RFQOPT. Данная программа позволяет определять оптимальные входные поперечные Twiss параметры пучка, при которых рост эмиттанса на выходе ускоряющей структуры минимален при максимальной трансмиссии пучка для различных значений входных токов (табл.4).

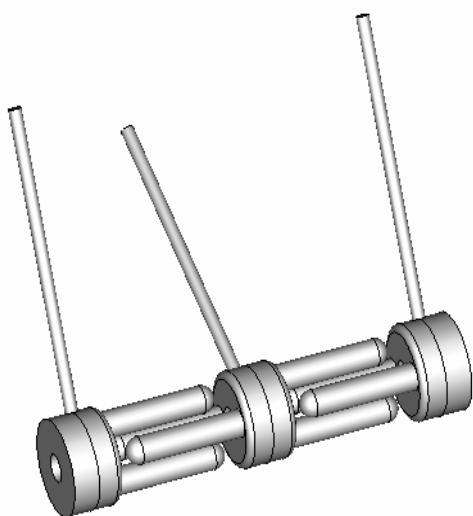


Рис. 11. Реализация сдвоенного ВЧ-квадруполя в IH структуре

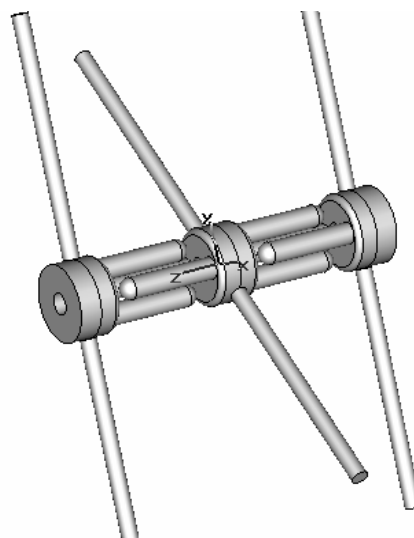


Рис. 12. Реализация сдвоенного ВЧ-квадруполя в SH структуре

Реализовать данный тип фокусировки возможно, используя IH и SH структуры. IH структуры способны эффективно ускорять протонные пучки до энергий  $\leq 30$  МэВ, SH – до энергий 150 МэВ. При этом нужно отметить следующее обстоятельство. Создание квадрупольных компонент поля осуществляется за счет введения в ускоряющий зазор дополнительных электродов («рогов»), что значительно снижает электрическую прочность такого зазора. Поэтому разность потенциалов между электродами в квадрупольном зазоре должна быть значительно меньше, чем в осесимметричном. Для IH-структуры осуществить такую регулировку можно азимутальным вращением штанги, на которой крепится центральная трубка дрейфа квадрупольного участка фокусировки (рис. 11). Для SH-структуры – азимутальным синхронным вращением двух штанг центральной части квадрупольного участка фокусировки (рис. 12).

#### Ускоряюще-фокусирующий тракт для ускорения тяжелых ионов с отношением массового числа к зарядовому ( $A/Q \leq 65$ )

Рассмотрим возможность применения КВЧФ в ускорителях тяжелых ионов. В таблице 5 приведены основные параметры ускоряющего тракта линейного ускорителя, предназначенного для ядерно-физических исследований. В таблице 6 – основные входные и выходные параметры пучка. Входные параметры пучка приблизительно соответствуют выходным значениям начальной части UNILAC [16] (Дармштадт, Германия) для пучка ионов  $U_{238}^{+4}$ . Коэффициент трансмиссии пучка  $T_p = 100\%$ .

Табл. 5. Основные параметры ускоряющего тракта ускорителя тяжелых ионов ( $A/Q=65$ ) с КВЧФ

Рабочая частота	36 МГц	Структура фокусирующего периода	ОФФОООДДО
Энергия инъекции	120 кэВ/н	Распределение фаз синхронных частиц в ускоряющих зазорах на периоде фокусировки	$0^0, +10^0, +10^0, -30^0, -30^0$ $0^0, +10^0, +10^0, -30^0, -30^0$
Выходная энергия	492 кэВ/н		
Апертура канала (радиус)	0,75-1 см	Максимальная напряженность электрического поля на оси ускоряющего зазора	100 кВ
Длина канала	930 см		
Число зазоров	94		

Табл. 6. Входные и выходные эмиттансы пучка ускорителя тяжелых ионов ( $A/Q=65$ )

Входные параметры пучка				Выходные параметры пучка			
I мА	$\epsilon_x$ (rms) мм мрад	$\epsilon_y$ (rms) мм мрад	$\epsilon_z$ (rms) град кэВ	I мА	$\epsilon_x$ (rms) мм мрад	$\epsilon_y$ (rms) мм мрад	$\epsilon_z$ (rms) град кэВ
16,5	0,05	0,05	501,1	16,5	0,053	0,053	523

### ВЫВОДЫ

Предложен новый метод фокусировки ВЧ-полем, представляющий собой комбинацию переменного-фазовой и высокочастотной квадрупольной фокусировок. Представленные результаты расчетов показывают, что использование комбинированной высокочастотной фокусировки позволяют строить ускоряюще-фокусирующие тракты линейных ускорителей для широкого диапазона энергий, различного сорта ускоряемых частиц и рабочей частоты ускоряющей структуры. При этом, обладая исключительной конструктивной простотой, данный тип фокусировки высокочастотным полем не уступает классическим методам фокусировки, которые используют принцип автофазировки и внешние фокусирующие устройства ни по захваченному току, ни по темпу ускорения. Отсутствие внешних фокусирующих устройств позволяет эффективно применять данный тип фокусировки в структурах со сверхпроводимостью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимирский В.В. Вариант жесткой фокусировки в линейном ускорителе // ПТЭ. – 1956, №3. – С. 35-39.
2. Good M.L. Phase-Reversal focusing in Linear Accelerators // Phys. Rev. – 1953. – № 2. – P. 538-541.
3. Файберг Я.Б. Переменно-фазовая фокусировка в линейных ускорителях // ЖТФ. – 1959. – Т. 29, вып. 5. – С. 568-569.
4. Владимирский В.В., Капчинский И.М., Тепляков В.А. Линейный ускоритель ионов // Авт. свидетельство СССР №265312. Бюлл. ОИПТЗ. – 1970. – № 10. – С. 75.
5. Тепляков В.А. Фокусировка ускоряющим полем // ПТЭ. – 1964. – № 6. – С. 56
6. Тепляков В.А. Использование высокочастотной квадрупольной фокусировки в линейных ускорителях ионов // Труды 2 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – М.: Наука, 1972. – Т. 2. – С. 7-11.
7. Папкович В.Г., Хижняк Н.А., Шулика Н.Г. Переменно-фазовая фокусировка в линейном ускорителе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физ. эксперимента. – 1978. – Вып. 2 (2). – С. 51-56.
8. Beley A.S., Demchenko P.O., Gusev Ye.V., Shulika M.G. An alternating phase focusing channel for low energy proton therapy // Proceedings of the Seventh European Particle Conference, Vienna, Austria. – 2000. – P. 1477-1479.
9. Demchenko P.O., Gusev Ye.V., Shulika M.G. A channel of high current deuteron linac with low radiation loss // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (41). – 2003. – №2. – P. 138-143.
10. Бомко В.А., Птухина З.Е., Тишкин С.С., Шулика Н.Г. Вариант фокусировки ускоряющим ВЧ-полем в линейных ускорителях ионов // Сборник докладов XVIII-й конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2002, Обнинск. – 2004. – Т. 1. – С. 227-230.
11. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. – М.: Энергоиздат, 1982. – 310с.
12. Smith L., Glukstern R.G. Focusing in linear ion accelerators // Rev. Scient. Instr. – 1955. – Vol. 26. – P. 220-228.
13. Bomko V.O., Kobets A.P., Ptukhina Z.E., Tishkin S.S. Variant of alternating phase with stepped change of the synchronous phase // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (43). – 2004. – №2. – P.153-154.
14. Tishkin S.S. The numerical field calculation in structure with RFQ with the method of the auxiliary charges // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (38). – 2001. – №3. – P. 121-123.
15. Хокни Р., Исвуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 640с.
16. Barth W., Bomko V.O., Dalh I., Groening L., Kobets A.P., Tishkin S.S., Yaramyshev S.G., Zajtsev B.V. Method for minimization of the beam phase volume growth on the post-stripping section of the UNILAC // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (46). – 2007. – №5. – P. 171-174.

### COMBINED FOCUSING BY RF-FIELD FOR ION LINEAR ACCELERATORS

S.S. Tishkin

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology",  
Akademicheskaya St.1, 61108 Kharkov, Ukraine, e-mail: [tishkin@kipt.kharkov.ua](mailto:tishkin@kipt.kharkov.ua)

Combined RFQ-focusing, a spatial 3d version of the alternating-phase focusing method for an ion linear accelerator, is presented. CRFQ is a modified alternating-phase focusing (MAPF) with rf-quadrupoles introduced into a focusing period. It is proposed to use the method based on a "local stability" of non-equilibrium particles to calculate parameters of an accelerator with RFQ. Presented is interactive software APFRFQ that allows step-by-step simulation of linear accelerator sections. The pre-stripping section of the multi-charge ion linear accelerator is used for comparative analysis of both focusing methods, MAPF and CRFQ. Using APFRFQ code, the accelerating-focusing section of the powerful medium energy proton accelerator with CRFQ included is simulated. Also, a possibility of applying the CRFQ-method for heavy ion (mass-to-charge ratio being 65) is considered.

**KEY WORDS:** ion linear accelerator, beam current, beam emittance, alternating-phase focusing, RFQ focusing, electronuclear technologies.