



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2004–42
ОЛУ

С.Р. Салахутдинов, А.А. Тимофеев

**КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ
ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ
С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ**

Протвино 2004

Аннотация

Салахутдинов С.Р., Тимофеев А.А. Конструктивные и технологические особенности изготовления ускоряющей структуры линейного ускорителя протонов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой : Препринт ИФВЭ 2004-42. – Протвино, 2004. – 8 с., 9 рис., библиогр.: 4.

Приводится описание и сравнение конструкций и методов изготовления ускоряющих структур линейного ускорителя протонов системы Альвареца и ускорителя протонов с ВЧК-фокусировкой. Дано краткое описание ускоряющих структур линейных ускорителей, применяемых в ИФВЭ. Рассматриваются некоторые проблемы конструкции, изготовления и сборки узлов ускоряющих структур ЛУ. Обсуждаются вопросы, связанные с конструированием и технологией изготовления ускоряющей структуры с высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Обосновывается необходимость решения конструкторских и технологических проблем, возникающих при создании ускорителя нового поколения.

Abstract

Salahutdinov S.R., Timofeev A.A. The Design and the Technology of Accelerating Structures of the Proton Linear Accelerator with Radio Frequency Quadrupole Focusing: IHEP Preprint 2004-42. – Protvino, 2004. – p. 8, figs.: 9, refs.: 4.

The designs and the technologies of accelerating structures of the proton linear accelerator of Alvarez type and those of the proton accelerator with Radio Frequency Quadrupole (RFQ) focusing are described and compared. A brief description of the accelerating structures of linear accelerators employed at IHEP is presented. Certain problems of design and technologies of the accelerating units are considered. Questions concerning designing and technology of the RFQ-focusing accelerating structure are discussed. The necessity of solving the arising problems of design and technology for a new generation RFQ-accelerators is substantiated.

Введение

Линейные ускорители (ЛУ) протонов являются сложными электрофизическими установками, предназначенными для получения пучка ускоренных частиц (протонов) с энергиями до сотен мегаэлектронвольт (МэВ) и средними токами до десятков миллиампер (мА). Такие ЛУ входят в состав больших ускорительных комплексов в качестве инжекторов в кольцевые ускорители (комплекс У-70 ИФВЭ), применяются как самостоятельные установки в научных (ИЯИ, г.Троицк) и прикладных целях [1].

В зависимости от назначения ЛУ его составные части и построение могут быть различными. Тем не менее, в основе устройства большинства ЛУ лежит схема, показанная на **рис. 1**. Как видно из схемы, ЛУ является комплексом различных систем. В этой работе рассматриваются вопросы, касающиеся изготовления ускоряющей структуры (УС) протонного ускорителя (поз.2 рис.1). УС протонных ЛУ различны по конструкции в зависимости от диапазона энергии, в котором они работают.

Для ускорения частиц до энергий порядка 10^2 КэВ применяются структуры с постоянным ускоряющим напряжением U . Энергия ΔW , получаемая частицей с зарядом q при прохождении разности потенциалов U ,

$$\Delta W = qU.$$

Очевидно, что величина набираемой энергии ограничена значением U , при котором отсутствует электрический пробой. Конструкция таких структур определяется обеспечением максимальной электропрочности ускоряющего промежутка.

Для получения частиц с энергией до 10^2 МэВ применяют принцип резонансного ускорения. В этом случае частица проходит последовательно ускоряющие зазоры, на которые подается переменное высокочастотное напряжение. Выходная энергия частицы есть сумма энергий, получаемых при прохождении каждого зазора. В диапазоне энергий до 10^2 МэВ ВЧ-напряжение создается в зазорах объемных СВЧ-резонаторов. Для больших энергий применяются волноводные структуры, так как для ускорения частиц с такими энергиями требуется переход на более короткую длину волны.

В предлагаемой работе рассматриваются структуры, работающие на энергии до 10^2 МэВ.

Наиболее распространенной УС в этом диапазоне энергий является структура Альвареца, работающая на частоте 100...350 МГц. Структура была предложена в конце 40-х годов прошлого века американским физиком Луисом Альварецем. Естественно, что за прошедшее время она значительно модернизирована, но принцип остался прежним (**рис. 2**).

В цилиндрический резонатор, работающий на волне E_{010} , помещаются последовательно электроды (так называемые трубки дрейфа или пролётные трубки). Трубки дрейфа являются как бы ёмкостными делителями напряжения, возникающего между входной и выходной крыш-

ками резонатора за счёт возбуждаемого электрического поля E . В промежутках между трубками дрейфа (в ускоряющих зазорах) частицы получают приращение энергии, пропорциональное напряжению на ускоряющем зазоре. При изменении фазы ВЧ-колебания на π частицы находятся внутри трубки дрейфа, «экранируясь» от действия электрического поля. При расстояниях между серединами ускоряющих зазоров

$$Ly = \beta\lambda,$$

где $\beta = \frac{V}{C}$ – относительная скорость частицы; λ – длина волны ВЧ-колебаний в резонаторе;

$\lambda = 2,61 R_{\text{резонатора}}$, частица в каждом зазоре попадает в ускоряющую фазу напряжения. Фокусировка частиц во время ускорения осуществляется магнитными линзами, размещёнными в трубках дрейфа. Наиболее распространены электромагнитные линзы, имеющие значительные размеры и требующие наличия своей системы электропитания и охлаждения.

Ускоряющая структура типа Альвареца применена в линейном ускорителе И-100 (ИФВЭ, г. Протвино, **рис. 3**). Его конструкция представляет собой резонатор с трубками дрейфа, заключенный в отдельный вакуумный кожух, который является форвакуумной камерой с давлением 0,1 мм рт. ст. Сам резонатор сварен из листовой бескислородной меди (толщиной 6 мм) и укреплен шпангоутами из нержавеющей стали. Длина ЛУ И-100 примерно 80 м, диаметр резонаторов 1,32...1,09 м [2].

Трубки дрейфа состоят из медной оболочки, внутри которой установлена магнитная линза системы фокусировки (**рис. 4**). Охлаждение производится водой, протекающей по трубкам, напаянным на корпус линзы. Трубка дрейфа цельносварная, внутри – магнитопровод и катушка, запрессованные в корпус трубки дрейфа. Медные крышки приваривают электронно-лучевой сваркой в вакууме без присадки. Апертурную трубку изготавливают из стали X18H9T и приваривают аргоно-дуговой сваркой с присадкой нержавеющей стали. Магнитные квадрупольные линзы вследствие жестких требований [2], предъявляемых к их параметрам, являются прецизионными элементами УС. Шероховатость наружной поверхности трубки дрейфа R_{max} 0,80 мкм. Концы апертурной трубки, используемые для юстировки трубки дрейфа, обрабатывают по 6-му качеству точности. Трубку дрейфа закрепляют в резонаторе с помощью штанги, которую приваривают к трубке. Через штангу подводятся электропитание и охлаждающая вода.

Для достижения прецизионной установки элементов ускоряющей и фокусирующей систем ЛУ (трубки дрейфа, резонаторы) и стабильного их положения во время эксплуатации необходимо решить ряд сложнейших задач по монтажу УС. Трубки дрейфа не должны смещаться относительно расчётных положений в продольном и поперечном направлениях более чем на 50...300 мкм. Технология изготовления и монтажа деталей и узлов рассмотренной выше УС хорошо отработана, но очень сложна и обладает рядом существенных недостатков: большие размеры ЛУ, сложность и трудоёмкость изготовления, высокая стоимость ускорителя.

В 1956 г. В.В. Владимирский рассмотрел идею фокусировки пучка в ЛУ протонов не с помощью магнитных квадрупольных линз, как в ускорителе Альвареца, а с помощью самого ускоряющего поля – высокочастотную квадрупольную (ВЧК) фокусировку. В 1960-м – 70-е годы сотрудниками ИФВЭ (г. Протвино) и ИТЭФ (г. Москва) В.А. Тепляковым и И.М. Капчинским была предложена иная идея фокусировки ВЧ-полем. Она была доведена до практического применения. Был создан ряд ускорителей, работающих в диапазоне энергий до 30 МэВ, в которых применяется ВЧК-фокусировка. Она осуществляется с помощью электродов специальной формы, создающих ВЧ-электрические поля с квадрупольной симметрией, реализующих жёсткую фокусировку. Эта же система электродов обеспечивает, кроме фокусировки, и эффективное ускорение.

Опыт, накопленный при создании первых ускорителей с ВЧК-фокусировкой в ИФВЭ, привёл к созданию ЛУ на 30 МэВ. Он получил название УРАЛ-30 (Ускоритель резонансный автофокусирующий линейный на энергию 30 МэВ).

Структуры с ВЧК-фокусировкой подразделяются на структуру с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), работающую в диапазоне энергий от сотен КэВ до единиц МэВ, и структуру с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ), работающей в диапазоне энергий от единиц МэВ до десятков МэВ. Такое различие обусловлено особенностями динамики частиц.

Структура с ПОКФ обычно применяется как начальная часть ускорителя (НЧУ) как для ускорителя Альвареса, так и для ускорителя с ППКФ. Структура с ПОКФ обеспечивает 100%-й захват частиц, поступающих из ионного источника, их фокусировку, продольную группировку и ускорение. Применяется в настоящее время практически во всех ускорителях как в России, так и за рубежом, в том числе и в НЧУ УРАЛ-30, изображённой на **рис. 5** и **6**.

Функции структуры реализуются за счёт электродов специальной формы, выполненных из бескислородной меди (рис. 5). Рабочая часть электрода имеет форму тела вращения. Электрод крепится к резонатору с помощью ножки. Ножки первоначально соединялись с электродами с помощью галлия. Монтаж электродов на резонаторе производился на специальном стенде, где с помощью точно перемещающейся каретки, электроды устанавливались в отверстия кронштейнов, закреплённых на бортовых плоскостях резонаторов, после чего положение ножек фиксировалось сплавом Вуда [3] (**рис. 7**, вариант А). Недостатком такого способа были: низкая надёжность соединения ввиду наличия легкоплавкого элемента, нестабильность галлиевого соединения и низкая точность из-за тепловых деформаций при заливке сплава Вуда и коробление при одновременном затвердевании сплава в зазоре.

Для устранения недостатков этот узел подвергся модернизации. Рабочая часть электрода имеет, как и прежде, форму тела вращения, а ножки новой конструкции приобрели коническую форму. Соединение ножек с рабочей частью выполнено с помощью лазерной сварки. Ножки крепятся к установочным плоскостям резонатора винтами (рис. 7, вариант Б). Точность установки электродов в горизонтальной и вертикальной плоскостях $\pm 0,03$ мм. Такая конструкция упрощала монтаж электродов и повышала точность расположения рабочих поверхностей электродов. Однако в процессе работы были выявлены следующие недостатки:

- неравномерное распределение напряжённости электрического поля;
- наличие сварного соединения ножки и рабочей поверхности;
- ломаный профиль рабочей поверхности электрода.

Для создания напряжения с квадрупольной симметрией на электродах применяются так называемые 2Н-резонаторы (резонаторы с продольным магнитным полем) (рис. 6). Резонаторы изготавливались из стандартной стальной горячекатаной трубы. После механической обработки поверхность раскатывают стальным шариком для устранения следов обработки. Затем резонатор покрывается гальваническим способом медью толщиной 100 мкм. Длина резонаторов 600...800 мм. Каждый состоит из трех частей, которые соединяются между собой с помощью болтов. Каждая секция резонатора имеет отверстия для протока охлаждающей воды. Недостатки конструкции: малая коррозионная стойкость, большое количество уплотнений, недостаточная жёсткость конструкции, большая трудоёмкость в изготовлении.

Следствием недостатков является нестабильность геометрических размеров, нарушение протока в каналах охлаждения, возможный прорыв этих каналов в вакуумный объём.

После НЧУ (структуры с ПОКФ) частицы поступают в основную часть ускорителя (ОЧУ, структуры с ППКФ). В структуре с ППКФ для обеспечения фокусировки и ускорения В.А.Тепляковым было предложено ввести в каждый ускоряющий зазор дополнительный промежуточный электрод с нулевым потенциалом, и одну половину зазора сделать ускоряюще-фокусирующей (с «рогами»), а вторую – чисто ускоряющей (**рис. 8**). Промежуточный электрод крепится к поверхности резонатора с помощью ножки (**рис. 9**). При этом оказалось возможным

получить практически такой же темп ускорения, как и в ускорителе Альвареца. В отличие от УС Альвареца, длина периода ускорения в УС с ВЧК-фокусировкой $L = \frac{\beta\lambda}{2}$.

Ускоряющие электроды вначале изготавливались по частям из бескислородной меди на токарных станках с заданной точностью. Расточные станки используются для обработки апертуры и отверстий под «рога». Затем часть электродов собирают, предварительно покрыв посадочные места галлием. Собранные электроды запекают при температуре 70°C в течение 14 часов. Затем проводят правку «рогов» электродов относительно оси [4].

Для создания напряжения на периодах ускорения применяется резонатор с продольным магнитным полем – Н-резонатор (рис. 9), конструкция которого аналогична резонатору, входящему в УС с ПОКФ. Технология изготовления Н-резонатора совпадает с технологией, применяемой в изготовлении 2Н-резонатора. Требования к материалам заготовки, к точности механической обработки, гальваническому покрытию полностью совпадают. Но и недостатки являются общими для обеих конструкций.

Резонаторы структур с ПОКФ и ППКФ помещаются в контейнер, который, с одной стороны, является экраном, препятствующим излучению электромагнитной энергии в пространство, т.е. является элементом резонансной системы, а с другой стороны, выступает в роли вакуумного кожуха, обеспечивающий нахождение УС в вакууме не хуже 10^{-6} мм рт.ст. (рис.6 и 9).

По сравнению с ускорителем Альвареца ускорители с ВЧК-фокусировкой имеют меньшие размеры поперечного сечения, более просты в изготовлении. В таких ускорителях не требуется специальной системы электропитания и охлаждения фокусирующих элементов. Для сравнения трудоёмкости и цены этих двух систем ускорения можно привести следующее замечание: при создании ЛУ Альвареца, работающего ныне в ИФВЭ (И-100), было задействовано много промышленных организаций и научных центров всего Советского Союза, а новый ускоритель с ВЧК-фокусировкой УРАЛ-30 был построен силами ИФВЭ.

К основным недостаткам существующего ускорителя с ВЧК-фокусировкой УРАЛ-30 можно отнести следующее:

- падение темпа ускорения с ростом энергии частиц, так как напряжение подаваемое на ускоряющие и фокусирующие зазоры было постоянным по всей длине УС. Как видно из формулы,

$$\Delta W = \frac{qU}{\beta\lambda/2},$$

где ΔW – темп ускорения; U – напряжение; q – заряд частиц; $\beta\lambda/2$ – период ускорения, темп ускорения обратно пропорционален длине периода ускорения и, следовательно, при постоянном напряжении темп ускорения падает с увеличением энергии частиц;

- уменьшение электрической прочности УС вследствие осаждения на электродах компонентов сплава Вуда и галлия, применённых в конструкции электрода структуры с ППКФ;
- электроды НЧУ, имеющие в поперечном сечении круглую форму, не обеспечивают требующуюся линейность фокусирующих сил.

Кроме того, существующий ускоритель проработал более 20 лет, что привело к его физическому износу.

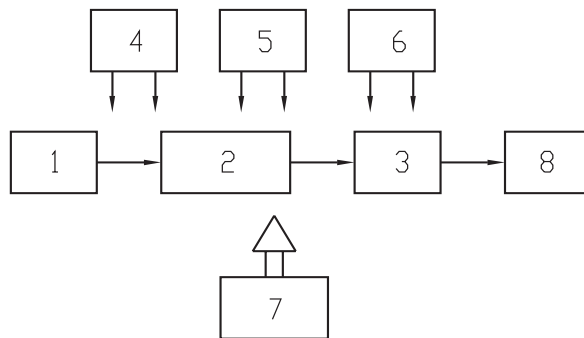


Рис. 1. Структурная схема линейного ускорителя.

1 – источник протонов; 2 – ускоряющая структура; 3 – система вывода и диагностики пучка; 4 – система энергоснабжения; 5 – вакуумная система; 6 – система охлаждения; 7 – система контроля и управления ускорителем; 8 – потребитель.

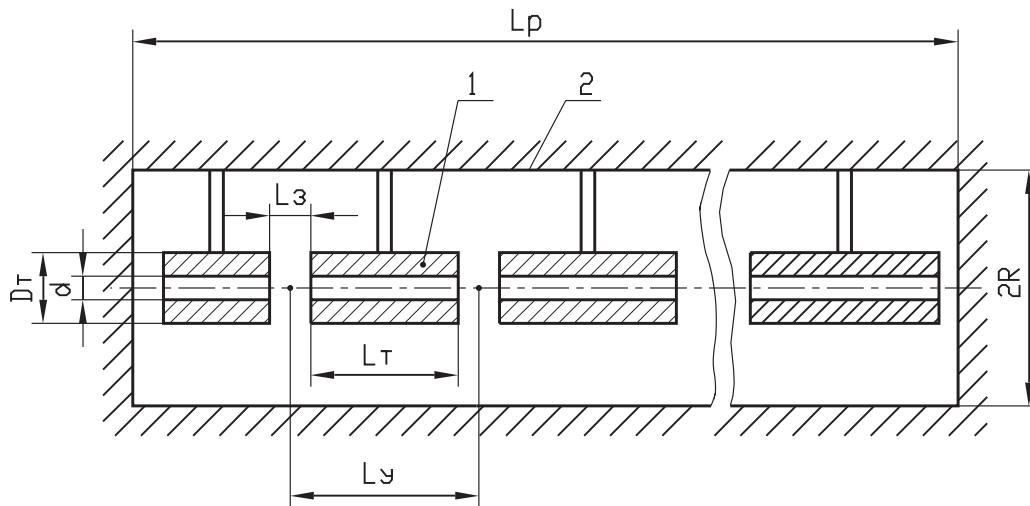


Рис. 2. Ускоряющая структура с трубками дрейфа.

1 – резонатор; 2 – трубка дрейфа; L_p – длина резонатора; L_t – длина трубки дрейфа; L_z – ускоряющий зазор; L_y – расстояние между серединами ускоряющих зазоров; D – диаметр резонатора; D_t – диаметр трубки дрейфа; d – диаметр отверстия трубки дрейфа.

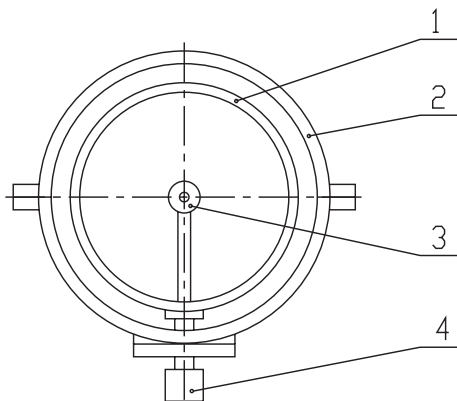


Рис. 3. Поперечный разрез линейного ускорителя И-100.

1 – резонатор; 2 – форвакуумный кожух; 3 – трубка дрейфа; 4 – механизмы юстировки.

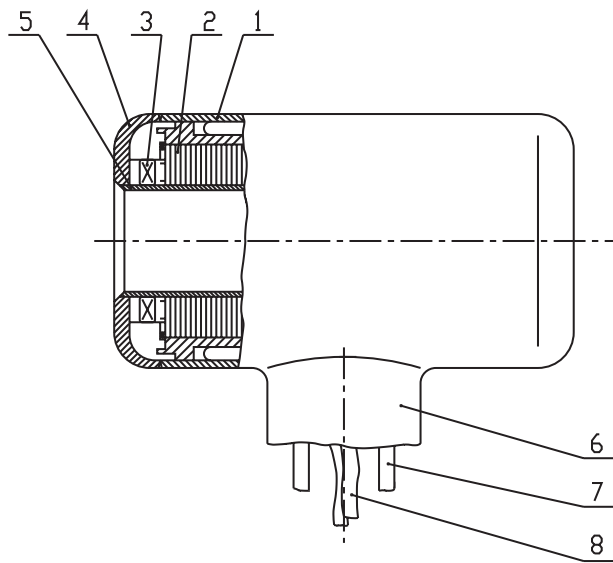


Рис. 4. Трубка дрейфа ускорителя И-100.
 1 – корпус; 2 – магнитопровод; 3 – катушка; 4 – крышка; 5 – апертурная трубка; 6 – штанга; 7 – подвод воды; 8 – подвод электропитания.

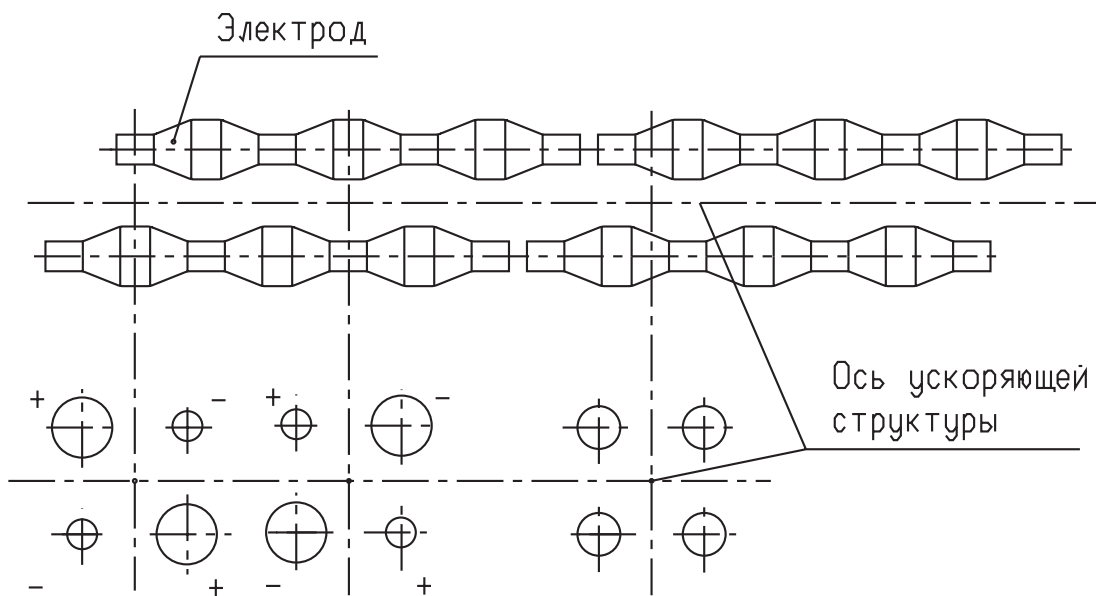


Рис. 5. Структура с ПДФ НЧУ УРАЛ-30.

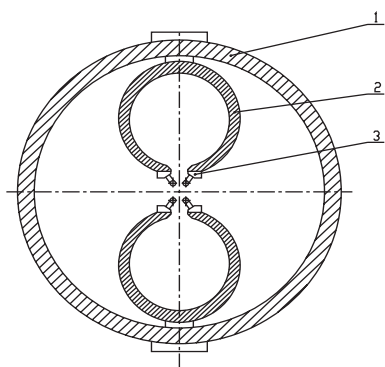
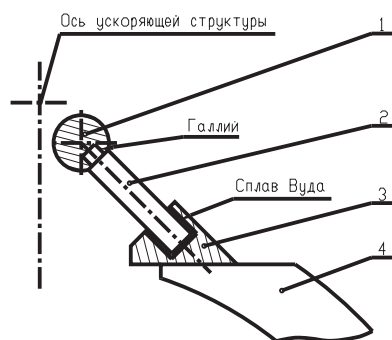
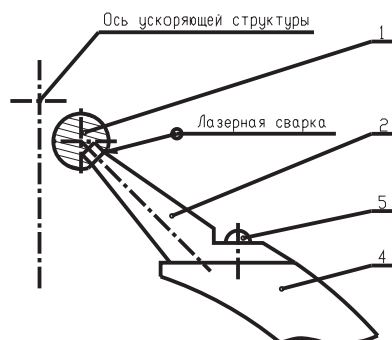


Рис. 6. Поперечное сечение ПОКФ НЧУ УРАЛ-30.
1 – контейнер; 2 – 2Н-резонатор;
3 – электроды структуры с ПОКФ.



Вариант А.



Вариант Б.

Рис. 7. Крепление электрода НЧУ на резонатор.
1 – электрод; 2 – ножка; 3 – кронштейн;
4 – резонатор; 5 – винт.

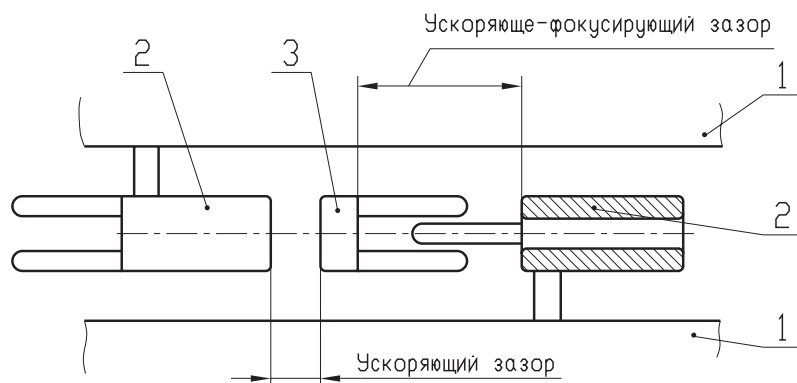
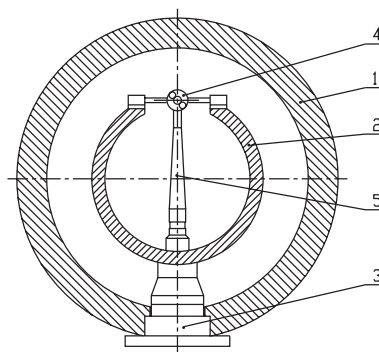


Рис. 8. Структура с ППКФ. 1 – резонатор; 2 – трубки дрейфа; 3 – промежуточный электрод с нулевым потенциалом.

Рис. 9. Поперечное сечение ОЧУ УРАЛ-30.
 1 – контейнер; 2 – Н-резонатор; 3 – узел крепления резонатора; 4 – электроды структуры с ППКФ; 5 – ноги крепления промежуточных электродов.



В настоящий момент в ИФВЭ создаётся новый линейный ускоритель протонов УРАЛ-30М, в котором приняты меры по устранению указанных недостатков. Реализация этих мер требует решения ряда технологических и конструкторских задач:

- предотвращение падения темпа ускорения приводит к установке ноги крепления промежуточного электрода под углом, что требует применения нового типа резонатора – секторного или двухкамерного, для которого необходимо разработать конструкцию и технологию;
- устранение соединений с применением галлия и сплава Вуда приводит к необходимости разработки технологии точного изготовления и монтажа электродов;
- изготовление электродов НЧУ с параболической формой поперечного сечения, обеспечивающей линейность фокусирующих сил, требует разработки соответствующей технологии с применением станков с ЧПУ;
- изменение вида применяемых резонаторов, способов изготовления и формы электродов приводит к необходимости разработки технологии точной сборки и монтажа ускоряющих структур.

На решение перечисленных вопросов будет направлена дальнейшая работа.

Список литературы

1. Гольдин Л.Л. Физика ускорителей. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 144 с.
2. Мурин Б.П. Линейные ускорители ионов. Т.2. Основные системы. Под. ред. Б.П. Мурина. – М.: Атомиздат, 1978. 320 с.
3. Повышение надёжности ускоряющего канала НЧУ-0,7И: Отчёт по НИР (заключительный) / ИФВЭ; В.П. Попов, В.В. Евсеев, А.В. Сухоруких, О.В. Ершов. Инв. № И/3710. – Серпухов, 1984. 27 с.
4. Разработка и создание ускорителя УРАЛ-30: Отчёт по теме НИР 264-АН-И-6 (заключительный) / ИФВЭ; Руководитель В.А. Тепляков. – Рег. № У21547. – Серпухов, 1977. 175 с.

Рукопись поступила 15 ноября 2004 г.

С.Р. Салахутдинов, А.А. Тимофеев.
Конструктивные и технологические особенности изготовления ускоряющей структуры линейного ускорителя протонов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой.

Редактор Н.В. Ежела.
Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.

Подписано к печати	16.11.2004.	Формат	60 × 84/8.	Офсетная печать					
Печ.л.	1.	Уч.– изд.л.	0,8.	Тираж	130.	Заказ	335.	Индекс	3649.
ЛР №020498 от 17.04.97.									

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142280, Протвино Московской обл.

