

# Линейный ускоритель тяжелых многозарядных ионов ИТЭФ с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой

В.А. Андреев, Р.М. Венгров, В.Л. Звягинцев, Д.А. Кашинский, А.А. Коломиец, Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, В.Г. Кузьмичев, Д.А. Лякин, С.А. Минаев, В.И. Першин, Б.Ю. Шарков, С.Г. Ярамышев  
*Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия*

О.В. Ершов

*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

G. Parisi

*IAP, Frankfurt, Germany*

В ИТЭФ разработан линейный ускоритель с ПОКФ, представляющий собой прототип высокоэффективного, компактного, интенсивного ускорителя тяжелых ионов. Ускоритель спроектирован для ускорения ионов с отношением заряда к массе  $1/60$  ( $U^{4+}$ ) до энергии 110 кэВ/н при токе пучка 15 мА. При этом полная длина ускоряющей структуры составляет 12 м, а ее наружный диаметр – 0.88 м. Рабочая частота ускорителя равна 27 МГц. В качестве инжектора ускорителя используется источник тяжелых ионов типа MEVVA, также разработанный в ИТЭФ. В течение 1996-99 гг. были произведены проектирование, изготовление, монтаж и ВЧ-настройка ускоряющей структуры. При точности юстировки  $\pm(60-70)$  мкм максимальное отклонение ускоряющего поля на оси не превышает  $\pm 1.5\%$ . Для ускорителя была также разработана и изготовлена система ВЧ-питания с двухкаскадным генератором на лампах ГИ-27АМ. Проектная выходная мощность генератора  $\approx 2$  МВт в импульсе.

В конце 1999 г. произведен физический пуск ускорителя и получен ускоренный пучок ионов двухзарядной меди  $Cu^{2+}$ . На выходе ускорителя получено 85% от тока пучка на входе. К настоящему моменту на ускорителе достигнут уровень ВЧ-мощности, достаточный для ускорения ионов  $U^{4+}$ .

## Введение

При проектировании линейных ускорителей с ПОКФ, работающих на низких частотах, всегда приходится идти на компромисс между компактностью резонансной структуры и ее шунтовым сопротивлением, которое тем выше, чем больше ее геометрические размеры. Использование на низких частотах в качестве резонансной структуры четырехкамерного резонатора (в зарубежной литературе "4-vane RFQ") является практически нецелесообразным, так как ускоритель имел бы в этом случае неоправданно большие поперечные размеры. Например, четырехкамерный резонатор на частоту 27 МГц имел бы диаметр порядка 2.5 – 2.8 метра. Поэтому наиболее часто на низких частотах используются резонансные структуры типа "4-rod", "Spiral", "Split ring", "Split-coaxial" и т.п. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. В частности, например, "4-rod" имеет дипольную компоненту фокусирующего поля из-за асимметрии структуры и неоднородность продольного распределения поля в канале ускорения, которая связана с локальным увеличением емкости в местах соединения электрода и индуктора, "Spiral", "Split ring" и "Split-coaxial", будучи компактными, имеют недостаточную механическую жесткость и, кроме того, сложны в настройке.

В 1992 г. в ИТЭФ была разработана резонансная структура с окнами связи ("4-Ladder") [1], которая по сравнению с четырехкамерным резонатором обладает рядом преимуществ. Известным недостатком четырехкамерного резонатора является слабая связь между камерами и, как следствие, близость частот рабочей (квадрупольной) и паразитных (дипольных и квадрупольных более высокого порядка) мод колебаний, что вызывает необходимость в применении специальных мер для стабилизации рабочей моды. В разработанной резонансной структуре применен способ стабилизации рабочей моды, основанный на усилении магнитной связи между камерами с помощью отверстий (окон), вырезаемых в электродах резонатора.

Электродинамические расчеты, выполненные с помощью программы MAFIA, и исследования, проведенные на макетах резонаторов [2], показали, что, сохраняя основные достоинства четырехкамерного резонатора, такие как механическая жесткость, технологичность в изготовлении и высокое шунтовое сопротивление, эта резонансная структура обеспечивает надежное разделение по частоте рабочей и паразитных мод колебаний и, как следствие, упрощение процедуры настройки и снижение требований к точности изготовления и юстировки элементов резонатора. Структура имеет меньшие поперечные размеры, что позволяет использовать ее на низких частотах.

Рабочей модой колебаний в резонаторе с окнами связи является комбинация квадрупольной  $TE_{210}$  и коаксиальной ТЕМ мод. Благодаря продольному току, протекающему по электродам, создается магнитный поток, охватывающий четыре камеры ускорителя, обеспечивающий эффективную магнитную связь между камерами и, следовательно, надежную стабилизацию рабочей моды колебаний.

## 1. Конструкция ПОКФ структуры на 27 МГц



Рис. 1. Общий вид структуры в процессе сборки.

В 1996 г. в ИТЭФ было начато проектирование тяжелоионного ускорителя на 27 МГц для ускорения ионов с отношением заряда к массе  $1/60$  ( $U^{4+}$ ) до энергии 110 кэВ/н при токе пучка 15 мА.

Учитывая то обстоятельство, что резонансная структура должна быть размещена в имеющихся готовых вакуумных объемах диаметром 1200 мм, изготовленных из нержавеющей стали, структура с окнами связи была модернизирована с тем, чтобы еще больше снизить ее поперечные размеры. В результате была разработана низкочастотная версия структуры, которая была названа "Ring-connected" RFQ [3, 4]. Она имеет хорошую механическую жесткость, небольшие поперечные размеры, надежную стабилизацию рабочей моды колебаний и проста в изготовлении.

В отличие от резонансной структуры «4-Ladder», здесь внешняя оболочка заменена коль-

цевыми и продольными индукторами, которые позволили значительно увеличить индуктивность структуры и сделать ее более компактной. При проектировании ускорителя были проведены электродинамические расчеты резонатора и исследованы его радиотехнические характеристики на масштабных макетах. Поскольку поля в "Ring-connected" структуре не замыкаются только внутри нее, но также заполняют пространство между структурой и вакуумным кожухом, специально был исследован вопрос о величине потерь в стенках кожуха, учитывая то обстоятельство, что он выполнен из нержавеющей стали. Расчеты, проведенные с помощью программы MAFIA, показали, что потери в стенках кожуха приводят к незначительному снижению ( $\sim 3\%$ ) шунтового импеданса структуры.

Конструкция ПОКФ структуры была разработана таким образом, чтобы проверить основные технические решения, которые могли бы быть использованы при проектировании тяжело-ионного ускорителя большой мощности, при весьма ограниченной смете. Это означает, что в целях экономии иногда приходилось сознательно допускать некоторое снижение радиотехнических и эксплуатационных параметров структуры.

Конструкция, представленная на рис. 1, состоит из восьмигранных колец, изготовленных как единое целое с держателями электродов. Кольца соединены наружными продольными стяжками. Модулированные электроды располагаются на массивных основаниях, которые крепятся к держателям на кольцах. Кольца, стяжки и основания электродов изготовлены из алюминиевого сплава, покрытого медью. Модулированные электроды были изготовлены из бескислородной меди. Все элементы структуры соединены болтами, и она является трехмерной жесткой конструкцией, обеспечивающей необходимую точность положения электродов. Толщина меднения элементов была не менее 60 мкм. Точность механической прецизионной обработки деталей после меднения была не хуже 20 мкм.

Конструкция структуры в значительной степени определялась желанием достичь ее максимальной простоты из-за ограниченных финансовых возможностей. В частности, в конструкции не предусматривалось охлаждение, необходимое для работы с большими средними токами пучка. Не все места соединений элементов структуры выполнялись наилучшим образом с точки зрения ВЧ-контактов. Последнее обстоятельство привело к ухудшению добротности примерно в два раза по сравнению с идеальным вариантом, обеспечивая, однако, приемлемый для работы прототипа уровень потерь ВЧ-мощности. Улучшение контактов не представляет принципиальной проблемы, но привело бы к выходу за пределы допустимого финансирования данной работы.

Основные параметры ПОКФ структуры представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Основные параметры структуры.

Длина ПОКФ структуры, м	12
Внутренний диаметр вакуумного кожуха, м	1.2
Максимальный внешний размер колец, мм	880
Толщина колец, мм	50
Расстояние между смежными кольцами, мм	580
Число колец	21
Поперечное сечение стяжек, мм x мм	50 x 25
Высота держателей электродов, мм	280
Высота электродов, мм	26
Толщина электродов, мм	10
Минимальное расстояние между противоположными электродами, мм	12.8
Максимальная напряженность электрического поля на поверхности электродов, единиц Килпатрика	2.2

## 2. Измерения радиотехнических параметров структуры

Измерения распределений электромагнитных полей и других ВЧ-параметров структуры проводилось по стандартным методикам с использованием автоматизированной системы, обеспечивающей протяжку возмущающего диэлектрического тела, измерение и обработку результатов. При этом использовался измеритель разности фаз с цифровым выходом, совмещенный с помощью контроллера с ЭВМ. Автоматизированная система позволила повысить точность измерений и сократить время на обработку результатов.

На рис. 2 представлены нормализованные результаты измерений электрических полей вдоль структуры. Возмущающее тело протягивалось вне апертуры между каждой парой смежных электродов. Измерения проводились на части структуры длиной 8 м до и после ее установки в вакуумный кожух. При этом в конце собранной части устанавливались электроды, соответствующие концу структуры. Это обстоятельство, как видно из рисунка, приводило к появлению “волнистости” на измеренных распределениях и их расходимости в концевой области измерений. Однако в основной измеряемой части структуры неоднородности полей не превышали 1.5%, что подтвердило расчетные параметры.

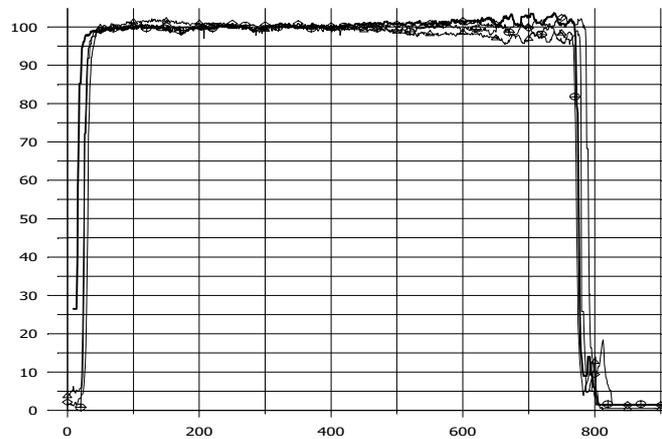
Расчетные и измеренные параметры ПОКФ структуры на 27 МГц представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** ВЧ-параметры структуры.

	Расчет	Измерения
Частота квадрупольной моды, МГц	27.14	27.66
Добротность	13000	5650
Частота дипольной моды, МГц	37.2	36
Шунт-импеданс, МОм * м	1.1	0.48

## 3. Моделирование динамики пучка

Расчет модуляции электродов структуры и моделирование динамики пучка в ускорителе проводились с использованием разработанных в ИТЭФ программ DESRFQ и DYNAMION [5]. Геометрия каждой ячейки структуры рассчитывалась с учетом реального распределения поля при данной конфигурации электродов и



**Рис. 2.** Измеренные распределения поля.

распределений частиц в фазовом пространстве, полученных на основании расчетов динамики пучка в предшествующих ячейках с учетом действия пространственного заряда.

Рассчитанная структура должна удовлетворять следующим условиям:

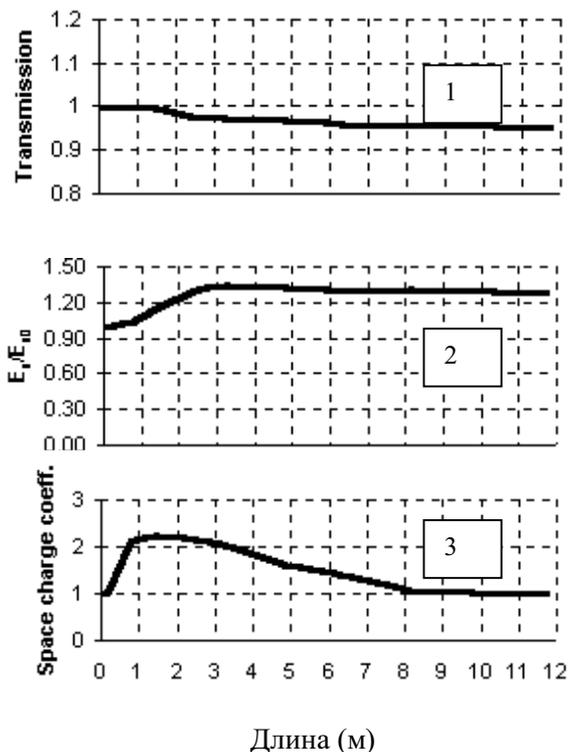
- силы объемного заряда не должны превышать некоторой определенной величины;
- в ускорение захватывается не менее чем для 95% частиц при расчетном токе пучка;
- набег фазы поперечных колебаний не должен меняться более чем на  $\pm 10\%$  вдоль ускорителя;
- величина максимального поля на поверхности электродов не отличается от выбранного значения более чем на 1%.

Эти требования обеспечивают минимизацию роста эмиттанса из-за эффекта объемного заряда и рассогласования пучка в канале при изменении величины набег фазы.

В работе [5] был введен кулоновский параметр  $h$ , определяющий влияние сил пространственного заряда на динамику пучка и, в частности, на величину максимального тока пучка, который может ускоряться в линейном ускорителе без потерь. Параметр  $h$  определяется следующим соотношением:

$$h = \frac{\lambda}{\mu_0 \beta \gamma^2 I_0} \frac{I}{V_p},$$

где  $I$  – пиковый ток пучка,  $V_p$  – нормализованный поперечный эмиттанс пучка,  $\lambda$  – длина волны ускоряющего поля,  $\beta$  – относительная скорость частиц,  $\gamma^2$  – релятивистский фактор,  $I_0$  – характеристический ток, равный  $3.13 \cdot 10^7$  A/Z, A/Z – отношение массы иона к его заряду.



**Рис. 3.** Результаты расчетов динамики пучка: трансмиссия (кривая 1), относительное изменение эмиттанса (2), кулоновский параметр (3).

Как правило, в структуры с ПОКФ инжектируется монохроматический пучок. Это означает, что в процессе формирования сгустков на начальных периодах структуры величина пикового тока пучка может меняться в весьма больших пределах при формальном сохранении геометрической длины сепаратрисы. Кулоновский параметр пучка  $h$  при этом всегда больше, чем у инжектируемого пучка. Таким образом, требование на ограничение величины кулоновского параметра определяет режим группировки пучка и закон модуляции электродов вдоль ускорителя.

На рис. 3 приведены некоторые кривые, иллюстрирующие расчет данного ускорителя. Расчеты велись для тока пучка 15 мА и начального нормализованного эмиттанса 0.3 мм·мрад с использованием программы DYNAMION. На кривой 3 представлено относительное изменение кулоновского параметра вдоль ускорителя. На участке формирования (0 – 1 м) происходит заполнение сепаратрисы и плавное увеличение  $h$  до его максимального предписанного расчетного значения  $h_{\text{макс}}$ . На длине структуры 1–3 м параметры ПОКФ структуры меняются таким образом, чтобы  $h$  поддерживался примерно постоянным. При дальнейшем ускорении кулоновский параметр снижается, так как изменения синхронной фазы и коэффициента модуляции электродов должны обеспечивать поддержание частоты поперечных колебаний в заданных пределах. На участке основного ускорения поддерживается практически постоянное значение  $h$ , что соответствует режиму стационарных сгустков.

Кривая 2 рис. 3 показывает рост среднеквадратичного нормализованного эмиттанса вдоль ускорителя.

Видно, что эмиттанс увеличивается на  $\approx 20\%$  и что основной рост происходит на участке, соответствующем максимальному значению кулоновского параметра. Следует отметить, что выбор  $h_{\text{макс}} = 0.34$  определял только требованием достижения выходной энергии 110 кэВ/н на длине структуры, ограниченной существующим вакуумным кожухом.

Кривая 1 рис. 3 представляет трансмиссию пучка вдоль ускорителя. Несмотря на то, что отношение акцептанса к эмиттансу для тока 15 мА равно примерно 2,5, имеются некоторые потери частиц пучка. Это можно объяснить тем, что при выбранном значении  $h_{\text{макс}}$  процессы образования гало пучка играют существенную роль [6].

#### 4. Первые эксперименты с пучком

Следуя принятому решению, по которому данный ускоритель должен быть простой и недорогой установкой для его ВЧ-питания, был разработан и изготовлен двухкаскадный автогенератор на лампах ГИ-27. Такой генератор не требует предварительной точной настройки ускоряющей структуры с помощью специальных устройств. Кроме того, хорошо преодолеваются области генерации вторично-электронных разрядов, которые в значительной степени осложняют ввод мощности в резонатор. Предварительная настройка ВЧ-контуров, петель ввода мощности, и подбор длин фидеров были произведены на низком уровне мощности без откачки вакуумного объема. После того, как условия возбуждения были найдены и оптимизированы, начались работы при высоком уровне ВЧ-мощности с рабочим вакуумом  $2 \cdot 10^{-4}$  Па.

После двух недель тренировки в резонатор была без особых проблем введена ВЧ-мощность порядка 800 кВт, достаточная для ускорения ионов  $\text{Cu}^{2+}$ . К настоящему моменту достигнута ВЧ-мощность в 2 МВт, необходимая для ускорения ионов  $\text{U}^{4+}$ . Опыт тренировки показал, что, несмотря на упрощенность данной конструкции ПОКФ структуры, оказалось возможным быстро достичь необходимого уровня ВЧ-мощности без особых проблем с контактным искрением и мультипакторными эффектами.

Первые эксперименты с пучком были проведены с ионами меди, получаемыми в ионном источнике типа MEVVA. Пучок на выходе из источника содержит смесь ионов разных зарядностей, и при отсутствии сепарации на входе ускорителя в основном содержит ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$ . Результаты моделирования динамики такого пучка в ускорителе с помощью программы DYNAMION, проведенные при уровне ВЧ-ускоряющего поля, соответствующего ускорению ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что трансмиссия для ионов  $\text{Cu}^{2+}$  близка к 100% и приблизительно 30% ионов  $\text{Cu}^{3+}$  также захватывается в режим ускорения.

На рис. 5 показаны сигнал с индукционного датчика на выходе ионного источника (верхняя кривая) и сигнал с цилиндра Фарадея, установленного на выходе ускорителя (нижняя кривая), в режиме дрейфа пучка ионов меди в ускорителе при энергии инжекции 76 кВ. Из рисунка видно, что 12 метров дрейфа позволяют надежно разделить ионы меди с разными зарядами с помощью времяпролетной методики.

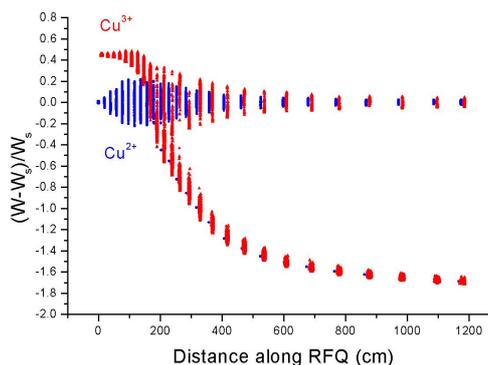


Рис. 4. Относительное изменение энергии ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$  в некоторых поперечных сечениях вдоль структуры.

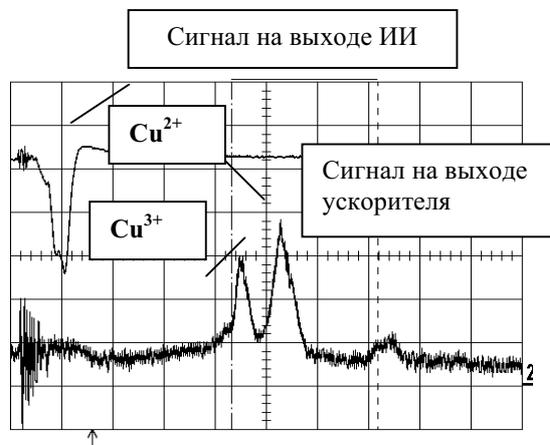


Рис. 5. Времяпролетный спектр пучка ионов меди (временной масштаб - 5 мкс/дел).

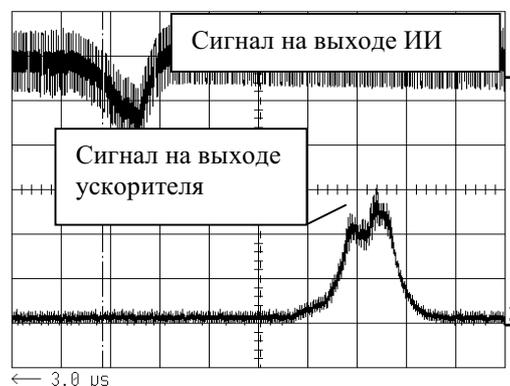


Рис. 6. Временной спектр ускоренного пучка на выходе ускорителя.

Времена пролета ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$  через ПОКФ структуру составляют соответственно 22 и 17 мкс за счет разностей скоростей на входе в ускоритель. Однако при ускорении эти времена одинаковы для ионов разной зарядности. Для неускоренной части ионов время пролета остается тем же самым, как на рис. 5. Время пролета при ускорении в 382 ячейках структуры, работающей на частоте 27.7 МГц, равно 6.9 мкс.

Сигнал от ускоренного пучка на выходе ускорителя представлен на рис. 6 (временной масштаб – 2 мкс на деление). Временной сдвиг сигналов для ионов разной зарядности в этом случае объясняется дрейфом в согласующем канале между ионным источником и ПОКФ структурой. Принимая во внимание дрейф в согласующем канале, временные сдвиги сигналов для ускоренных ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{3+}$  по отношению к сигналу с индукционного датчика составили 11.1 и 9.4 мкс соответственно. Импульс от неускоренных ионов при данном временном масштабе не попал на осциллограмму рис. 6.

Необходимо отметить, что существующий согласующий канал был сконструирован ранее для работы в составе другой установки и не является оптимальным для данного ускорителя. По этой причине мы имели на входе в ускоритель 5 – 6 мА тока ионов  $\text{Cu}^{2+}$ . При этом на выходе из ускорителя ток этих ионов составлял 4 – 4.5 мА. Достигнутый коэффициент трансмиссии в первых экспериментах с пучком был не хуже 80%.

### Заключение

В результате запуска в ИТЭФ нового ускорителя тяжелых ионов с рабочей частотой 27 МГц и проведения первых экспериментов с пучком можно заключить, что:

- Новая ПОКФ структура обеспечивает хорошую механическую стабильность, надежное разделение по частотам рабочей моды от паразитной дипольной и равномерность распределения ВЧ-полей вдоль структуры и высокий шунт-импеданс.
- Несмотря на упрощенную механическую конструкцию структуры, были получены расчетные радиотехнические параметры ускорителя.
- Требуемый уровень ВЧ-поля между смежными электродами, соответствующий 2.2 килпатрикам, был достигнут после непродолжительной тренировки.
- Результаты экспериментов с пучком показали хорошее совпадение с расчетными значениями.

В дальнейшем планируется провести модернизацию согласующего канала, что позволит ускорять пучки ионов  $\text{U}^{4+}$  с проектным значением тока.

### Список литературы

- [1] V.A. Andreev and G. Parisi.  $90^\circ$  – apart-stem RFQ structure for wide range of frequencies. – PAC'93, Washington, D.C., May 1993, p.3124.
- [2] V.A. Andreev, G. Parisi. Field Stabilization and End-Cell Tuning in a 4-vane RFQ. – EPAC'94, London, June 1994.
- [3] V. Andreev, G. Parisi. A  $90^\circ$  – apart-stem Low Frequency RFQ. EPAC 96. – Barcelona, June 1996.
- [4] V.A. Andreev et al. Development of the ITEP 27 MHz Heavy Ion RFQ. – Proc. of the 1997, Particle Acc. Conf., Vancouver, 1997.
- [5] A. Kolomiets et al. DYNAMION – the Code for Beam Dynamics Simulations in High Current Ion Linac. – EPAC-98, Stockholm.
- [6] I.M. Kapchinsky. Theory of Linear Resonant Accelerators – Moscow, Energoizdat, 1982.
- [7] A. Kolomiets, S. Yaramishev. Comparative Study of Accelerating Structures Proposed for High Power Linac. – PAC-97, Vancouver, 12-16 May 1997, Bulletin of the American Phys. Soc., May 1997, Vol. 42, № 3, p.1387.