

## ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

*О. К. Беляев<sup>а</sup>, Ю. А. Буданов<sup>а</sup>, И. А. Звонарёв<sup>а</sup>, С. В. Иванов<sup>а</sup>,  
В. Г. Кудрявцев<sup>а</sup>, Е. В. Мазуров<sup>а</sup>, А. П. Мальцев<sup>а,1</sup>, А. А. Тимофеев<sup>а</sup>,  
В. В. Кобец<sup>б</sup>, И. Н. Мешков<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

На основании результатов работ по проекту NICA/MPD (ОИЯИ, Дубна) показана возможность создания линейного ускорителя тяжелых ионов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой как в начальной части, так и в основной части ускорителя. Представлены параметры линейного ускорителя ионов  $^{197}\text{Au}^{31+}$ . Особое внимание уделено техническим вопросам расчета, конструирования, изготовления и настройки ускорителя.

On the base of NICA/MPD (JINR, Dubna) project design results it is demonstrated that the heavy ion linear accelerator consisting of the RFQ input part and RFQ DTL main part can be created. The  $^{197}\text{Au}^{31+}$  linear accelerator parameters are presented. The technical questions of accelerator calculation, design, making and tuning are considered.

PACS: 29.20.Ej

### ВВЕДЕНИЕ

Главное различие между линейными ускорителями тяжелых ионов (ЛУТИ) и протонными линейными ускорителями заключается в том, что скорость тяжелых ионов в каналах ускорения значительно меньше, чем у протонов. Это вынуждает применять в ЛУТИ резонаторы с более низкой рабочей частотой. Кроме того, при низкой скорости ионов снижается эффективность работы магнитных фокусирующих линз. В этой области скоростей лучше, чем магнитная, работает электрическая фокусировка. К такому типу фокусировки относится высокочастотная квадрупольная (ВЧК) фокусировка.

Вариант ВЧК-фокусировки — пространственно-однородная квадрупольная фокусировка (ПОКФ, или в западной терминологии RFQ) сейчас используется в начальной части ускорителя (НЧУ) практически во всех ЛУТИ. А для фокусировки в основной части ускорителя (ОЧУ) по-прежнему применяются различные структуры с использованием магнитных линз, например [1].

На примере ЛУТИ для проекта NICA/MPD в работе рассматривается возможность применения ВЧК-фокусировки в ЛУТИ не только в НЧУ, но и в ОЧУ, где предлагается

---

<sup>1</sup>E-mail: maltsev@mail.ihep.ru

использовать структуру с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ, или в западной терминологии RFQ DTL) [2, 3].

Структуры с ПОКФ и ППКФ впервые в мире были разработаны и реализованы в ИФВЭ на протонном линейном ускорителе УРАЛ-30 — инжекторе в бустер ускорителя У-70.

## 1. ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ

Линейный ускоритель для проекта NICA/MPD должен иметь следующие параметры:

- сорт ускоряемых ионов — золото  $^{197}\text{Au}^{31+}$ ;
- отношение заряда к массе — 0,157;
- энергия инжекции — 32,5 кэВ/нуклон;
- конечная энергия — 3,69 МэВ/нуклон;
- полная длина ускорителя — не более 25 м;
- среднеквадратичный относительный разброс выходной энергии  $\leq 2 \cdot 10^{-3}$ ;
- рабочая частота — 74,25 МГц;
- импульсный ток — 5–10 мА;
- длительность импульса тока — 10 мкс;
- длительность ВЧ-импульса — до 80 мкс;
- частота повторения импульсов — до 10 Гц.

## 2. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

В НЧУ обсуждаемого ускорителя предлагается применить известную ускоряющую структуру с ПОКФ (RFQ). Ускоряющая структура с ПОКФ обеспечивает высокий коэффициент захвата пучка при низкой энергии инжекции. В канале НЧУ происходит группировка пучка и его ускорение до энергии, приемлемой для перехода в ОЧУ. Электроды НЧУ представляют собой четырехпроводную линию с изменяющимся по длине расстоянием от оси до поверхности электродов (рис. 1). Электроды устанавливаются в двойном Н-резонаторе [4] (рис. 2).

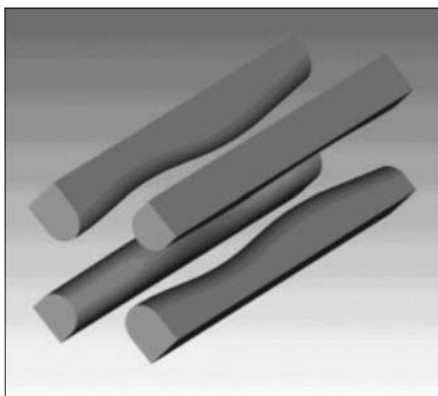


Рис. 1. Электроды структуры с ПОКФ

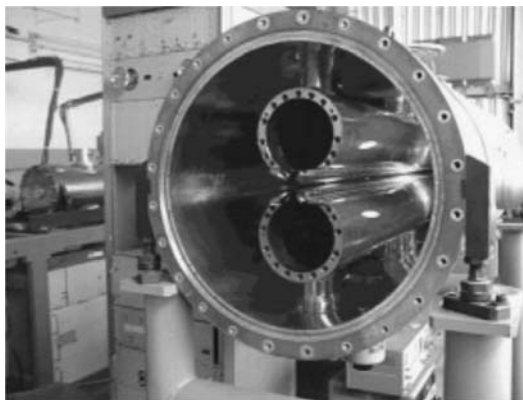


Рис. 2. Поперечное сечение 2Н-резонатора

Главная задача при выборе физических параметров НЧУ заключалась в том, чтобы получить заданные характеристики пучка ускоренных частиц при соблюдении ограничений, накладываемых технологическими требованиями и электрической прочностью канала ускорения. Процесс формирования сгустка регулировался путем подбора функций

$\varphi(n)$  и  $\vartheta(n)$ , где  $\varphi$  — равновесная фаза,  $\vartheta$  — эффективность ускорения,  $n$  — номер периода ускорения.

Для моделирования динамики частиц на входе в НЧУ был взят аксиально-симметричный пучок с нормализованным эмиттансом, равным  $0,42 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . Это в шесть раз больше предполагаемого rms эмиттанса источника [5], что гарантирует учет всех частиц пучка. При моделировании ориентация и форма фазового портрета пучка подбирались так, чтобы получить наименьший рост эмиттанса при ускорении.

Величины расчетных физических параметров НЧУ приведены в табл. 1, результаты моделирования показаны на рис. 3 и 4.

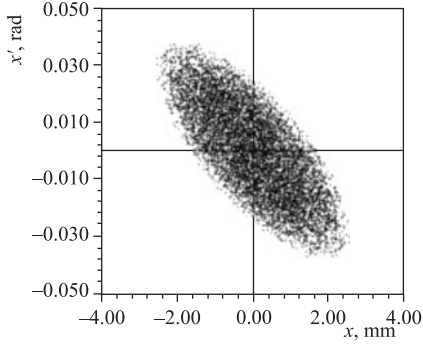


Рис. 3. Пучок на входе НЧУ

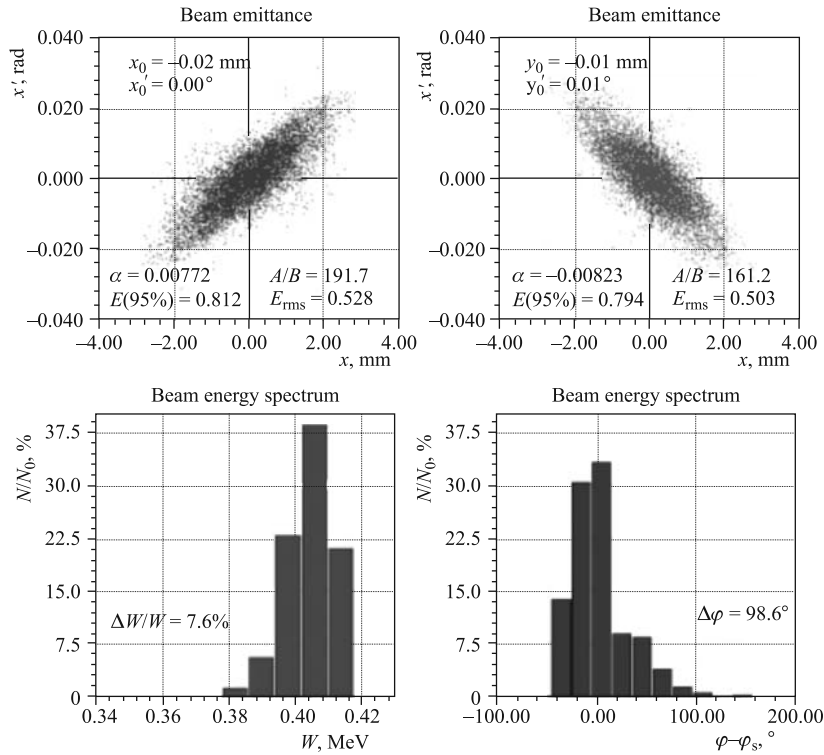


Рис. 4. Пучок на выходе НЧУ,  $I = 5 \text{ мА}$

2Н-резонатор (рис.2) состоит из резонирующих камер, расположенных вдоль оси цилиндрического контейнера. Камеры представляют собой две трубы, разрезанные по образующей и закрепленные в контейнере так, что края щелей в поперечном сечении имеют квадрупольную симметрию. На краях щелей находятся волнообразные электроды структуры с ПОКФ (рис. 1). В поперечном сечении 2Н-резонатора обеспечивается квадрупольное распределение потенциалов на электродах. Магнитные поля в резонирующих камерах направлены в одну сторону и замыкаются в пространстве между камерами и контейнером. Основные электрические и геометрические параметры 2Н-резонатора с электродами структуры с ПОКФ для обсуждаемого ускорителя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные физические параметры НЧУ

Параметр и единица измерения	Величина
Сорт ускоряемых ионов	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Энергия инъекции $W_{in}$ , кэВ/нуклон	32,5
Выходная энергия $W_{out}$ , кэВ/нуклон	407,1
Номинальная амплитуда напряжения в резонаторе $U_0$ , кВ	96
Напряженность электрического поля на электродах $E_{max}$ , кВ/см	207
Ширина спектра энергий (на уровне 0,1 от основания) $\Delta W/W_{out},\%$	$\approx 7,6$
Фазовая ширина (на уровне 0,1 от основания спектра фаз) $(\Delta\varphi)_{out},^\circ$	$\approx 99$
Равновесная фаза $\varphi_s,^\circ$	$-(89-27,1)$
Коэффициент захвата $\kappa, \%$	98
Эффективность ускорения $\vartheta$	0,024–0,380
Частота малых продольных колебаний $\Omega/\omega$	0,043–0,032
Набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки $\mu$	0,77
Минимальная частота поперечных колебаний $\nu_{min}$	0,54
Максимальная частота поперечных колебаний $\nu_{max}$	1,1
Акцептанс (ненормализованный) $A, \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	94
Нормализованный эмиттанс 95 % пучка ( $I = 5 \text{ mA}$ ) $\epsilon, \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	0,803
Суммарная длина электродов канала (без согласователя) $L, \text{мм}$	6747,48
Длина согласователя $L_s, \text{мм}$	151,83
Диаметр апертуры $(2R_{min})_{out}, \text{мм}$	9,14
Средний радиус канала $R_0, \text{мм}$	6,4
Толщина электрода $T_e, \text{мм}$	10,2
Глубина модуляции электродов $R_{max}/R_{min}$	1,04–1,72
Число периодов ускорения $N_a, \text{мм}$	230
Длина периода ускорения $L_a, \text{мм}$	16,87–59,51
Длина контейнера $L_k, \text{мм}$	6915,31
Расстояние между электродами и торцевыми стенками $L_t, \text{мм}$	8
Внутренний диаметр контейнера $D_k, \text{мм}$	850
Внешний диаметр резонирующих камер $D, \text{мм}$	350
Толщина стенок резонирующих камер, мм	25
Толщина торцевых стенок контейнера $l_k, \text{мм}$	60
Диаметр отверстия в торцах контейнера $d_k, \text{мм}$	20
Мощность ВЧ-потерь в НЧУ $P_s, \text{кВт}$	110,6
Собственная добротность резонатора $Q_0$	19850

Распределение фокусирующей компоненты электрического поля на оси ускоряюще-фокусирующего канала со среднеквадратичным отклонением  $\leq 1\%$  от требуемого равномерного распределения достигается в процессе радиотехнической настройки путем локального изменения погонной емкостной нагрузки или изменения геометрических размеров торцевых областей [6].

Ближайшим к рабочему типом колебаний в 2Н-резонаторе является колебание, имеющее вариацию продольного магнитного поля по длине резонатора: примерно на середине резонатора направление продольного магнитного поля меняется на противоположное. Частота этого колебания выше рабочей частоты и зависит от соотношения длины резонатора  $L$  и длины волны рабочей частоты  $\lambda$ . При  $L/\lambda < 2,5$  относительная частотная расстройка более 1%, и такое колебание не оказывает влияния на рабочее. Расчетная длина НЧУ рассматриваемого ускорителя соответствует указанному ограничению ( $L/\lambda = 1,73$ ). Конструкция 2Н-резонатора позволяет проводить установку электродов на резонирующие камеры вне контейнера, что значительно упрощает процесс сборки и повышает точность установки электродов. Установка резонирующих камер с электродами в контейнер контролируется оптическими методами.

Для основной части ускорителя (ОЧУ) предлагается использовать структуру с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой. Альтернативой структуре с ППКФ может быть структура [1] либо структура Альвареца [7] с магнитными фокусирующими линзами. Однако, принимая во внимание фокусировку электрическим полем в структуре с ППКФ, большое эффективное шунтовое сопротивление структуры при низких скоростях ионов, ее технологическую простоту, малые габариты и достаточно низкую стоимость, можно сделать вывод о возможности использования структуры с ППКФ.

В структуре с ППКФ период ускорения состоит из ускоряющего и фокусирующего зазоров, разделенных промежуточным электродом (рис. 5). ВЧ-напряжение на электродах обсуждаемого ускорителя создается с помощью секторного резонатора (рис. 6), для которого система электродов является емкостной нагрузкой.

Ускоряющий зазор образован торцом трубки дрейфа и плоской частью промежуточного электрода. Фокусирующий зазор образован «рогами» на промежуточном электроде и на торце другой трубки дрейфа. Потенциалы трубок дрейфа противоположны по знаку.



Рис. 5. Электроды структуры с ППКФ

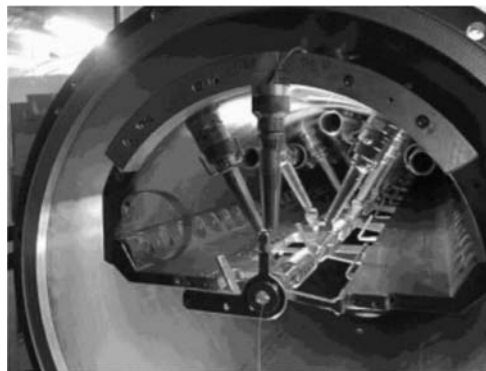


Рис. 6. Поперечное сечение секторного (SH) резонатора

Потенциал промежуточного электрода задается требованиями динамики частиц и определяется соотношением емкостей ускоряющего и фокусирующего зазоров. Равенство этих емкостей приводит к равенству напряжений на ускоряющем и фокусирующем зазорах и нулевому потенциалу промежуточного электрода. В этом случае при постоянстве напряжений на периоде ускорения темп ускорения падает по мере роста скорости частиц. Увеличение напряжения на ускоряющих зазорах пропорционально  $\beta$  при постоянном напряжении на фокусирующих зазорах позволяет скомпенсировать уменьшение темпа ускорения [8]. При этом потенциал промежуточного электрода меняется по длине ускорителя. Такое деление напряжений реализуется в предлагаемой структуре.

Расчет параметров ОЧУ проводился по двум независимым программам. Одна из них (убыстренная) работала в одночастичном приближении и использовалась для расчета вариантов геометрических размеров ускоряюще-фокусирующего канала. С помощью другой программы проводилось моделирование динамики частиц с учетом сил пространственного заряда.

Расчет геометрии канала проводился методом итераций. Подбирались: радиус апертуры, напряжение на периоде ускорения, напряжение на квадрупольном зазоре, равновесная фаза, диаметр рогов и их длина, длины зазоров и электродов. Критерием выбора было достижение нужных параметров ускорения и фокусировки при заданных ограничениях.

В процессе итераций высокочастотное электромагнитное поле внутри апертуры канала представлялось в электростатическом приближении в виде ряда Фурье–Бесселя. Методом Монте-Карло [9] рассчитывалось распределение потенциала на образующих апертуры. Определялись продольные гармоники ускоряющих и фокусирующих компонент поля (128 гармоник). Затем рассчитывались параметры ускорения: положение электрического центра, эффективность ускорения  $\vartheta$  и темп ускорения  $dW/dz$ .

Параметры поперечного движения  $\mu$ ,  $\nu_{\min}$  и  $\nu_{\max}$  определялись матричным методом. Рассчитывалось продольное распределение градиентов фокусирующих компонент поля. Период фокусировки ( $2\beta\lambda$ ) разбивался на большое число промежутков (400), так чтобы каждый такой промежуток можно было считать тонкой линзой. После перемножения матриц тонких линз рассчитывались  $\mu$ ,  $\nu_{\min}$  и  $\nu_{\max}$ . При этом контролировалась величина максимальной напряженности поля  $E_{\max}$  в критических точках на поверхности электродов.

Из опыта эксплуатации структур с ППКФ в ИФВЭ следует, что при максимальной напряженности электрического поля на поверхности электродов до  $2,9E_K$  ( $E_K$  — критерий Килпатрика [10]) при импульсном режиме работы ускорителя процент простоев, связанных с пробоями, не превышает 0,02% [11]. В рассматриваемом ускорителе напряженность не превышает  $2,8E_K$ .

После подбора оптимального соотношения параметров первого регулярного ускоряющего периода на входе ускорителя описанная процедура повторялась для ряда значений энергии на протяжении резонатора. При этом основные параметры канала (равновесная фаза, радиус апертуры, диаметр рогов, напряжение на квадрупольном зазоре, длина квадрупольного зазора, минимальная частота поперечных колебаний) оставались фиксированными. Варьировались: напряжение на ускоряющем зазоре, длина ускоряющего зазора и длина рогов. Параметры периода подбирались так, чтобы заданная частота  $\nu_{\min}$  получалась с точностью до четвертого знака после запятой.

Рост напряжения на ускоряющих периодах вдоль резонатора задавался таким, чтобы превышение напряжения на выходном периоде над напряжением на входном периоде

было не более 30%. В промежуточных точках по энергии параметры периодов ускорения интерполировались с помощью библиотечной программы сплайн-интерполяции.

В результате были получены зависимости от энергии (от скорости) таких величин как: длина рогов, длина аксиально-симметричного зазора, напряжение на периоде ускорения, эффективность ускорения и темп ускорения. По этим зависимостям затем были рассчитаны методом итераций параметры всех периодов ускорения регулярной части канала.

Входной и выходной периоды канала отличаются по структуре от периодов регулярной части: введена экранировка поля в зазорах от влияния фланцев контейнера. Процедура расчета параметров входного и выходного периодов аналогична описанной выше, но для них были написаны специальные программы расчета граничных условий.

На первом этапе расчета динамики пучка в ОЧУ определялись сепаратриса и аксептанс первой секции С1 ОЧУ. Затем проводилось согласование пучка из НЧУ с полученными фигурами сепаратрисы и аксептанса. Для этого был рассчитан канал согласования между НЧУ и ОЧУ, состоящий из банчера, трех магнитных квадрупольей и двух корректирующих дипольных линз. Особенностью избранной схемы согласования было использование «раструба» на десяти выходных периодах НЧУ, на которых средний радиус канала НЧУ увеличивался вдоль оси  $z$  по определенному закону.

После подбора параметров согласующего канала проводилось численное моделирование динамики частиц в секциях ОЧУ.

Результаты расчета физических параметров секций ОЧУ сведены в табл. 2. Результаты моделирования представлены на рис. 7.

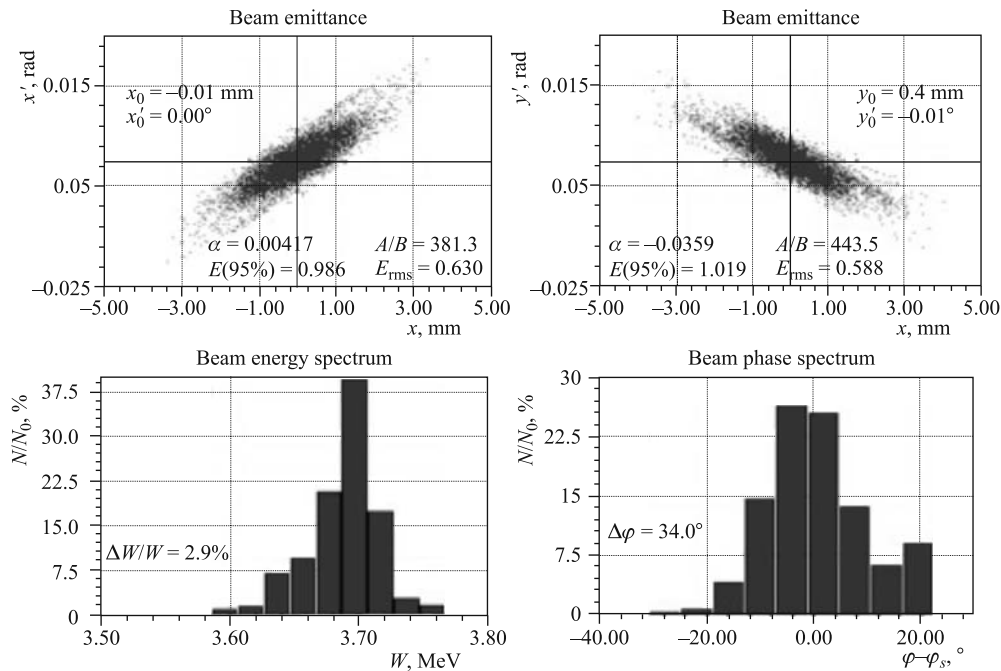


Рис. 7. Пучок на выходе ускорителя,  $I = 5$  мА

Таблица 2. Расчетные физические параметры секций С1 и С2 ОЧУ

Параметр и единица измерения	Величина в С1 ОЧУ	Величина в С2 ОЧУ
Энергия инъекции $W_{in}$ , МэВ/нуклон	0,4071	2,012
Выходная энергия $W_{out}$ , МэВ/нуклон	2,012	3,691
Напряжение на резонаторе $U$ , кВ	192,6–247,5	309,4–352,3
Напряжение на ускоряющем зазоре $U_a$ , кВ	119,6–174,5	213,4–256,3
Напряжение на фокусирующем зазоре $U_q$ , кВ	73	96
Максимальная напряженность поля на электродах $E_{max}$ , кВ/см	280	297
Ширина спектра энергий ( $I = 5$ мА) $\Delta W/W_{out}$ , %	5,1	2,9
Фазовая ширина сгустка ( $I = 5$ мА) $(\Delta\varphi)_{out}$ , °	35,9	34
Равновесная фаза $\varphi_s$ , °	-37	-30
Коэффициент захвата $\kappa$ , %	100	100
Эффективность ускорения $\vartheta$	0,656–0,816	0,792–0,806
Частота малых продольных колебаний $\Omega/\omega$	0,07–0,04	0,04–0,03
Число периодов ускорения $N_a$	73	46
Структура фокусировки	ФФДД	ФФДД
Набег фазы поперечных колебаний на периоде фокусировки $\mu$	1,07–0,901	0,823–0,886
Минимальная частота поперечных колебаний $\nu_{min}$	0,6	0,6
Максимальная частота поперечных колебаний $\nu_{max}$	1,7	1,7
Нормализованный аксептанс канала $A$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	2,3	2,3
Нормализованный эмиттанс 95 % пучка ( $I = 5$ мА) $\epsilon_{out}$ , $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	1	1
Диаметр апертуры $2R_a$ , мм	12	12
Длина бортового электрода $l_e$ , мм	10,21–48,10	41,07–53,63
Длина промежуточного электрода в регулярной части $l_{ie}$ , мм	11	13
Длина промежуточного электрода во входном периоде $(l_{ie})_{in}$ , мм	5,5	10
Длина промежуточного электрода в выходном периоде $(l_{ie})_{out}$ , мм	11	13
Длина экранного электрода на входе канала $(l_{ek})_{in}$ , мм	3,5	7
Длина экранного электрода на выходе канала $(l_{ek})_{out}$ , мм	10	7
Зазор между экраным электродом и фланцем $l_t$ , мм	8	8
Длина рога $l_h$ , мм	20,30–55,53	45,70–86,83
Диаметр рога $d_h$ , мм	10	12
Длина ускоряющего зазора $l_a$ , мм	6,5–11,74	15–18,17
Длина зазора между рогом и торцом электрода $l_q$ , мм	7	12
Внешний диаметр бортовых электродов $d_e$ , мм	32	36
Внешний диаметр промежуточных электродов $d_{ie}$ , мм	52	52
Радиус скругления кромок электродов $\rho_k$ , мм	1,5	1,5
Радиус скругления торца бортового электрода $\rho_0$ , мм	5	6
Длина контейнеров $l_s$ , мм	7163,02	7174,5
Толщина торцовых стенок контейнера $l_k$ , мм	60	60
Диаметр отверстия во фланцах контейнера $d_k$ , мм	20	20
Внутренний диаметр контейнера $d_k$ , мм	850	850
Внутренний диаметр резонирующей камеры $d_r$ , мм	650	650
Толщина стенки резонирующей камеры $h$ , мм	30	30
Мощность потерь в ОЧУ $P_s$ , кВт	157,6	395
Собственная добротность резонатора $Q_0$	15807	17100



ВЧ-напряжение на электродах структуры создается с помощью резонаторов, свойства которых должны соответствовать требованиям к распределению напряжений на системе электродов. В рассматриваемой ускоряющей структуре необходимо обеспечить рост напряжений на ускоряющих зазорах по длине ускорителя при постоянных напряжениях на фокусирующих зазорах. Такое соотношение напряжений достигается настройкой емкостей ускоряющего и фокусирующего зазоров и углом установки ноги крепления промежуточного электрода. Обязательным условием установки ноги является ортогональность электрических силовых линий поля резонатора к оси ноги. Это условие выполняется для резонатора с продольным магнитным полем, у которого поперечное сечение резонирующей камеры имеет секторную форму, а ось ускоряющей структуры совмещена с вершиной сектора (SH-резонатор, рис. 4) [12]. При установке резонатора ось структуры совмещается с осью контейнера. Electroды ускоряющей структуры (трубки дрейфа) устанавливаются на края щели, образованной диаметрально-противоположными полуплоскостями с центральным углом  $180^\circ$ . Как и в структуре НЧУ, установка электродов структуры ОЧУ на резонаторы производится вне контейнера, что позволяет обеспечить требуемую точность сборки.

В табл. 2 приведены основные параметры ускоряющей структуры с ППКФ и нарастающим ускоряющим напряжением на SH-резонаторе для рассматриваемого ускорителя. Для обеспечения требуемых параметров разработана методика расчета коэффициентов деления напряжений, углов установки ноги, настроечных характеристик элементов подстройки [13]. Мешающее влияние второй моды продольного магнитного поля устраняется путем ограничения длины резонатора, как и в случае структуры с ПОКФ на 2Н-резонаторе. Наиболее опасным мешающим типом колебания в структуре с ППКФ на SH-резонаторе является так называемый резонанс ноги [14], характеризующийся протеканием тока по ноге крепления промежуточного электрода и искажающий соотношение напряжений в ускоряющем и фокусирующем зазорах. Влияние такого мешающего резонанса устраняется путем включения в ногу промежуточного электрода реактивного сопротивления [14, 15]. При емкостном характере сопротивления ноги частота этого резонанса всегда выше частоты рабочего колебания. На основании этого результата в работе [15] показана возможность водяного охлаждения ноги промежуточного электрода при работе ускорителя в режиме малой скважности ( $\approx 100$ ).

Согласно требованиям динамики частиц в структурах с ПОКФ и ППКФ устанавливаются следующие среднеквадратичные допуски на погрешности параметров канала: погрешность продольных размеров периода ускорения  $\leq 0,06\%$  (в долях  $\beta\lambda$ ); отклонения поперечных размеров канала от штатных значений  $\leq 50$  мкм; погрешность азимутального положения медианных плоскостей, проходящих через фокусирующие электроды с одинаковым потенциалом  $\leq 30'$ ; среднеквадратичное отклонение фокусирующей компоненты поля по длине структуры на оси канала от требуемого равномерного распределения  $\leq 1\%$ ; допуск на уровень ВЧ-поля в секции  $1\%$ .

В качестве материала для контейнеров и резонаторов выбран алюминиевый сплав АМгб, опробованный в ряде ускорительных установок, созданных в ИФВЭ. Сплав не подвержен структурным или полиморфным превращениям под действием эксплуатационных температур и обладает хорошей стабильностью размеров во времени. В целях снижения потерь токоведущие поверхности конструкций покрыты гальванической медью толщиной около 100 мкм. Экспериментально установлено, что существующие техноло-

гии меднения позволяют получить отношение поверхностного сопротивления медненной поверхности к поверхностному сопротивлению меди, равное 1,014.

Сплав АМгб обладает рядом преимуществ перед традиционными материалами ускорительной техники:

- меньшей удельной массой;
- высокой теплопроводностью;
- достаточной прочностью и пластичностью;
- стойкостью к коррозии;
- хорошими технологическими свойствами (обрабатываемость резанием, свариваемость).

Электроды ускоряющих структур изготавливаются из бескислородной меди МОБ. Для изготовления электродов ускоряющей структуры с ПОКФ разработан и запатентован способ обработки сложных поверхностей методом строгания [16], что позволяет исключить системные погрешности профиля и снять ограничения по геометрическим параметрам поверхности электродов, возникающие при обработке методом фрезерования.

Электроды ОЧУ, состоящие из оснований (корпусов) и фокусирующих элементов (рогов), конструктивно могут изготавливаться сборными или цельными. Сборная конструкция предполагает отдельное изготовление рогов и оснований. После операций механической и термической обработки рога запрессовываются в корпус электрода с последующей проваркой стыка на лазерной установке.

Проверенная на практике конструкция цельных электродов, предполагающая применение металлорежущего инструмента специальной формы, более трудоемка, но предпочтительна, так как обеспечивает лучшие параметры по точности и эксплуатационным требованиям.

### 3. СИСТЕМА ВЧ-ПИТАНИЯ

Результаты проведенных расчетов указывают на реализуемость системы ВЧ-питания, удовлетворяющей требованиям ускоряющей системы в части возбуждения НЧУ и двух секций ОЧУ мощными ВЧ-усилителями, построенными на относительно доступных мощных импульсных триодах ГИ-27АМ отечественного производства. Прототипом системы ВЧ-питания с  $f_0 = 74,25$  МГц является система ВЧ-питания действующего линейного ускорителя протонов с ВЧ-фокусировкой на частоте  $f_0 = 148,5$  МГц.

Упрощенная структурная схема системы ВЧ-питания приведена на рис. 8.

Сигнал с возбудителя В через усилитель-разветвитель У-Р поступает на оконечные усилители ОУН, ОУ1 и ОУ2 и далее через узлы ввода мощности УВМ вводится в секции ускорителя. Все три узла ввода мощности УВМ системы ВЧ-питания конструктивно идентичны и представляют собой петлю индуктивной связи с компенсацией собственной индуктивности петли параллельным шлейфом. УВМ отделены от вакуума резонаторов радиопрозрачными керамическими окнами. Связь с магнитным полем резонатора подбирается поворотом УВМ. Оконечные усилители при соответствующей настройке блоков связи БС работают в перенапряженном режиме.

Банчер возбуждается сигналом, выведенным из НЧУ через петлю связи ПС. Рефлектометры Р предназначены для контроля режима работы фидеров. Фазовые соотношения между секциями ускорителя устанавливаются с помощью фазосдвигающих линий ФЛ.

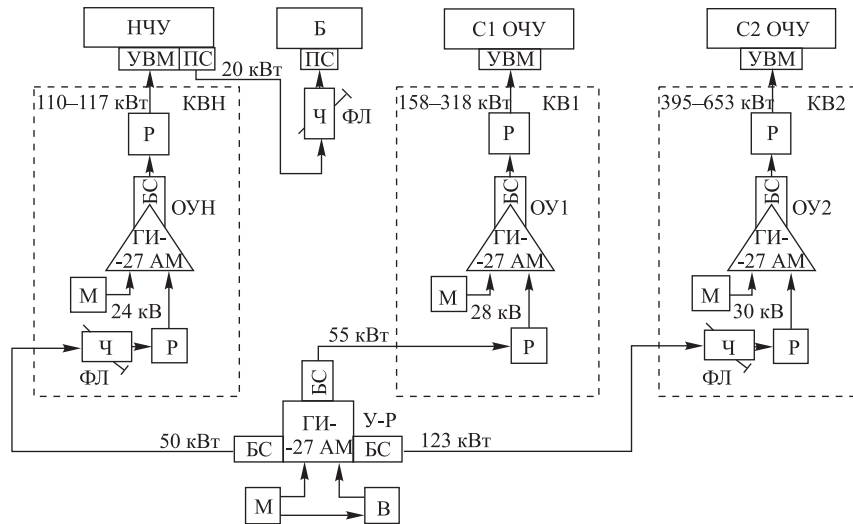


Рис. 8. Структурная схема системы ВЧ-питания. Б — банчер; БС — блок связи ВЧ-усилителя с выходным фидером; В — возбудитель; КВН — канал возбуждения НЧУ; КВ1 — канал возбуждения С1 ОЧУ; КВ2 — канал возбуждения С2 ОЧУ; М — модулятор анодных напряжений; НЧУ — начальная часть ускорителя; ОУН — оконечный усилитель канала КВН; ОУ1 — оконечный усилитель канала КВ1; ОУ2 — оконечный усилитель канала КВ2; ПС — петля связи; Р — рефлектомер; С1 ОЧУ — первая секция ОЧУ; С2 ОЧУ — вторая секция ОЧУ; УВМ — узел ввода мощности; ФЛ — фазосдвигающая линия; У-Р — усилитель-разветвитель



Рис. 9. Оконечный усилитель



Рис. 10. Модулятор

Модульная схема построения разработанных и созданных в ГНЦ ИФВЭ модуляторов М анодных напряжений [17, 18] позволяет форсировать анодные напряжения ламповых усилителей на время прохождения пучка с целью подачи в секции ускорителя дополнительной мощности, компенсирующей потери на ускорение пучка. Выходная мощность усилителей при увеличении анодных напряжений возрастает на 15–60%. Длительность форсирования анодных напряжений устанавливается импульсами с таймера, поступающими на модуляторы.

На рис. 9 и 10 показан внешний вид оконечного усилителя и модулятора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы показана возможность применения ВЧК-фокусировки не только в начальной части ускорителей тяжелых ионов (ПОКФ, или RFQ), но и в основной части (ППКФ, или RFQ DTL).

Фокусировка электрическим полем в структурах с ППКФ позволяет избежать применения громоздких электромагнитных линз с системой питания и водяного охлаждения и трудоемких в изготовлении линз на постоянных магнитах.

Из опыта создания структур с ВЧК-фокусировкой в ИФВЭ следует, что конструктивные особенности этих структур позволяют их изготавливать на одном предприятии с современной производственной и экспериментальной базой без привлечения сторонних организаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barth W.* // Proc. of XX Intern. Linac Conf. Monterey, CA, USA, 2000. P. 1033.
2. *Sidorin A. O. et al.* // TUPSA015. Proc. of IPAC-2010, Kyoto, Japan, 2010. P. 687.
3. *Budanov Yu. et al.* // WEPSB009. Proc. of RuPAC-2010, Protvino, Russia, 2010. P. 190.
4. *Тепляков В. А.* // Тр. II Всесоюз. совещ. по ускор. заряд. част., М.: Наука, 1972. Т. 2. С. 7.
5. *Donets E. D. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71, No. 2. P. 896.
6. *Беляев О. К., Степанов В. Б.* Препринт ИФВЭ 91-126. Протвино, 1991.
7. *Капчинский И. М.* Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.
8. *Барсуков А. Б.* Препринты ИФВЭ 90-4, 90-7. Протвино, 1990.
9. *Жеребцов А. В., Мальцев А. П.* // Вопр. атом. науки и техники. 1979. № 2(4). С. 68.
10. *Kilpatrick W. D.* // Rev. Sci. Instr. 1957. V. 8, No. 10. P. 824.
11. *Тепляков В. А., Мальцев А. П., Степанов В. Б.* Препринт ИФВЭ 2006-5. Протвино, 2006.
12. *Беляев О. К., Рябов А. Д., Степанов В. Б.* // ПТЭ. 1998. № 5. С. 96.
13. *Беляев О. К., Звонарев И. А.* // ПТЭ. 2010. № 3. С. 13.
14. *Степанов В. Б., Тепляков В. А.* Препринт ИФВЭ 74-130. Серпухов, 1974.
15. *Беляев О. К.* Препринт ИФВЭ 2011-10. Протвино, 2011.
16. *Тимофеев А. А.* Патент на изобретение № 24561130. Гос. реестр РФ. 2012.
17. *Мальцев И. Г., Седых В. М., Тепляков В. А.* Препринт ИФВЭ 94-66. Протвино, 1994.
18. *Воробьев А. Н., Евстифеев А. Ю.* Препринт ИФВЭ 2008-9. Протвино, 2008.

Получено 1 апреля 2013 г.