

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ВЧ-ФОКУСИРОВКИ ПУЧКОВ ИОНОВ

*В.А.Бомко, С.А.Вдовин, Б.В.Зайцев, А.Ф.Кобец, Б.И.Рудяк,  
Е.Д.Маринина, Ю.В.Мелешкова, З.Е.Птухина, Н.И.Ермилова, С.С.Тишкин*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
61108, г.Харьков, ул.Академическая, 1, [bomko@kfti.kharkov.ua](mailto:bomko@kfti.kharkov.ua)*

Обсуждаются результаты работ по дальнейшему совершенствованию переменного-фазовой фокусировки ионов в линейных ускорителях. 1. Вариант переменного-фазовой фокусировки с плывущим центром сгустка (ПФФ с ПЦС), предложенный в 1996 году, был широко апробирован в расчетах ускоряющих структур предобдирочной секции линейного ускорителя многозарядных ионов (ЛУМЗИ) для различных характеристик пучка: ПОС-4, ПОС-32, ПОС-46. Достоинство метода заключается в очень высоком темпе ускорения. Недостаток – зависимость радиально-фазовой устойчивости сгустков от тока пучка. 2. Вариант переменного-фазовой фокусировки с шаговым изменением синхронной фазы (ПФФ с ШИФ). Комплексный фокусирующий период формируется из участков радиальной и фазовой фокусировки путем слежения за набегом фаз радиальных и фазовых колебаний. В структуру фокусирующего периода входят ячейки как с большими по абсолютной величине фазами, так и ячейки с  $\phi_0$  близкими к нулю. Апробация на структуре ПОС-4 дала достаточно высокий захват по радиальному и фазовому движению пучка ионов  $A/q=4$  с током 15 мА. 3. Комбинация ПФФ с высокочастотными квадрупольями (ПФФ с ВЧК). Разработан и исследован фокусирующий период ПФФ с включением в его структуру блока ВЧ-квадруполья на переходной ячейке длиной  $3/2 \beta \lambda$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В нынешнем году исполняется 50 лет со дня открытия Я.Б. Файнбергом переменного-фазовой фокусировки пучков в линейных ускорителях ионов (1953г.) [1]. Этот факт явился основополагающим среди последовавших в дальнейшем различных вариантов фокусировки пучков ВЧ-полем: пространственно-однородной фокусировки (ПОКФ), предложенной И.М.Капчинским и В.А.Тепляковым [2], фокусировки ВЧ-квадрупольями (ВЧК), (В.В. Владимирский, И.М. Капчинский, В.А. Тепляков, Г.М. Анисимов) [3,4,5]. Идея переменного-фазовой фокусировки (ПФФ) содержит в себе потенциальную возможность обеспечения радиально-фазовой устойчивости с последующей фокусировкой самим ВЧ-полем. В дальнейшем метод ПФФ совершенствовался различными исследователями, в результате чего было показано, что радиально-фазовая устойчивость может быть увеличена за счет асимметричного переброса синхронной фазы, совмещенной с центром сгустка [6], а также существенно улучшены характеристики пучка в варианте модифицированной переменного-фазовой фокусировки (МПФФ), путем оптимизации количества ячеек на группирующем и фокусирующем участках структуры и глубины переброса синхронной фазы [7].

Тем не менее, осталась нерешенной проблема темпа ускорения и, соответственно, потерь ВЧ-мощности. Чем выше требования к радиально-фазовой устойчивости пучка с учетом объемного заряда, тем большая глубина переброса синхронных фаз, тем ниже темп ускорения и, соответственно, тем большая длина ускорителя для получения заданной энергии частиц. По этой причине нами на протяжении последних лет были проведены исследования вариантов фокусировки ВЧ-полем, которые позволили бы ускорять достаточно сильноточные

пучки ионов с одновременным обеспечением высокого темпа ускорения.

### 2. ПЕРЕМЕННО-ФАЗОВАЯ ФОКУСИРОВКА С ПЛЫВУЩИМ ЦЕНТРОМ СГУСТКА

Этот вариант ПФФ заключается в комбинации периодического переброса центра сгустка из области отрицательных фаз в положительные и, наоборот, с постоянным превышением энергии центра сгустка над энергией синхронной частицы, на которую рассчитываются участки структуры, как в области положительных, так и отрицательных фаз. Идея превышения энергии центра сгустка над энергией синхронной частицы использовалась ранее в расчетах структур с нулевой синхронной фазой [8], где радиальный фокусирующий эффект ВЧ-поля отсутствует. По этой причине требовалась дополнительная фокусировка с помощью магнитных квадрупольных триплетов, вмонтированных в структуру трубок дрейфа. В нашем варианте [9-11] достигается одновременный фокусирующий эффект ВЧ – полем, как по радиальному, так и продольному движению ускоряемых частиц. Баланс между противоречивыми требованиями радиальной и фазовой устойчивости достигается в результате оптимального подбора глубины переброса фаз, количеством ускоряющих периодов на длине фокусирующего и группирующего участков, а также степенью превышения энергии центра сгустка над энергией синхронной частицы. В процессе ускорения такой центр сгустка плывет относительно синхронной фазы.

Высокий темп ускорения, при благоприятной радиально-фазовой устойчивости, достигается за счет того, что при переходе из участка с отрицательными фазами в положительные изначальный переброс в большие фазы, обеспечивающие большую фокусирующую силу, сменяется уплыванием в область

меньших фаз, вплоть до  $\varphi_s = 0$ . Переброс из области фаз, близких к нулевой, в отрицательные совершается в сравнительно небольшом диапазоне. С одной стороны, это избавляет от протяженной вставки длиной  $\beta\lambda$ , а с другой, достаточно высокое группирующее действие достигается плавным уплыванием в область с более высокими по абсолютной величине фазами, которые проходит плывущий центр сгустка, благодаря превышению его энергии над энергией расчетной синхронной частицы.

Совершенствование методики ПФФ с ПЦС проводилось в процессе расчета линейного ускорителя тяжелых ионов с большим отношением массового числа к зарядовому,  $A/q=32$ . Его назначение – новая предобдирочная секция (ПОС - 32) ЛУМЗИ, которая должна заменить существующую секцию, рассчитанную на  $A/q=15$ . Это позволит значительно расширить диапазон масс ускоряемых ионов [12]. В результате оптимального подбора каждой из трех указанных выше степеней свободы получена ускоряющая структура, характеристики которой приведены в таблице.

Энергия ионов на входе, кэВ	14
Энергия ионов на выходе, кэВ	975
Отношение массового числа ионов к зарядовому, $A/q$	32
Рабочая частота, МГц	23,7
Градиент электрического поля в зазорах, МВ/м	9,5
Длина ускоряющей структуры, м	8
Количество трубок дрейфа	58
Апертура трубок дрейфа, мм	16-24
Синхронная фаза группирующего участка, град	- 40
Синхронная фаза фокусирующего участка, град	+ 40
Количество группирующих участков	9
Количество фокусирующих участков	9
Темп ускорения, МэВ/м	3,2
Продольный захват, град	100
Продольный аксептанс, л (кэВ/н) мрад	777
Радиальный аксептанс, мм мрад	491
Нормализованный рад. акс., л мм мрад	0,87

Расчет динамики пучка представляет собой сложный процесс поддержания радиально-фазовой устойчивости сгустков в процессе ускорения. На рис.1 приведен совмещенный график зависимости фазовых и энергетических характеристик динамики частиц вдоль ПОС – 32. По оси абсцисс отложен порядковый номер ячеек, составляющих 12 участков структуры (6 группирующих и 6 фокусирующих). По ординатам слева – фазовые, а справа – энергетические характеристики – общая энергия расчетной частицы ( $W_c$ ) и сдвиг по энергии центра сгустка относительно энергии синхронной частицы ( $W_{bc}-W_c$ ). Как видно из рис.1, начальное ускорение с группирующим действием осуществляется при достаточно большой по абсолютной величине синхронной фазой ( $-70^\circ$ ). На последующих группирующих уча-

стках ее величина составляет  $-40^\circ$ , а на фокусирующих -  $+40^\circ$ . Фаза центра сгустка (рис.1, пунктир) на последующих группирующих участках изменяется незначительно, в среднем превышая синхронную фазу на несколько градусов. В то же время, имеет место значительное уплывание фазы центра сгустка в процессе движения по ячейкам фокусирующих участков. В начале каждого фокусирующего участка центр сгустка попадает в центр ускоряющего зазора в большой положительной фазе, что дает значительный фокусирующий эффект. В дальнейшем центр сгустка плывет в сторону меньших фаз. Средняя величина фазы центра сгустка на фокусирующих участках изменяется от  $44^\circ$  до  $20^\circ$ . Поэтому в такой структуре сохраняется высокий темп ускорения. Степень превышения энергии центра сгустка над энергией расчетной частицы,  $W_{bc}-W_c$ , (рис.1, штрих-пунктир) изменяется от 2 кэВ/н на входе в группирующие участки до 1 кэВ/н на выходе. Для фокусирующих участков эта величина, как видно из рис.1, изменяется в значительно больших пределах.

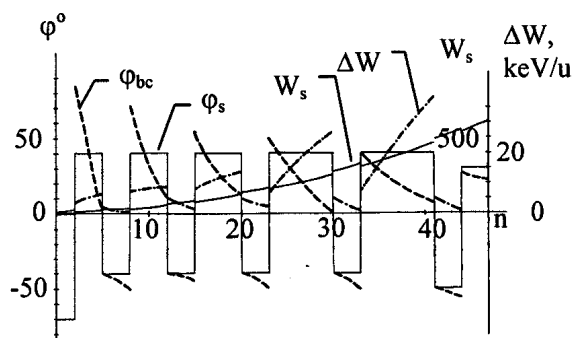


Рис.1. Совмещенный график зависимости фазовых и энергетических характеристик пучка ионов в процессе ускорения на участках структуры ПОС-32

Радиально-фазовые характеристики сгустка в процессе прохождения группирующих и фокусирующих участков структуры наглядно иллюстрируются на следующих графиках. На рис.2 представлена сепаратриса, определяющая захват инжектируемого пучка в процесс устойчивого ускорения.

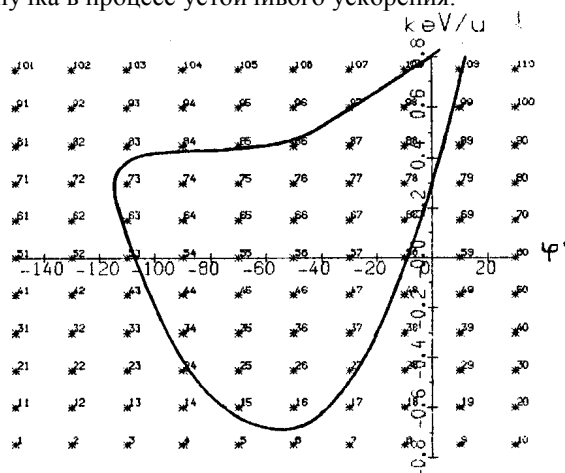


Рис.2. Сепаратриса, определяющая захват инжектируемого пучка в процесс устойчивого ускорения

Все частицы непрерывного пучка, инжектируемого в линейный ускоритель, находящиеся в пределах разброса энергии  $\Delta W / W = \pm 5\%$  и фазовой протяженностью  $100^\circ$ , захватываются в процесс устойчивого радиально-фазового движения до расчетной энергии.

На рис. 3 представлены радиальные траектории частиц для радиусов входа 1, 2, 3 и 4 мм с угловой расходимостью 6, 3, 0, -3, -6 мрад. Траектории стабильного радиального движения примерно соответствуют нормализованному эмиттансу пучка ионов на входе  $0.2\pi$  мм мрад.

Выполнен расчет радиального акцептанса условной частицы, находящейся в центре исходной сепаратрисы. Его геометрическая величина составляет 350 мм мрад, а нормализованный акцептанс -  $0.87\pi$  мм мрад.

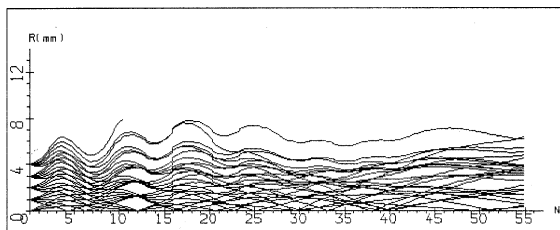


Рис.3. Радиальные траектории частиц, ускоряемых в ПОС-32

### 3. ПЕРЕМЕННО-ФАЗОВАЯ ФОКУСИРОВКА С ШАГОВЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ СИНХРОННОЙ ФАЗЫ

Суть этого варианта ПФФ заключается в том, что структура фокусирующего периода содержит ряд ячеек, в которых синхронная фаза дискретно (по шагам) изменяется от ячеек с отрицательной (группирующей) фазой ( $-\varphi_s$ ), проходя через ячейки с меньшей по абсолютной величине синхронной фазой и  $\varphi_s = 0$ , в область положительных (фокусирующих) фаз и заканчивается переходом в отрицательные фазы. Например, фокусирующий период может состоять из ячеек с синхронной фазой  $-0^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 0^\circ, -60^\circ, 50^\circ$ . Оптимизировались и другие варианты расположения  $\varphi_s$ .

Этот вариант является аналогом ПФФ с ПЦС. В обоих случаях на каждом из участков структуры синхронная фаза не является постоянной, а в каждой ячейке структуры она имеет разное значение, захватывая область с сильным группирующим и фокусирующим действием, а в середине обеспечивает высокий темп ускорения. Отличие заключается в том, что в варианте ПФФ с ШИФ в каждой ячейке синхронная фаза заранее предсказуема. Формирование структуры фокусирующего периода выполнялось из условия оптимального нахождения в области устойчивости, которая определялась в процессе расчета по величине набега фаз радиальных и продольных колебаний.

Метод фокусировки апробировался на расчете ускоряющей структуры и динамики ионов предобдирочной секции ЛУМЗИ для ионов с  $A/q=4$  (ПОС -

4) в диапазоне энергий от 30 кэВ/н до 1 МэВ/н. Результаты математического моделирования динамики частиц по программе PARMELA показали эффективную радиально-фазовую устойчивость ионов в случае без учета и с учетом объемного заряда пучка. В структуре с 32 зазорами на длине 2,5 м проведен пучок ионов с  $A/q=4$  и током 15 мА.

### 4. УСКОРЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩИЙ КАНАЛ С КОМБИНАЦИЕЙ ПЕРЕМЕННО- ФАЗОВОЙ И ВЧ-КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ

Работами коллектива ИФВЭ, возглавляемого В.А.Тепляковым, разработан и внедрен в практику на сильноточном ускорителе протонов (УРАЛ) метод фокусировки ВЧ-квадруполями [5]. Конструктивно он реализован в трубках дрейфа, снабженных цилиндрическими наконечниками (рогами), образующими ВЧ-квадрополь. Этот ускоритель работает более 10 лет в качестве инжектора в ускорительном комплексе высоких энергий протонов. На выходе такого линейного ускорителя получают пучок протонов с током около 100 мА и энергией 30 МэВ. В качестве ускоряющей структуры используется сложная конструкция с невысоким темпом ускорения (длина более 40 м). Проведенный нами анализ показал, что комбинация методов фокусировки ПФФ и ВЧК может дать хороший результат, как по темпу ускорения, так и радиально-фазовой устойчивости сильноточных пучков.

Достоинством способов фокусировки ВЧ-полем является конструктивная простота, а недостатком – зависимость фокусирующей силы от фазы пролета частицами ускоряюще-фокусирующего канала, что приводит, с одной стороны, к сужению области устойчивости частиц, а с другой – к росту эмиттанса пучка в процессе ускорения. При ПФФ радиальная сила, действующая на фокусирующем участке, пропорциональна  $\sin \varphi$ , где  $\varphi$  - фаза пролета центра ускоряющего зазора, отсчитываемая от максимума поля. При ВЧ-квадруполевой фокусировке радиальная сила пропорциональна  $\cos \varphi$ . Таким образом, в первом случае фокусирующая сила максимальна для частиц, пролетающих центр ускоряющего зазора в фазе  $90^\circ$ . По мере уменьшения фазы радиальная сила постепенно спадает и при  $\varphi=0$  равна нулю. Во втором случае (ВЧ-квадрополь) зависимость фокусирующей (знакопеременной) силы от фазы пролетающих частиц противоположна, т. е. максимальная фокусирующая сила действует именно на те частицы, для которых ПФФ малоэффективна и не действует там, где эффективность ПФФ максимальна.

Нетрудно заметить, что, объединив эти два способа фокусировки на одном ускоряюще-фокусирующем периоде, можно добиться сохранения радиальной устойчивости при значительно большем размахе фазовых колебаний захваченных в режим ускорения частиц.

Нами изучались три варианта ускоряюще-фокусирующего канала с комбинацией ПФФ с ВЧК фокусировкой.

Период фокусировки состоит из ячеек группирующих ( $-\varphi_S$ ), радиально-фокусирующего ВЧ-квадруполя и ячеек с высоким темпом ускорения ( $\varphi_S$  близка к нулевой) (рис. 4).

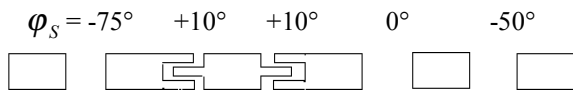


Рис. 4. Ускоряюще-фокусирующий период с комбинацией ПФФ с ВЧК фокусировкой

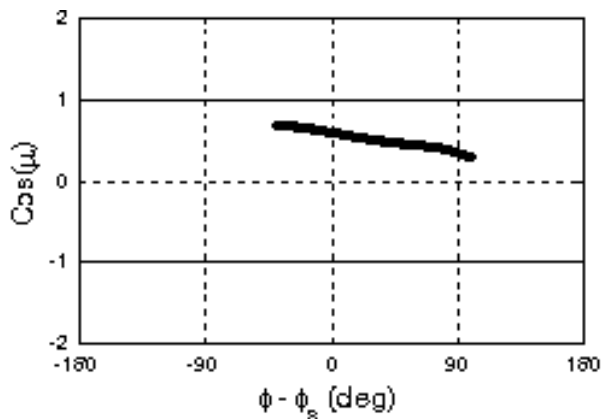


Рис. 5. Косинус набег фазы радиальных колебаний частиц в зависимости от фазы влета в ускоряющефокусирующий период

Такой выбор обеспечивает приемлемую величину фазового угла захвата и высокий темп ускорения. Величина градиента ВЧ-квадруполя выбирается так, чтобы косинус набег фазы радиальных колебаний частиц с учетом их фазового движения полностью находился в области устойчивости. В качестве иллюстрации выполнен расчет ускоряющей структуры линейного ускорителя протонов и динамики частиц в диапазоне энергий 1,8...27,5 МэВ. На рис. 5 представлен косинус набег фазы радиальных колебаний пучка после прохождения 20 фокусирующих периодов. Длина канала составила 15 м, число ячеек – 100. Рассмотренный вариант эффективен при ускорении протонов и тяжелых ионов в длинном многочаечечном резонаторе в диапазоне десятков МэВ.

Особенность второго варианта заключается в том, что в структуру с ПФФ на определенных участках устанавливаются блоки ВЧ-квадруполей, усиливающие фокусирующий эффект, в то время как основную нагрузку по обеспечению радиально-фазовой устойчивости несет вариант ПФФ с высоким темпом ускорения.

Для этих целей разработан фокусирующий блок, содержащий в себе два квадруполя, аналог квадрупольного дублета (FD), обеспечивающий фокусировку сразу в двух плоскостях. Установлено, что наиболее эффективным местом его расположения в структуре ПФФ является точка переброса сгустка из участка с положительными фазами в отрицательные. Размещенный таким образом блок ВЧ-квадруполей обеспечивает дополнительное фокусирующее действие и ускорение пучка. Схема ВЧ-квадрупольного блока (ВЧКБ) приведена на рис. 6.

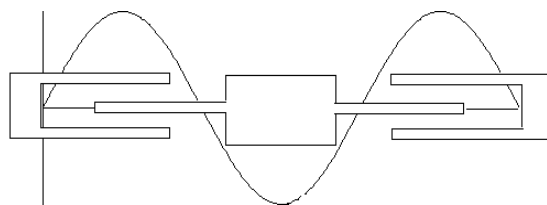


Рис. 6. Схема ВЧ-квадрупольного блока (ВЧКБ) в ускоряющей структуре встречно-штыревого типа

Длина блока составляет около  $3/2 \lambda$ . На рисунке показан косинусоидальный характер распределения электрического поля в момент времени, когда фаза центра сгустка в центре зазора ячейки перед блоком ВЧ-квадруполя составляет  $0^\circ$  и такой сгусток после ВЧ-квадруполя должен быть переброшен в группирующий участок. Как видно из рис. 6, в средней части ВЧКБ имеется полупериод ВЧ-поля с обратным знаком, который необходимо экранировать от замедляющего воздействия поля на сгусток. Поэтому здесь расположена трубка дрейфа с рогами, составляющими два ВЧ-квадруполя со встречными рогами соседних трубок дрейфа. В структуре встречноштыревого типа, возбуждаемой ВЧ-полем со сдвигом фазы в смежных ячейках на  $\pi$ , возможно понизить электрическое поле в зазорах ВЧКБ в два раза по сравнению с полем в зазорах обычных ячеек. Это позволяет, соответственно, уменьшить расстояние между рогами и торцом трубок дрейфа, увеличив, тем самым, длину ВЧ-квадруполей, поддерживая требуемую величину радиальных фокусирующих градиентов.

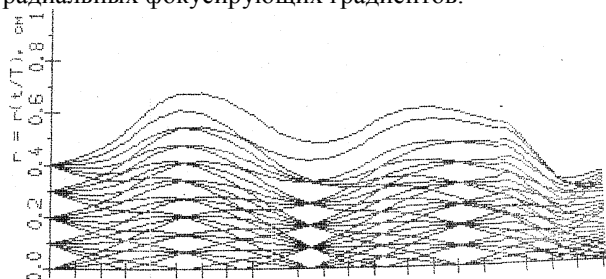


Рис. 7. Траектории радиального движения частиц в структуре начальной части ПОС-46

На рис. 7 представлены траектории радиального движения частиц в структуре начальной части линейного ускорителя тяжелых ионов с  $A/q=46$  и входной энергией 42 кэВ/н. Здесь изображено движение частиц с начальным радиусом до 4 мм и угловым разбросом для каждого радиуса в диапазоне  $\pm 9$  мрад. На четырех участках структуры с отрицательными и положительными синхронными фазами наблюдаются характерные для ПФФ с ПЦС колебательные траектории. В конце четвертого участка установлен блок ВЧКБ, который оказал дополнительно фокусирующее воздействие. Оптимизация параметров такой комбинированной структуры позволила обеспечить достаточно высокую устойчивость сгустков при высоком темпе ускорения.

Третий вариант комбинации ПФФ и ВЧК фокусировкой предназначен для ускоряющего канала промежуточного диапазона энергий протонов от 5 до 100 МэВ. В этом случае он заменит магнитные

квадруполь, располагаемые в промежутках между группами ускоряющих ячеек. Для ускоряющих структур, составленных из двухзольных эллиптических ячеек с боковыми резонаторами связи CCDTL (coupled-cavity drift tube linac) [13], наиболее эффективных в промежуточном диапазоне энергий, переход на сверхпроводящий вариант затруднителен, ввиду сложности структуры ускоряюще-фокусирующего канала. В этом случае сверхпроводящие ускоряющие ячейки будут чередоваться с теплыми фокусирующими системами. Рассматриваемый вариант фокусировки позволит в значительной мере сделать ускоряющие и фокусирующие ячейки идентичными. Блок ВЧКБ применительно к указанным целям схематически представлен на рис.8. Его отличие от представленного на рис.6 заключается в том, что в отличие от ИН – структур, среднее электрическое поле в зазорах имеет одинаковую величину, поэтому в замедляющем полупериоде расположен квадруполь. Такой ВЧКБ блок выполняет ускоряющую и фокусирующую функцию и конструктивно вписывается в структуру ячеек CCDTL, создавая благоприятные условия для использования сверхпроводящих систем в диапазоне промежуточных энергий пучков протонов большой мощности.

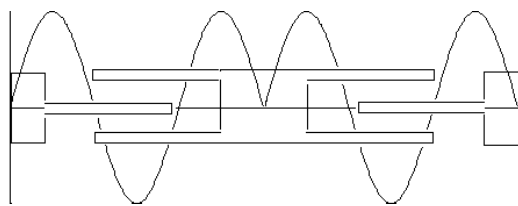


Рис.8. Блок ВЧ-квадруполей для ускорителя протонов среднего диапазона энергий в структуре двухзольных резонаторов CCDTL (coupled-cavity drift tube linac)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ya.B.Fainberg. Alternating phase focusing. Proc of Intern. Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics. Geneva: CERN, 1956, v.1, p.91.
2. И.М.Капчинский, В.А.Тепляков. // ПТЭ. 1970, №2, с.19.
3. В.В.Владимирский. ПТЭ. 1956, №3, с.35.

4. П.М.Анисимов, В.А.Тепляков. // ПТЭ. 1963, №1, с.21.
5. В.А.Тепляков. Использование высокочастотной квадрупольной фокусировки в линейных ускорителях ионов. // Труды 2 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Том 2. М.: Наука, 1972, с.7-11.
6. В.В.Кушин. О повышении эффективности фазово-переменной фокусировки в линейных ускорителях. // Атом. Энергия. 1970, № 29, вып.2, с.123-124.
7. В.Г.Папкович, Н.А.Хижняк, Н.Г.Шулика. Переменно-фазовая фокусировка в линейном ускорителе. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физ. эксперимента. 1978, вып. 2 (2), с.51-56.
8. E.Nolte, G.Geschonke, K.Berdermann et al. The Munich Heavy ion postaccelerator. Nuclear Instrum. and Methods. 1979, 158, p.311-317.
9. В.А.Бомко, Ю.П.Мазалов, Ю.В.Мелешкова. Переменно-фазовая фокусировка с плавущим центром сгустка. // 15 Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино. 1997, т.2, с.50-53.
10. В.А. Бомко, З.Е.Птухина. Динамика частиц в линейном ускорителе ионов на базе переменно-фазовой фокусировки с плавущим центром сгустка. // Доповіди НАН України. №10, 2001, с.83-87.
11. V.A.Bomko, A.P. Kobets, B.V.Zaitzev et all. Particle dynamic in the ion linear accelerantor based on alternation phase focusing with moving center of the bunch. Proceeding of the eight European particle conference. EPAC 2002, Paris, France, p.870-872.
12. V.A.Bomko, Yu.P.Mazalov, Yu.V.Meleshkova, et all. Prestripping section of the MILAC accelerator based on the principle of alternating – phase focusing. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования, (34), с.11-13.
13. N.Holtkamp for the SNS Collaboration. The SNS Linac and storage ring: challenges and progress towards meeting them. Proceeding of EPAC 2002, Paris, France. p.164-168.