

УДК 621.384.64

## РЕГУЛИРОВКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВО ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ КВАДРУПОЛЯМИ

**А.Ф. Дьяченко**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1,  
e-mail: dyachenko@kipt.kharkov.ua*  
Поступила в редакцию 12 февраля 2008 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований по регулировке распределения электрического поля в модели встречно-штыревой ускоряющей структуры с переменнo-фазовой и высокочастотной квадрупольной фокусировкой пучка. Рассмотрены два наиболее простых варианта высокочастотных квадруполь (в виде «рогов») и различные схемы их использования. Регулирование распределения электрического поля осуществляется изменением угла расположения основной либо промежуточных подвесок трубок дрейфа квадруполь в азимутальной плоскости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** линейный ускоритель, встречно-штыревая ускоряющая структура, высокочастотный квадруполь, распределение электрического поля, угол расположения подвесок трубок дрейфа, ячейка, дублет

В линейных ускорителях ионов проблема радиально-фазовой устойчивости сгустков пучка в процессе ускорения решается различными путями. В зависимости от сорта ускоряемых ионов, диапазона их энергий, интенсивности ускоряемых пучков, требований прецизионности их характеристик разработаны и используются различные способы обеспечения радиально-фазовой устойчивости сгустков пучка в процессе ускорения. Среди вариантов фокусирующих систем наиболее часто используется принцип жесткой фокусировки, реализуемый с помощью магнитных квадруполь [1], принцип переменнo-фазовой фокусировки (ПФФ) [2, 3] в различных модификациях [4–7]. Значительные успехи достигнуты в разработке фокусировки пучков ВЧ-полем – система ВЧ-квадруполь (ВЧК, RFQ) [8], используемая в настоящее время в большинстве ускорителей протонов и тяжелых ионов на начальном этапе ускорения и формирования сгустков. Один из вариантов фокусировки ВЧ-полем предложен [9] и внедрен в конструкции действующего ускорителя протонов до энергии 30 МэВ с импульсным током пучка около 100 мА [10, 11]. В этой конструкции применены ВЧ-квадруполь в виде «рогов», установленных на торцевых стенках трубок дрейфа с различным значением потенциалов.

Разработки вариантов переменнo-фазовой фокусировки с плавующим центром сгустка (ПЦС) [7], а также с шаговым изменением синхронной фазы (ШИСФ) [12] позволили в значительной мере улучшить ситуацию, но остается важный недостаток всех вариантов ПФФ – это зависимость фокусирующего действия ВЧ-поля от фазы частиц. Поскольку действие ВЧ-поля является главным механизмом, который обеспечивает поперечную стабильность пучка, то на поперечные колебания сильно влияет продольное движение частиц. Эти особенности способствуют росту поперечного эмиттанса, особенно при низких энергиях. Проведенный анализ показал, что комбинация методов ПФФ с ВЧК может дать хороший результат, как по темпу ускорения, так и относительно радиально-фазовой устойчивости сильноточных пучков ионов [13].

Природа действия ПФФ такова, что радиальная сила, действующая на фокусирующем участке, пропорциональна  $\sin \varphi_s$ , где  $\varphi_s$  – фаза пролета синхронной частицей центра ускоряющего зазора, где максимальное значение поля. При ВЧ-квадрупольной фокусировке радиальная сила пропорциональна  $\cos \varphi_s$ . Таким образом, в первом случае фокусирующая сила максимальна для частиц, которые пролетают центр ускоряющего зазора в фазе  $90^\circ$ . По мере того, как фаза уменьшается, радиальная сила постепенно спадает и при  $\varphi_s = 0$  эта сила равняется нулю. Во втором случае (ВЧ-квадруполь) зависимость фокусирующей (знакопеременной) силы от фазы противоположная – максимальная фокусирующая сила действует на те частицы, для которых ПФФ малоэффективна и бездействует там, где эффективность ПФФ максимальна. Таким образом, если объединить эти два способа фокусировки на одном ускоряюще-фокусирующем периоде, то возможно достичь сохранения радиальной устойчивости даже при значительно большем размахе фазовых колебаний частиц, захваченных в процесс ускорения [14].

Цель работы – изучение возможности регулировки распределения электрического поля во встречно-штыревой ускоряющей структуре с переменнo-фазовой и высокочастотной квадрупольной фокусировкой пучка.

### МЕТОДЫ НАСТРОЙКИ ЯЧЕЕК ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Сама по себе ПФФ делает ускоряющую структуру нерегулярной, т. е. длины трубок дрейфа изменяются скачкообразно, что создает определенные трудности в настройке ячеек такой структуры, а кроме того в ней же имеются ВЧК ячейки, которые и определяют величину пробойного напряжения в зазорах. Ранее этот параметр существенно влиял на темп ускорения в ускоряющих структурах с ВЧК фокусировкой [11]. Применение же

встречно-штыревой ускоряющей структуры и разработанных в ННЦ ХФТИ методов и элементов настройки [15, 16], позволяют эту трудность обойти. Поэтому в расчеты могут быть заложены максимальные значения электрических полей в зазорах трубок дрейфа без «рогов» (за исключением первого и последнего зазоров) и более низкие величины полей в зазорах ячеек, где трубки дрейфа с «рогами» (в каждой ячейке это значение полей рассчитывается индивидуально).

Для глобального воздействия на распределение электрического поля в структуре очень эффективными показали себя концевые резонансные элементы настройки (КРЭН), разработанные в различных конструктивных вариантах [16]. В данном случае следует учитывать наличие в структуре ВЧК, настройка полей в которых требует специфического подхода. Наиболее приемлемым может быть вариант, когда первые и последние три трубки дрейфа из одного ряда располагались на продольном несущем элементе с одной и двумя (на выходном конце) опорными штангами (рисунки 1, 2). Концевые подрезы замыкаются на боковую поверхность резонатора проводящими подвижными поршнями, положение которых определяется при настройке. Этот элемент настройки, ввиду его эффективности воздействия на общее распределение электрического поля в резонаторе, должен сохранить возможность перемещения и в реальной структуре, так как моделирование не позволяет с такой степенью точности произвести настройку и учесть возможные конструктивные отклонения.

Эффективным способом локальной настройки ячеек встречно-штыревой структуры является внедренный в действующих ускоряющих структурах метод меняющегося угла раствора («встречности») противостоящих подвесок трубок дрейфа (относительно традиционного  $180^\circ$ ) [17, 18]. В случае ВЧК регулировка распределения электрического поля может осуществляться изменением угла расположения основной либо промежуточных подвесок трубок дрейфа (рис. 1) в азимутальной плоскости.

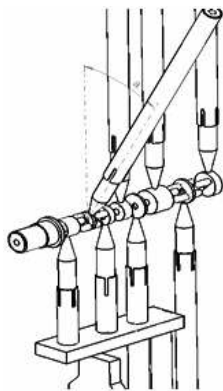


Рис. 1. Концевой резонансный элемент настройки на входном конце структуры

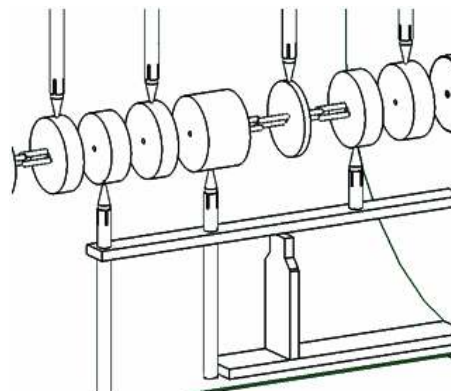


Рис. 2. Концевой резонансный элемент настройки на выходном конце структуры

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР С ПФ + ВЧК ФОКУСИРОВКОЙ НА МОДЕЛИ

Рассматриваемая ускоряющая структура состоит из последовательности ускоряющих и фокусирующих ячеек. Ей свойствен ряд специфических особенностей:

- фокусирующий период начинается и заканчивается ячейками, которые входят в состав ВЧК;
- между ВЧК расположен ряд ускоряющих ячеек с изменяющейся синхронной фазой, часть которых рассчитана на эффективное группирующее действие, а другая – на наиболее высокий темп ускорения;
- ВЧК расположены в области с малыми абсолютными значениями синхронных фаз, где электрическое поле наиболее высокое;
- в ВЧК одновременно имеет место фокусировка и ускорение частиц потенциалом, приложенным между концами «рогов» и торцами трубок дрейфа;
- при постоянной величине апертуры трубок дрейфа и расстояния между «рогами» фокусирующее поле также остается постоянным, несмотря на рост скорости частиц и длин ячеек. Этот фактор приводит к падению темпа ускорения в регулярных многоячеечных структурах, где разность потенциалов между трубками дрейфа постоянна и ограничена напряжением между встречными «рогами» квадруполей;
- фокусирующий период при использовании ВЧК только тогда будет эффективным, когда обеспечена возможность настройки ячеек, содержащих квадруполь, на уровень поля существенно более низкий, чем в соседних ускоряющих ячейках, поскольку допустимая разность потенциалов между встречными «рогами» пропорциональна расстоянию между ними; однако фокусирующий градиент обратно пропорционален квадрату радиуса, на котором располагаются «рога». По этой причине при постоянной апертуре трубок дрейфа вдоль структуры необходимо поддерживать постоянной величину допустимой разности потенциалов между «рогами». В этом случае высокий темп ускорения может быть достигнут только путем отдельной настройки фокусирующей и ускоряющей ячеек.

Возможность снижения уровня электрического поля в ячейках, содержащих ВЧК, может быть достигнута, если использовать, например, многозазорные ячейки с промежуточными трубками дрейфа. Эта идея реализова-

на в ускорителе УРАЛ-30 [10, 11]. В этом случае в каждый зазор между потенциальными трубками дрейфа установлена трубка с нулевым потенциалом (рис. 3). Это возможно также в ускоряющей структуре встречно-штыревого типа при условии, что подвеска такой промежуточной трубки дрейфа будет расположена под углом  $90^\circ$  по отношению к встречным штырям. В результате разность потенциалов на ячейке распределяется между двумя зазорами – фокусирующим и ускоряющим. Изменяя положение промежуточной подвески в азимутальной плоскости, можно регулировать этот процесс распределения. Но более приемлемым вариантом является ускоряющая структура, комбинирующая ПФФ с регулярно размещенными ВЧК дублетами (рис. 4).

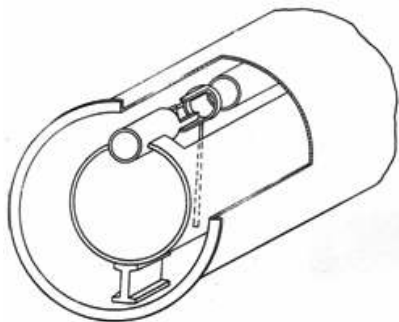


Рис. 3. H-резонатор с ВЧК фокусировкой, реализованной в ускорителе УРАЛ-30

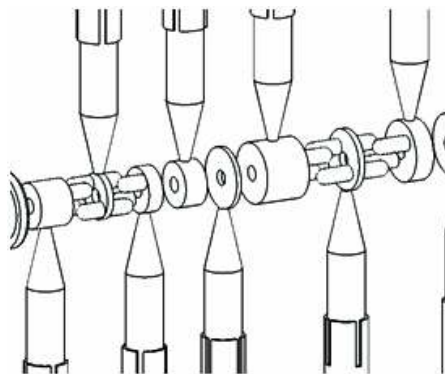


Рис. 4. Ускоряющая структура, комбинирующая ПФФ с регулярно размещенными ВЧК дублетами

Изучено несколько вариантов комбинации ускоряющих и фокусирующих элементов, которые составляют структуру фокусирующих периодов, и модификаций высокочастотных квадрупольных дублетов [13]. На рис. 5а, б приведены схемы двух наиболее простых вариантов таких ячеек. Кроме их структуры показан также уровень электрического поля, которое воздействует на синхронную частицу при ее пролете вдоль ячеек.

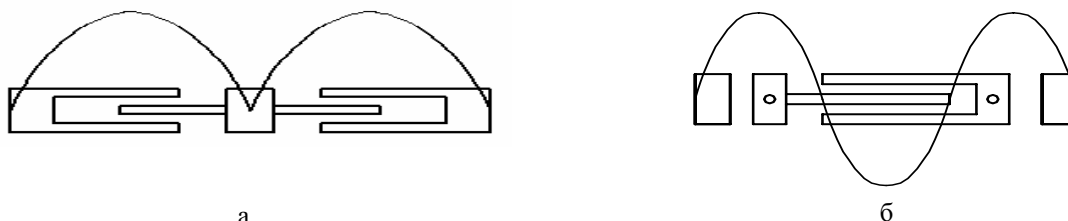


Рис. 5. Варианты конструкции высокочастотных квадрупольей: а – дублет, состоящий из двух  $\pi$ -ячеек общей длиной  $\lambda$ ; б – трехзазорная ячейка с двумя промежуточными трубками дрейфа

На рис. 5а схематически показан ВЧК дублет, состоящий из двух  $\pi$ -ячеек общей длиной  $\lambda$ . Совмещенное расположение квадрупольей с перпендикулярным распределением  $E_x$  и  $E_y$  дает наибольший фокусирующий эффект. Для встречно-штыревой ускоряющей структуры в этом варианте для поддержания высокого темпа ускорения требуется локальная настройка фокусирующих ячеек.

На рис. 5б приведен вариант трехзазорной ячейки с двумя промежуточными трубками дрейфа, в котором квадруполь расположен в замедляющем полупериоде. Разность потенциалов разделена между квадрупольным и двумя аксиально-симметричными зазорами.

В каждой из приведенных модификаций ВЧК, входящих в структуру фокусирующих периодов, возникает необходимость локальной настройки их ячеек. Регулировка распределения электрического поля осуществляется, как указывалось ранее, изменением угла расположения основной или промежуточных подвесок трубок дрейфа в азимутальной плоскости. Схема расположения подвесок промежуточных трубок дрейфа для варианта трехзазорной ячейки с двумя промежуточными трубками дрейфа изображена на рис. 6. Подвески промежуточных трубок дрейфа устанавливаются симметрично относительно линии с нулевым потенциалом во встречно-штыревой ускоряющей структуре.

На 17-зазорной модели ускоряющей структуры, настроенной на приблизительно равномерное распределение электрического поля [19], проведены экспериментальные исследования по изменению распределения полей в ячейках упомянутых вариантов ВЧК. Результаты показали, что возможно регулировать распределение электрических полей в зазорах в широких пределах сравнительно небольшим изменением угла расположения подвесок промежуточных трубок дрейфа для варианта трехзазорной ВЧК ячейки (рис. 7). На рис. 8 приведены результаты формирования требуемого распределения электрического поля (в относительных единицах), полученные на модели встречно-штыревой структуры, в которой в ряд регулярных ячеек вмонтирована трехзазорная ВЧК ячейка. Путем подбора угла между подвесками промежуточных трубок дрейфа и их диаметра можно получить электрическое поле между концом «рога» и трубкой дрейфа (пунктир), по величине равное полю в регу-

лярных зазорах (сплошные линии). В качестве дополнительного средства регулировки уровня электрического поля в ВЧК рассматривалось различное варьирование формы «рогов», влияющей на емкостные характеристики зазоров в квадруполе.

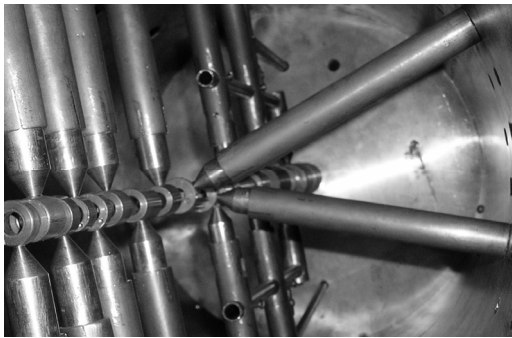


Рис. 6. Расположение подвесок промежуточных трубок дрейфа в трехзазорной ВЧК ячейке



Рис. 7. Реализация варианта трехзазорной ВЧК ячейки с двумя промежуточными трубками дрейфа на модели

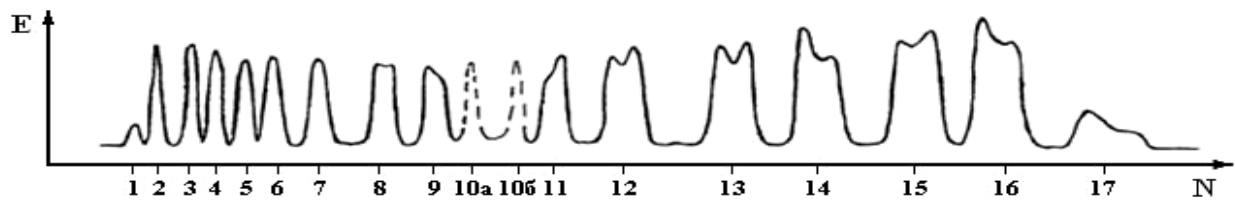
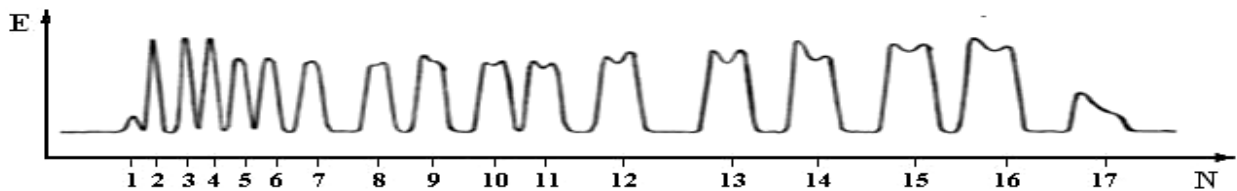
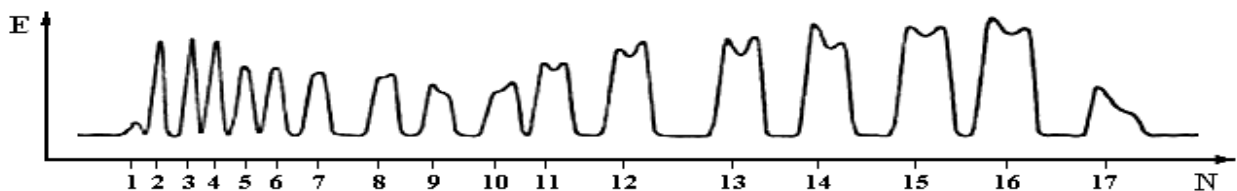


Рис. 8. Распределение электрического поля в ускоряющей структуре с трехзазорной ВЧК ячейкой

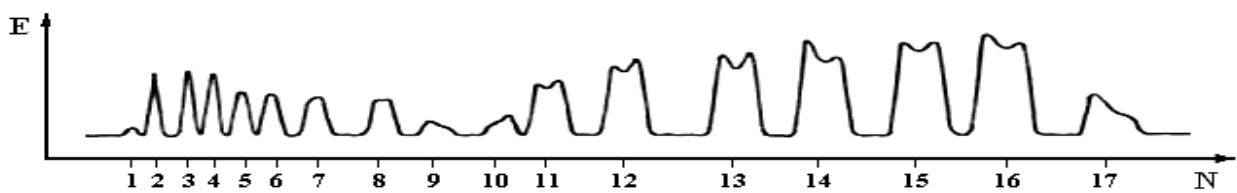
Но более интересен вариант с ВЧК дублетом (рис. 5а). На той же 17-зазорной модели ускоряющей структуры установлены «рога» на трех трубках дрейфа, образуя в 9 и 10 зазорах ВЧК дублет. В процессе исследований изменялся угол «встречности» штанги 9 трубки дрейфа по отношению к соседним от 180 до 90°. Результаты этого воздействия можно наблюдать на диаграммах измеренного распределения электрического поля в зазорах структуры (в относительных единицах) для трех значений углов 180, 128 и 90° (рис. 9а, б, в). При этом происходит повышение резонансной частоты приблизительно на 1 МГц. Как видно из этих рисунков, уровень электрического поля существенно понижается в 9 и 10 зазорах, при этом «прихватываются» поля в соседних зазорах, но это воздействие можно скомпенсировать соответствующим изменением диаметров трубок дрейфа и положений поршней концевых резонансных элементов настройки.



а



б



в

Рис. 9. Распределение электрического поля в ускоряющей структуре с ВЧК дублетом, образованным вокруг 9 трубки дрейфа для различных положений ее штанги (а – 180°, б – 128°, в – 90°)

Затем аналогичная ячейка была образована вокруг 4 трубки дрейфа и одновременно изменялся угол «встречности» штанг 4 и 9 трубок дрейфа по отношению к соседним от  $180$  до  $52^\circ$ . Результаты этого воздействия можно наблюдать на диаграммах измеренного распределения электрического поля в зазорах структуры (в относительных единицах) для четырех значений угла «встречности»  $180$ ,  $128$ ,  $90$  и  $52^\circ$  (рис. 10а, б, в, г).

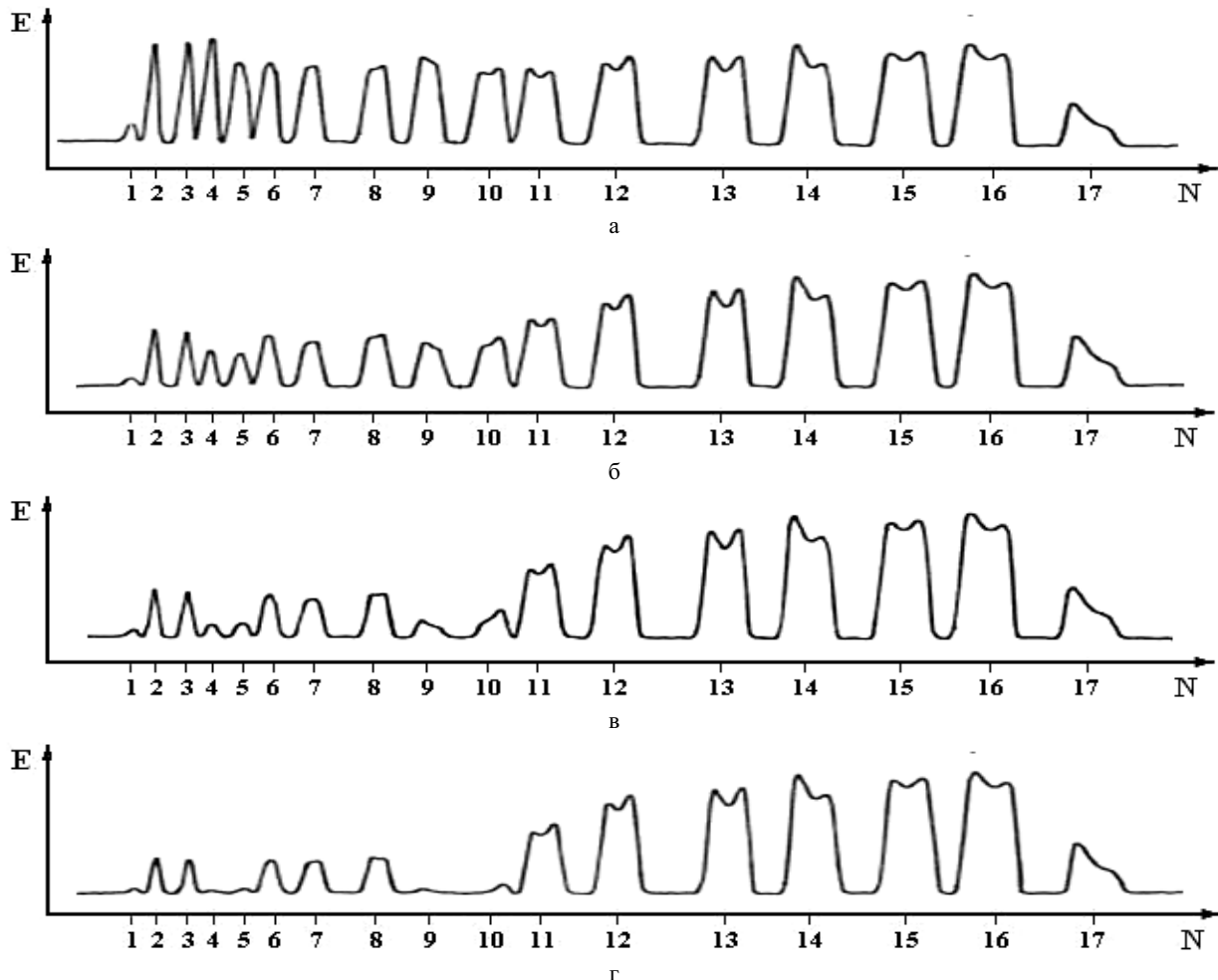


Рис. 10. Распределение электрического поля в ускоряющей структуре с ВЧК дублетами, образованными вокруг 4 и 9 трубок дрейфа для различных положений их штанг (а –  $180^\circ$ , б –  $128^\circ$ , в –  $90^\circ$ , г –  $52^\circ$ )

Как видно из этих рисунков уровень электрического поля существенно понижается в 4, 5, 9 и 10 зазорах, при этом в соседних зазорах его уровень снижается, но наблюдается выравнивание значений полей в начальной части структуры в «ускоряющих» зазорах и подъем уровня поля на выходе (где отсутствуют «фокусирующие» ячейки). Такое выравнивание значений электрических полей в «ускоряющих» зазорах, расположенных между «фокусирующими», очень благоприятно для длинных структур, содержащих несколько ВЧК ячеек. Изменение угла «встречности» штанг на этих двух трубках дрейфа «фокусирующих» ячеек сопровождается повышением резонансной частоты приблизительно на  $2,5$  МГц. Уровень электрического поля в соседних зазорах можно регулировать опять же соответствующим изменением диаметров трубок дрейфа, а общий перекося поля – положением поршней концевых резонансных элементов настройки.

Все исследования проводились на экспериментальном стенде с использованием измерительного комплекса, позволяющего проводить изучение электродинамических характеристик резонансных ускоряющих структур (частот, напряженности электрических полей, добротности, шунтового сопротивления и др.). Измерение электрических полей (в относительных единицах) осуществлялось общеизвестным методом малых возмущений в резонатор [20, 21].

### ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности регулирования распределения электрического поля в высокочастотных квадрупольях, используемых для фокусировки пучка (дополнительно к переменнo-фазовой фокусировке) в ускоряющей структуре встречно-штыревого типа. На двух наиболее простых вариантах ВЧК (при различных схемах их использования) осуществлено регулирование уровня

электрического поля в довольно широких пределах путем изменения угла расположения основной либо промежуточных подвесок трубок дрейфа в азимутальной плоскости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Courant E.D., Livingstone M.S., Snyder H.S. The Strong-Focusing Synchrotron – A New High Energy Accelerator // *Phys. Rev.* – 1952. – Vol. 88. – P. 1190–1196.
2. Good M.L. Phase Reversal in Linear Accelerators // *Phys. Rev.* – 1953. – Vol. 92, № 2. – P. 538.
3. Fainberg Ya.B. Alternating phase focusing // *Proc. of International Symposium on High Energy Accelerators and Pion Physics.* – Vol. 1. – Geneva: CERN. – 1956. – P. 92–96.
4. Кушин В.В. О повышении эффективности фазово-переменной фокусировки в линейных ускорителях // *Атомная энергия.* – 1970. – № 29, вып. 2. – С. 123–124.
5. 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.
6. Nolte E., Geschonke G., Berdermann K. et al. The Munich Heavy Ion Postaccelerator // *Nuclear Instrum. and Methods.* – 1979. – Vol. 158, № 2–3. – P. 311–324.
7. Bomko V.A., Kobets A.P., Zaitzev B.V. et al. Particle Dynamic in the Ion Linear Accelerator Based on Alternation Phase Focusing with Moving Center of the Bunch // *Proc. of the Eight European Particle Conference. EPAC 2002.* – Paris (France). – 2002. – P. 870–872.
8. Капчинский И.М., Тепляков В.А. Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой // *ПТЭ.* – 1970. – № 2. – С. 19–22.
9. Владимирский В.В. Вариант жесткой фокусировки в линейном ускорителе // *ПТЭ.* – 1956. – № 3. – С. 35–39.
10. Тепляков В.А. Использование высокочастотной квадрупольной фокусировки в линейных ускорителях ионов // *Труды 2 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц.* – Т. 2. – М.: Наука. – 1972. – С. 7–11.
11. Зенин В.А. и др. Линейный протонный ускоритель с ВЧК-фокусировкой на 30 МэВ: Препринт / ИФВЭ; 93-147. – Протвино: 1993. – 12 с.
12. Bomko V.A., Kobets A.P., Ptukhina Z.E., Tishkin S.S. Variant Alternating Phase Focusing with the Stepped Change of the Synchronous Phase // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations.* – 2004. – № 2. – P. 153–154.
13. Bomko V.A., Dyachenko A.F., Kobets A.F. et al. The Structure of the High Frequency Focusing Cells in Linear Ion Accelerators // *Proc. of the Particle Accelerator Conference PAC05.* – Knoxville, Tennessee, USA. – 2005. – P. 1796–1798.
14. Бомко В.А., Птухина З.Е., Тишкин С.С., Шулика Н.Г. Вариант фокусировки ускоряющим ВЧ-полем в линейных ускорителях ионов // *Сб. докл. XVIII конф. по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2002.* – Т. 1. – Обнинск, 2004. – С. 227–230.
15. Бомко В.А., Дьяченко А.Ф., Пипа А.В., Хижняк Н.А. Разработка и изучение электромагнитных характеристик модификаций ускоряющей структуры линейного ускорителя тяжелых ионов: Препринт / ХФТИ; 82-10. – Х.: 1982. – 47 с.
16. Бомко В.А., Дьяченко А.Ф., Кобец А.Ф., Рудяк Б.И. Исследование структур для ускорения тяжелых ионов: Препринт / ЦНИИатоминформ. – М.: 1988. – 26 с.
17. Bomko V.A., Dyachenko A.F., Kobets A.F. et al. Smooth Variation of Ion Energy in the Interdigital Accelerating H-structure // *Nucl. Instrum. and Methods in Physical Research.* – 1998. – Vol. A 406. – P. 1–5.
18. Bomko V.A., Dyachenko A.F., Kobets A.F. et al. Interdigital Accelerating H-structure in the Multicharged Ion Linac (MILAC) // *Review of Scientific Instruments.* – 1998. – Vol. 69, № 10. – P. 3537–3540.
19. Bomko V.A., Dyachenko A.F., Zaitzev B.V. et al. Development of the New Prestripping Section for LUMZI // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations.* – 2001. – № 3. – P. 128–130.
20. Chahid W. Le Champ et les Pertes Dans les Accelérateurs Lineaires a Ions // *L'Onde Electrique.* – 1957. – Vol. XXXVII, № 359. – P. 171–173.
21. Горбатко В.И., Калинин Е.Н., Конов А.А. и др. Реализация метода малых возмущений на современной аппаратурной базе // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента.* – 1986. – Вып. 1(27). – С. 52–54.

#### THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION REGULATION IN THE INTERDIGITAL ACCELERATING STRUCTURE WITH HIGH-FREQUENCY QUADRUPOLES

A.F. Dyachenko

*National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology»,*

*Ukraine, 61108, Kharkov, Academicheskaya st., 1*

*e-mail: dyachenkoa@kipt.kharkov.ua*

Results of experimental research of the electric field distribution regulation in the model interdigital accelerating structure with alternating phase and high-frequency quadrupole focusing a beam are discussed. Two most simple variants of high-frequency quadrupoles (in the form of «horns») and various schemes of their use are considered. Regulation of the electric field distribution is carried out by a change of a corner of an arrangement of the basic or intermediate stems of the quadrupole drift tubes in an azimuthal plane.

**KEY WORDS:** linear accelerator, interdigital accelerating structure, high-frequency quadrupole, distribution of an electric field, corner of an arrangement stems of the drift tubes, cell, doublet.