

## УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ТЯЖЕЛОИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

*Труфанов Денис Сергеевич<sup>1</sup>, Гузов Максим Алексеевич<sup>2</sup>,  
Поляков Леонид Евгеньевич<sup>2</sup> (otd4@expd.vniief.ru)*

<sup>1</sup>СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Участок ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) имеет первостепенное значение, поскольку здесь происходит формирование пучка, т. е. пучок, поступающий из источника в виде серии импульсов, преобразуется в отдельные сгустки (банчи), а кроме того, здесь же происходит подготовка пучка для его дальнейшего перезахвата в последующих секциях ускорения.

Ускорение и транспортировка тяжелых ионов представляет особые трудности для любого ускорителя. Характерной особенностью линейных резонансных ускорителей тяжелых ионов (ЛУТИ) являются значительно меньшие, чем у электронов и протонов, скорости частиц в каналах ускорения. Это вынуждает применять в ЛУТИ резонаторы с более низкой рабочей частотой.

В работе приведены результаты расчетов основных электродинамических характеристик (ЭДХ) для трех типов ускоряющих резонаторов (двойного Н-, четырехкамерного и четырех-стержневого) линейного ускорителя тяжелых ионов с ПОКФ, работающих на частоте 40,625 МГц.

По результатам расчета ЭДХ упомянутых выше ускоряющих структур выбран резонатор с оптимальными габаритами и ЭДХ. Для него получено равномерное распределение продольного электрического поля в приосевой области. Также была рассчитана реальная мощность потерь в стенках резонатора и определено значение критерия Килпатрика.

**Ключевые слова:** ускоритель тяжелых ионов, пространственно-однородная квадрупольная фокусировка, электродинамические характеристики, трехмерная модель.

## A RADIO FREQUENCY QUADROPOLE ACCELERATING STRUCTURE FOR THE HEAVY-ION LINAC

*Trufanov Denis Sergeevich<sup>1</sup>, Guзов Maksim Alekseevich<sup>2</sup>, Polyakov Leonid Evgenievich<sup>2</sup> (otd4@expd.vniief.ru)*

<sup>1</sup>SarPhTI NRNU MEPhI, Sarov Nizhny Novgorod region

<sup>2</sup>FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The accelerator section with radio frequency quadropole (RFQ) has a primary importance, since the beam is formed here, i.e. the beam coming from the source in the form of a series of pulses is converted into separate bunches, and in addition, the beam is prepared there for its further recapture in subsequent acceleration sections.

Acceleration and transportation of heavy ions present particular difficulty for any accelerator. A typical characteristic of linear resonant accelerators of heavy ions is significantly lower particle velocities in the accelerations channels than those of electrons and protons. This causes the use of resonators with a lower operating frequency in the heavy-ion linac.

In this paper the electrodynamic characteristics calculation results for three types of accelerating resonators (double H-, 4-vane and 4-rod) of a heavy-ion RFQ operating at a frequency of 40,625 MHz are given.

As a result of calculations 4-vane resonator with magnetic coupling windows having optimal parameters was chosen for the subsequent optimization. A uniform distribution of the longitudinal electric field in the paraxial area is obtained. Power losses in the walls of the resonator were also calculated and the value of the Kilpatrick criterion was determined.

**Keywords:** heavy-ion linac, radio frequency quadrupole, electrodynamic characteristics, 3D-model.

## Введение

Одной из задач современной ускорительной физики является разработка линейных резонансных ускорителей тяжелых ионов на энергии от одного до нескольких МэВ. Они находят применение в качестве инжекторов в циклические ускорители, в том числе в крупные ускорительные комплексы, и широко используются в научных и прикладных целях как самостоятельные установки.

Ускоритель с ПОКФ (международное название Radio Frequency Quadrupole, RFQ) был предложен И. М. Капчинским, В. А. Тепляковым и В. В. Владимирским в 1960-х годах [1]. Так как скорость тяжелых ионов значительно меньше скорости электронов и протонов, то для эффективного захвата в ускорение необходимо применение систем, эффективных при малой фазовой скорости волны, таких как ускоряющие структуры с продольной квадрупольной фокусировкой, где частицы группируются, фокусируются и ускоряются от нескольких десятков кэВ на нуклон до 1 МэВ на нуклон и затем инжектируются в основную часть ускорителя.

На сегодняшний день эффект ПОКФ применяется в инжекторах протонных и тяжелоионных синхротронных ускорителей. Использование ПОКФ в ускорителях позволяет получать сильноточные пучки ионов, которые могут применяться в различных фундаментальных и прикладных исследованиях:

- фундаментальные исследования в области физики высоких энергий;
- испытания на радиационную стойкость;
- радиационная медицина (лучевая терапия).

В данной работе рассмотрены три типа ускоряющих резонаторов с ПОКФ: четырехстержневой резонатор (4-rod), двойной H-резонатор (2H-резонатор) и четырехкамерный резонатор со смещенными окнами магнитной связи (4-vane). Деление этих ускоряющих структур основывается исключительно на конструктивном различии, при котором процессы фокусировки, группировки и ускорения пучка остаются одинаковыми. Анализ литературных источников показал, что в большинстве ускорителей тяжелых ионов с ПОКФ (отношение массы к заряду  $A/Z$  от 4.0 до 8.0) используют ускоряющие структуры типа 4-vane или 4-rod. Это связано с их относительно небольшими габаритами и оптимальными электродинамическими параметрами.

Учитывая выше сказанное, выбор типа ускоряющей структуры, оптимизация ее геометрии и ЭДХ являются очень важной и сложной задачей.

## Моделирование динамики тяжелых ионов в канале ускорителя с ПОКФ

Проектирование структур с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой всегда начинается с расчета динамики частиц, на этом этапе разработчик определяется с энергией, которую можно получить на данном ускорителе, напряжением на электродах, рабочей частотой ускоряющего резонатора.

Оптимальное значение рабочей частоты выбирается из условия минимальной длины структуры с ПОКФ. Наиболее близкой к оптимальному значению является широко используемая частота 40.625 МГц, которая в данной работе принимается за рабочую.

Важную роль играет выбор напряженности электрического поля. Высокое значение напряженности приводит к увеличению вероятности наступления электрических пробоев, низкое – к уменьшению акцептанса канала ускорения. Напряженность электрического поля на поверхности электродов выбирают, ориентируясь на критерий Килпатрика. Используя данные литературы по рекомендуемой напряженности поля на поверхности электродов [2], величина критерия Килпатрика не должна превышать 1,7 ( $K_p < 1,7$ ).

При необходимости ускорять в структуре с ПОКФ ионы с различным отношением массы  $A$  к заряду  $Z$  с целью согласованного ускорения необходимо варьировать разность потенциалов между электродами. При этом максимальное значение напряженности электрического поля на поверхности электродов будет соответствовать максимальному значению отношения  $A/Z$ . Переход на ускорение более легких ионов потребует лишь применение законов подобия, которые подразумевают пропорциональное уменьшение напряжения на электродах структуры.

В данной работе рассмотрены ионы  $\text{Vl}^{26+}$  и  $\text{Na}^{6+}$ , ускоряющиеся в структуре с ПОКФ. При расчете динамики структура разбивается на три участка (рис. 1).

Изменением длины ГУ и СУ достигается максимально возможное значение коэффициента токопрохождения. При выборе геометрических параметров канала ускорителя учитывается более низкая, по сравнению с протонами, скорость частиц. В связи с этим приходится увеличивать радиус апертуры канала, что приводит к увеличению поперечного акцептанса канала. Такое увеличение габаритов ус-

коряющих резонаторов приводит к повышенному энергопотреблению.

Основные расчетные параметры пучка тяжелых ионов  $\text{Bi}^{26+}$  и  $\text{Na}^{6+}$  и ускоряющего канала с ПОКФ представлены в табл. 1.

Для значений из табл. 1 были получены фазовые портреты во всех плоскостях (рис. 2 и рис. 3), рассчитаны значения энергии на нуклон, скорость час-

тиц, ток частиц, потери частиц и геометрические параметры ускоряющей структуры (табл. 2 и 3).

При моделировании в обоих случаях наблюдаются продольные потери частиц 0,7%. Полностью отсутствуют поперечные потери частиц.

В табл. 3 приведены параметры ускоряющего канала, полученные в результате моделирования динамики пучка тяжелых ионов.

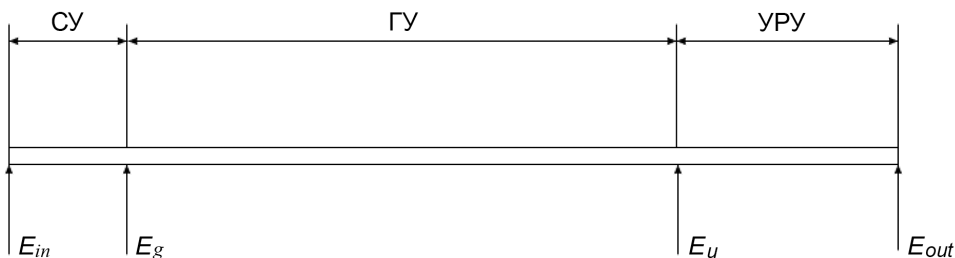


Рис. 1. Функциональная схема ускорителя с ПОКФ: СУ – согласующий участок, ГУ – группирующий участок, УРУ – участок регулярного ускорения

Таблица 1

Основные расчетные параметры пучка тяжелых ионов  $\text{Bi}^{26+}$  и  $\text{Na}^{6+}$  в ускоряющем канале с ПОКФ

Параметр	Значение	
	$\text{Bi}^{26+}$	$\text{Na}^{6+}$
Полная энергия частиц, МэВ	193648	21555
Отношение массы к заряду, A/Z	8	4
Левая фаза пучка, п	- 0.5	
Правая фаза пучка, п	1.5	
Рабочая частота, МГц	40.625	
Входная скорость частиц, $\beta_{\text{вх}}$ *	0.0021617	
Нормализованный эмиттанс пучка (для 99% пучка), п мм мрад	1	
Нормализованный аксептанс канала, п мм мрад	5	
Отношение аксептанса канала к эмиттансу пучка	5	
Амплитуда напряжения между смежными электродами, кВ	202.2	101.1
Ток частиц, мА	1	

\* $\beta$  – относительная скорость частицы;  $\beta = v/c$ , где  $v$  – скорость частицы в м/с,  $c$  – скорость света в м/с.

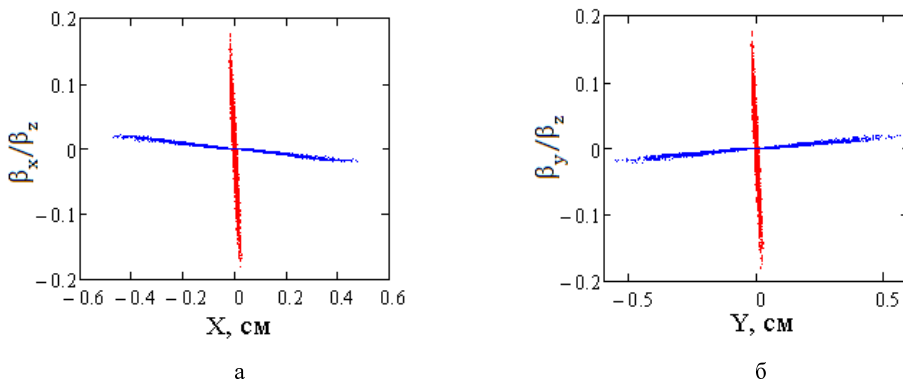


Рис. 2. Результаты численного моделирования динамики пучка ионов  $\text{Bi}^{26+}$  в секции с ПОКФ: а, б – поперечные эмиттансы пучка; в – поперечное сечение пучка; г – продольный фазовый портрет; д – зависимость средней фазы частиц сгустка и синхронной фазы от продольной координаты; е – огибающие пучка (см. оконч. рисунка на с. 367)

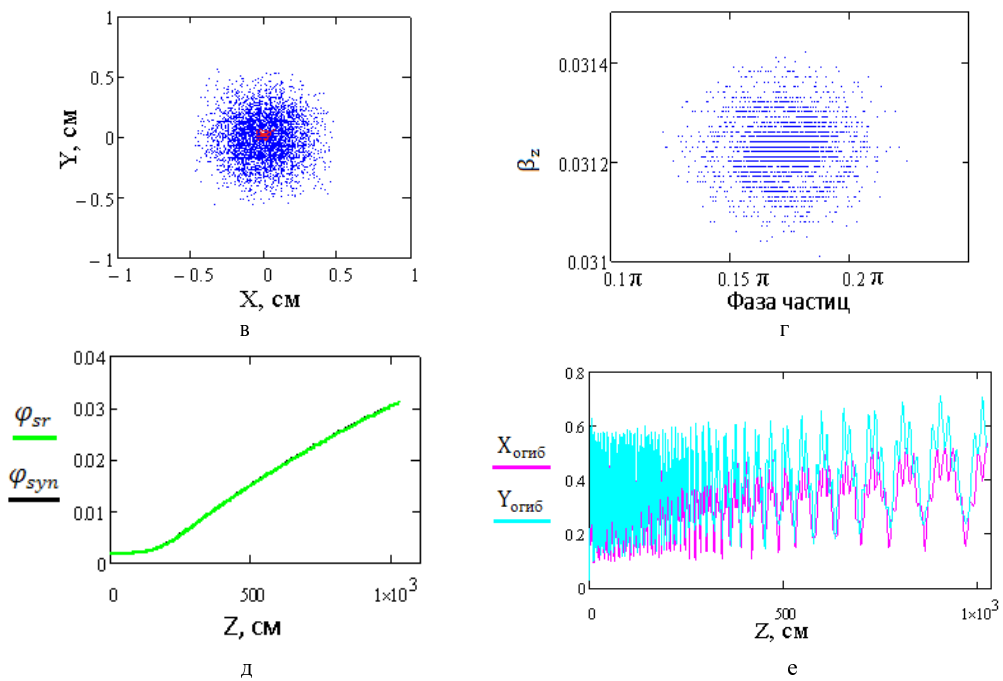


Рис. 2. (Окончание)

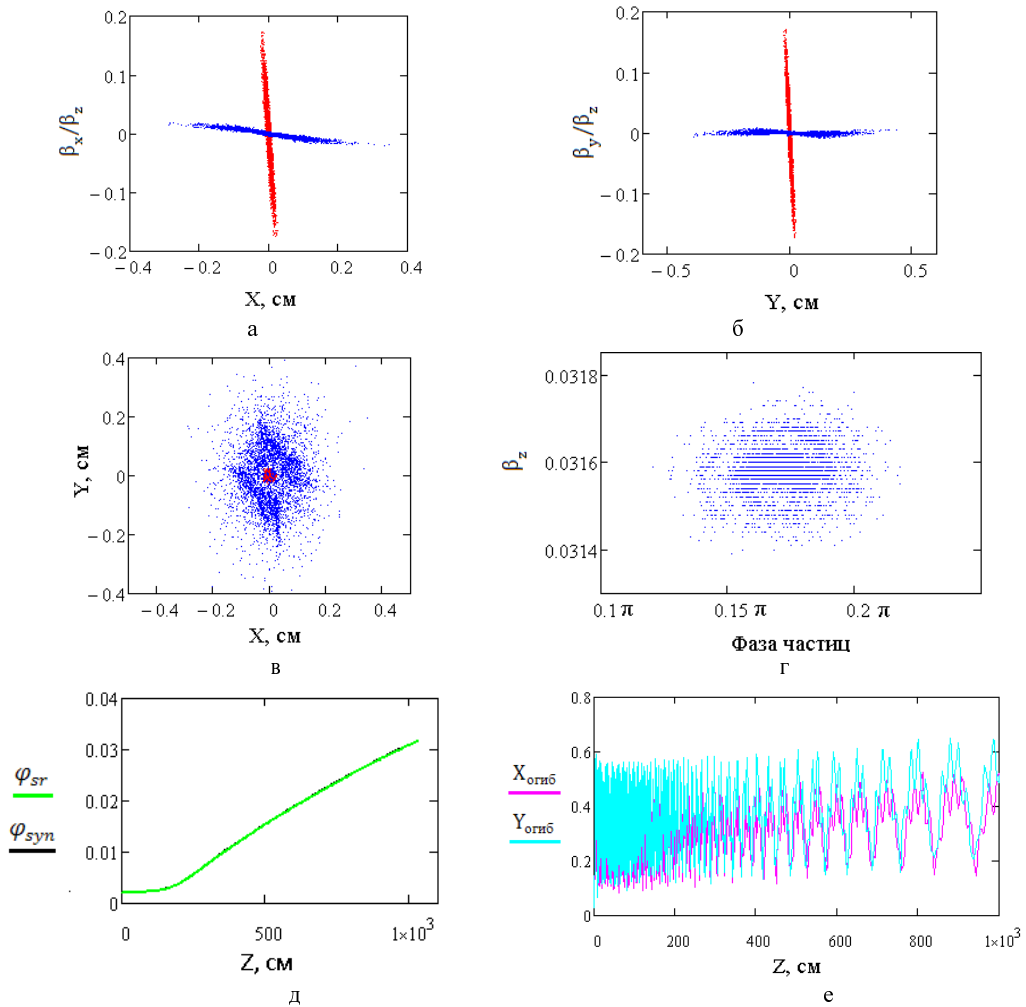


Рис. 3. Результаты численного моделирования динамики пучка ионов  $\text{Na}^{6+}$  в секции с ПОКФ: а, б – поперечные эмиттансы пучка; в – поперечное сечение пучка; г – продольный фазовый портрет; д – зависимость средней фазы частиц сгустка и синхронной фазы от продольной координаты; е – огибающие пучка

Результаты моделирования динамики пучка ионов  $\text{Vi}^{26+}$  и  $\text{Na}^{6+}$ 

Параметр	Значение	
	$\text{Vi}^{26+}$	$\text{Na}^{6+}$
Входная скорость частиц, $\beta_{\text{вх}}$	0,002162	0,002162
Выходная скорость частиц, $\beta_{\text{вых}}$	0,03125	0,03165
Энергия инжекции частиц, кэВ/нуклон	2,192	2,192
Энергия экстракции частиц, кэВ/нуклон	458	469,9
Ток инжекции частиц, мА	1	
Ток экстракции частиц, мА	0,993	
Коэффициент прохождения, %	99,3	
Поперечные потери частиц, %	0,0	
Продольные потери частиц, %	0,7	
Начальная равновесная фаза, $\pi$	0,5	
Конечная равновесная фаза, $\pi$	0,194	

Таблица 3

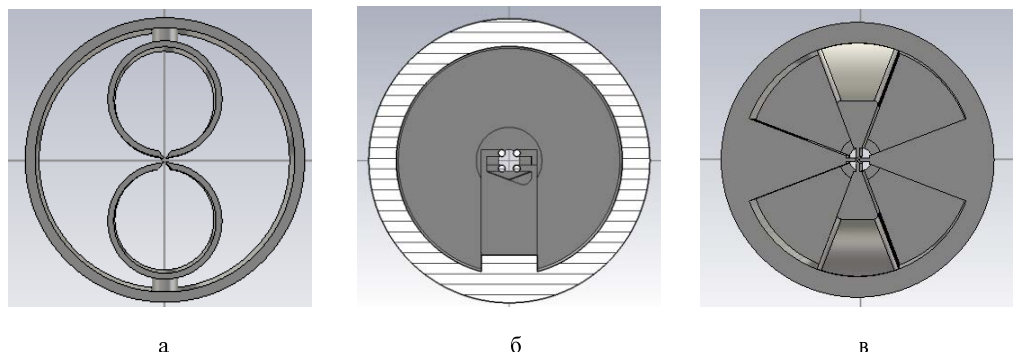
Параметры ускоряющего канала

Параметр	Значение
Длина структуры, мм	10296
Длина группирователя, мм	9000
Длина согласователя, мм	100
Максимальный коэффициент модуляции электродов	1,717
Минимальный радиус апертуры канала, мм	11,41
Максимальный радиус апертуры канала, мм	18,96
Апертура канала в начале согласующего участка, мм	100

Таблица 4

Начальные условия для моделирования ЭДХ

Параметр	Значение
Резонансная частота, МГц	40,625
Напряжение между электродами, кВ	202,2
Средний радиус апертуры канала, мм	15
Радиус наконечников электродов, мм	12
Длина ускоряющей структуры, мм	10296
Входная энергия частиц, кэВ/нуклон	2,192
Выходная энергия частиц, кэВ/нуклон	458



а

б

в

Рис. 4. Поперечные сечения трехмерных моделей трех типов резонаторов с ПОКФ: а – двойной Н-резонатор; б – четырехстержневой резонатор; в – четырехкамерный резонатор

Моделирование упомянутых выше ускоряющих структур было проведено при начальных условиях, указанных в табл. 4.

В программе трехмерного электродинамического моделирования созданы объемные модели и проведены оценочные расчеты трех типов резонаторов с ПОКФ (рис. 4). Определены собственные колебательные моды резонаторов, а также основные ЭДХ: добротность, паразитные частоты и мощность потерь в стенках резонатора (табл. 5).

По результатам расчетов видно, что все три ускоряющие структуры обладают достаточным разделением рабочего и паразитного (дипольного) типа колебаний. Из табл. 5 видно, что 2Н-резонатор имеет наибольшую добротность и геометрические параметры, однако, квадрупольная и дипольная моды находятся близко друг к другу. В свою очередь, 4-rod резонатор обладает наименьшими геометрическими параметрами, его мощность потерь в стенках, по сравнению с другими ускоряющими структурами, рассмотренными в работе, наибольшая, рабочая и паразитная моды находятся далеко друг от друга. В то же время четырехкамерный резонатор со смещенными окнами магнитной связи обладает меньшей мощностью потерь в стенках и большей добротностью, чем 4-rod резонатор. Его габариты, добротность и разделение паразитного и рабочего типа колебаний являются наиболее оптимальными среди остальных резонаторов, рассмотренных выше.

Исходя из результатов расчета ЭДХ различных типов ускоряющих структур с ПОКФ, представленных в табл. 5, для дальнейших расчетов выбирается структура 4К-резонатора со смещенными окнами магнитной связи.

Окна магнитной связи оказывают влияние на распределение электрического поля вдоль ускоряющей структуры. Получение равномерного распределения электрического поля является одной из основных задач моделирования ускоряющих структур с ПОКФ. Требуется, чтобы напряженность электрического поля на всей длине резонатора имела неравномерность  $dE < 2.0 \%$ .

Изменением длины приторцевых полуокон магнитной связи достигается равномерное распределение электрического поля на приосевом участке. Значение электрического поля и погрешность равномерности представлены в табл. 6. Структура моделируется при 1 Дж запасенной энергии.

В ходе работы было получено распределение продольного электрического поля на всей длине структуры, неравномерность которого  $dE < 2,0 \%$  (рис. 5).

При расчетах собственных мод колебаний резонатора запасенная мощность нормируется на 1 Дж, для расчета реальной мощности потерь необходимо провести нормировку. Для этого использована методика, представленная в работе [3].

Таблица 5

Результаты расчетов ЭДХ разных типов резонаторов

Параметр	Значение		
	4-vane со смещенными окнами магнитной связи	4-rod	2Н
Тип структуры			
Тип колебаний	$H_{210}$	$TEM_{110}$	$H_{011}$
Рабочая частота, МГц	40,625		
Частота ближайшего паразитного типа колебаний, МГц	49,46	88,05	42,26
Внутренний диаметр резонатора, мм	850	340	1550
Расчетная добротность	13212	6682,5	24947
Мощность потерь при запасенной энергии в резонаторе 1 Дж, кВт	19,423	38,965	10,192

Таблица 6

Распределение продольного электрического поля на всей длине структуры

Параметр	Значение
Средняя напряженность электрического поля, $E$ (кВ/м)	764
Неравномерность распределения электрического поля, %	0.6
Рабочая частота, МГц	40.625

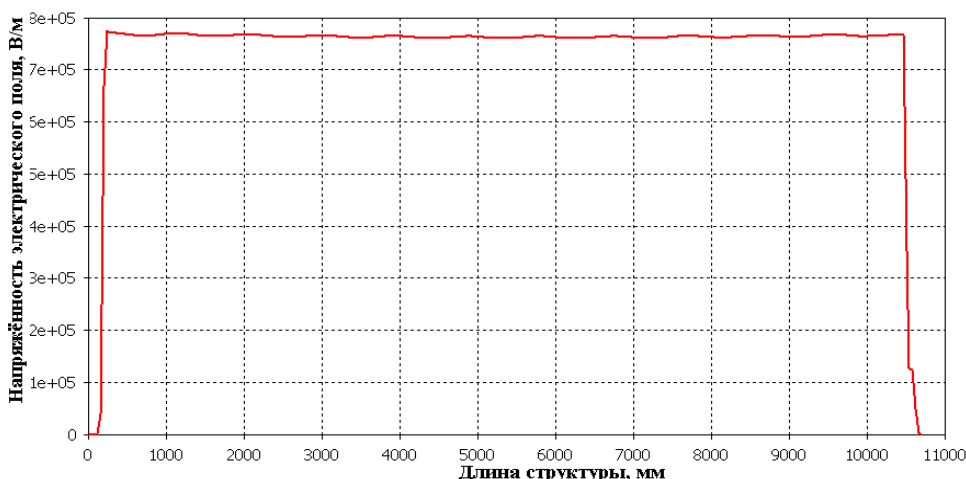


Рис. 5. Распределение электрического поля на присоевном участке

Таблица 7

ЭДХ 4К-резонатора со смещенными окнами магнитной связи

Параметр	Значение
Собственная добротность структуры	13212
Мощность потерь при запасенной энергии в резонаторе 1 Дж, кВт	19,423
Реальная мощность потерь, $P_{loss}$ (кВт)	570,58
Запасенная энергия, $W_{st}$ (Дж)	29,55
Поперечное шунтовое сопротивление, $R_{sk}$ (кОм)	89,49
Максимальное значение напряженности электрического поля, МВ/м	13,3

Проведен электростатический расчет распределения напряженности электрического поля между электродами. Для этого в электростатическом расчете между смежными электродами задавалась разность потенциалов, обеспечивающая квадрупольное распределение напряженности электрического поля.

Посредством электростатического расчета определяется максимальная напряженность электрического поля между противоположными электродами. Аналогичная величина определяется в расчетах на собственных модах. Исходя из полученных результатов, находится коэффициент «перенормировки»:

$$K = \frac{E_{static}}{E_{norm}}, \quad (1)$$

где  $E_{static}$  – амплитуда напряженности электрического поля, определяемая в электростатическом расчете,  $E_{norm}$  – амплитуда напряженности электрического поля, определяемая в расчете на собственной моде.

Используя тот факт, что мощность потерь в стенках резонатора прямо пропорциональна квадрату напряженности электрического поля, с учетом коэффициента «нормировки»  $K$  можно определить мощность потерь в реальной структуре:

$$P_{loss} = K^2 P_{lossnorm}. \quad (2)$$

Энергия, запасенная за один период изменения ВЧ поля, определяется как [3]:

$$W_{st} = \frac{Q P_{loss}}{2\pi f}, \quad (3)$$

где  $Q$  – добротность резонатора,  $f$  – рабочая частота.

Одной из важнейших ЭДХ ускоряющей структуры является шунтовое сопротивление. Чем оно выше, тем больше энергии передается ускоряемому пучку и меньше тратится на потери в структуре. Поперечное шунтовое сопротивление определяется как:

$$R_{sh} = \frac{U^2}{P_{loss}}, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение между смежными электродами [3].

В табл. 7 представлены результаты расчетов ЭДХ 4К-резонатора со смещенными окнами магнитной связи.

Максимальная напряженность электрического поля на поверхности лопастей структуры вдоль

канала ускорения сильно влияет на все параметры резонатора с ПОКФ. Напряженность ВЧ электрического поля, при которой не будет происходить электрических пробоев в вакууме, определяется соотношением, называемым критерием Килпатрика [4].

Отношение максимального значения напряженности поля на поверхности структуры к напряженности поля по Килпатрику для резонансных структур обычно составляет от 1 до 2. Его выбирают в зависимости от режима работы ускорителя.

Модифицированное соотношение Килпатрика для выбранной структуры выглядит следующим образом [5]:

$$R_0 E_{kp}^3 \left( 1 - \exp \left[ -\frac{48,6 E_{kp}}{R_0 f^2} \right] \right) = 1,8 \cdot 10^5 \cdot \exp \left[ \frac{170}{E_{kp}} \right], \quad (5)$$

где  $R_0$  – средний радиус между электродами в см.;  $E_{kp}$  – напряженность по критерию Килпатрика в кВ/см.

Для рабочей частоты 40.625 МГц и среднего радиуса апертуры 15 мм максимальное значение напряженности поля на поверхности электродов ускоряющей структуры с ПОКФ в единицах критерия Килпатрика соответствует 1.7 Кр.

### Заключение

В данной работе представлены результаты расчета динамики пучка ионов  $\text{Bi}^{26+}$  и  $\text{Na}^{6+}$  в канале ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой импульсного действия. Перед расчетом динамики были определены основные параметры ускоряющей структуры, начальные условия и аксептансы, а также представлена функциональная схема структуры с ПОКФ.

По результатам расчета динамики частиц построены объемные модели трех типов ускоряющих резонаторов с ПОКФ (4-vanесо смещенными окнами магнитной связи, 4-rod и 2Н-), работающих на частоте 40.625 МГц, и рассчитаны их основные электродинамические характеристики.

Проведенный анализ показал, что четырехкамерный резонатор со смещенными окнами магнитной связи обладает оптимальными габаритами и ЭДХ, по сравнению с другими типами, рассмотренными в данной работе. Поэтому данный резонатор был выбран для дальнейших расчетов.

Для указанной ускоряющей структуры было получено равномерное распределение продольного электрического поля в приосевой области. Также была рассчитана реальная мощность потерь в стенках резонатора (570.58 кВт) и определено значение критерия Килпатрика (1.7 Кр).

### Список литературы

1. Тепляков В. А., Мальцев А. П., Степанов В. Б. Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития) // Препринт ИФВЭ, 2006.
2. Тепляков В. А. Исследование возможности создания начальной части ускорителя непрерывного режима на энергию 5 МэВ. Протвино: ИФВЭ, 2000.
3. Qi Fu, Kun Zhu, Yuanrong Lu, Zhi Wang et al. Progress of a 162.5 MHz High-Current RFQ with Coupling Windows // Proceedings of LINAC2016. 2016. P. 589–591.
4. Kilpatrick W. D. A Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC / UCRL-2321. Berkeley, California, 1953.
5. Polozov S., Barth W., Dziuba F., Kulevoy T. et al. Beam Dynamics Study for the New CW RFQ // Proceedings of RuPAC. 2016. P. 267–269.