

# РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКЕЙ НА ЭНЕРГИЮ ДО 2 МЭВ

*А. А. Брехова, Л. Е. Поляков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Линейный резонансный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, международное название Radio Frequency Quadrupole, RFQ) был предложен Тепляковым В. А. в 1960-х годах [1, 2].

Такие ускоряющие структуры находят свое применение в качестве начальных частей ускорения в системах инжекции ионных пучков для циклических ускорителей (например, синхротронов) на высокие энергии [3]. Поскольку скорость ионов значительно меньше скорости электронов для эффективного захвата в ускорение необходимо применение систем, эффективных при малой фазовой скорости волны, таких, как ускоряющие структуры с ПОКФ, где частицы группируются и ускоряются от нескольких десятков кэВ до 2–3 МэВ и затем инжектируются в основную часть ускорителя.

Качество пучка, получаемое на выходе циклического ускорителя, во многом определяется параметрами линейного ускорителя с ПОКФ. Поэтому определение и расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) резонатора линейного ускорителя с ПОКФ является одной из важных задач при создании синхротронных ускорительных комплексов.

В данной работе рассмотрено два основных типа ускоряющих резонаторов с ПОКФ: четырехкамерный резонатор (4К-резонатор) и двойной Н-резонатор (2Н-резонатор). Обычно 2Н-резонатор имеет большие размеры, и, как следствие, большую мощность электромагнитных потерь, по сравнению с 4К-резонатором. Однако при этом он имеет значительно лучшее разделение частот рабочей (квадрупольной) и паразитной (дипольной) моды электромагнитных колебаний, чем 4К-резонатор. Также не последнюю роль в выборе ускоряющей структуры играют технологические особенности каждого резонатора. В связи с этим следует учесть относительно меньшие габариты 4К-резонатора.

Учитывая выше сказанное, выбор типа ускоряющей структуры, оптимизация ее геометрии и ЭДХ являются очень важной и сложной задачей, и, чаще всего, носят компромиссный характер.

## Определение геометрических параметров, собственной частоты и добротности резонаторов

Начальным этапом при разработке любого резонансного ускорителя всегда является выбор рабочей частоты, которая в свою очередь определяется выбором источника питания, массогабаритными размерами ускорителя и оценочными расчетами динамики пучка заряженных частиц.

Рабочие частоты мощных ламповых источников питания, имеющихся на российском рынке, лежат в диапазоне от 100 до 200 МГц. Учитывая это, были проведены оценочные расчеты динамики пучка ускорителя протонов. Рабочая частота резонатора составила 162 МГц. Исходя из предварительно сделанных аналитических оценок, для достижения требуемых темпа ускорения и выходной энергии протонов, в создаваемой модели необходимо обеспечить разность потенциалов между электродами в 120 кВ на всем протяжении ускоряющей структуры. В табл. 1 представлены основные проектные параметры ускоряющей структуры с ПОКФ.

Таблица 1

Основные параметры ускоряющей структуры

Тип ускоряемых частиц	p+
Входная энергия	47 кэВ
Выходная энергия	2,15 МэВ
Рабочая частота	162 МГц
Амплитуда напряжения между электродами	120 кВ
Длина ускоряющей структуры	2400 мм
Диаметр апертуры канала	5,5 ÷ 9 мм
Число периодов	76

Исходя из начальных данных, в программе трехмерного электродинамического моделирования были созданы объемные модели 2Н- и 4К-резонаторов (рис. 1 и 2).

Структура 2Н-резонатора состоит из контейнера с торцевыми стенками, двух резонирующих камер, срезанных в центре модели, где установлены электроды, а в структуре 4К-резонатора вместо камер установлены четыре лопасти, на концах которых установлены электроды.

## Основные геометрические параметры 4К-резонатора

Параметр	Величина, мм
Длина контейнера	2460
Длина электродов	2400
Внутренний диаметр контейнера	200
Толщина стенок контейнера	15
Толщина торцевых стенок контейнера	15
Расстояние между торцевой стенкой контейнера и электродами	10
Радиус апертуры канала пучка	5,5
Толщина электродов	10

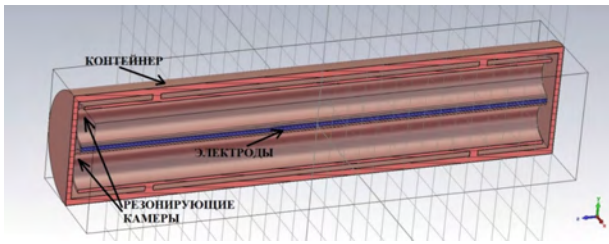


Рис. 1. Трехмерная модель 2Н-резонатора ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой в разрезе

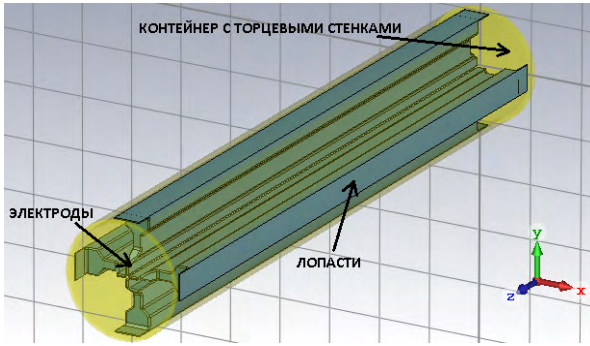


Рис. 2. Трехмерная модель 4К-резонатора ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой

Электрические и магнитные компоненты поля в этих структурах сильно разделены. Электрическое поле сосредоточено в приосевой области, а магнитное поле находится в камерах.

В табл. 2 представлены основные геометрические параметры 2Н-резонатора, а в табл. 3 4К-резонатора. Для обоих резонаторов одинаковыми параметрами были длина электродов и диаметр апертуры. Отметим, что длина резонатора практически не оказывает влияние на величину его собственной частоты. Поэтому она подбиралась исходя из планируемой выходной энергии протонов, которая при данной длине ориентировочно должна составлять 2 МэВ.

Таблица 2

## Основные геометрические параметры 2Н-резонатора

Параметр	Величина, мм
Длина контейнера	2460
Длина резонирующих камер	2400
Внутренний диаметр контейнера	264
Внешний диаметр резонирующих камер	160
Толщина стенок контейнера	23
Толщина стенок резонирующих камер	12
Расстояние между торцевой стенкой контейнера и резонирующими камерами	10
Радиус апертуры канала пучка	5,5
Толщина электродов	10

Расчеты проведены с использованием программы трехмерного электродинамического моделирования. В процессе расчетов проводится решение краевых задач с заданными граничными условиями по отысканию резонансных частот, соответствующих устанавливаемым в резонаторе собственным электромагнитным колебаниям.

Разбиение рассматриваемых расчетных моделей производилось тетраэдральной сеткой. Количество ячеек сетки составило 419776 для 2Н-резонатора и 494955 для 4К-резонатора. В качестве материала резонатора использовался материал ПЕС с проводимостью  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  1/Ом·м.

В табл. 4 и 5 представлены результаты расчетов собственной частоты и добротности двух резонаторов для различных типов колебаний.

Таблица 4

## Результаты расчетов собственных частот и добротностей 2Н-резонатора

Тип колебаний	Частота, МГц	Добротность
$H_{111}$	137,6	2536
$H_{011}$	162,0	14640
$H_{112}$	176,7	2354

Таблица 5

## Результаты расчетов собственных частот и добротностей 4К-резонатора

Тип колебаний	Частота, МГц	Добротность
$H_{210}$	162,0	13816,6
$H_{110}$	159,9	13473,7

Для 2Н-резонатора интересующий нас тип колебаний  $H_{011}$  находится на частоте 162,0 МГц. При этом собственная добротность резонатора составляет 14640. Из табл. 4 видно, что ближайшие по частоте типы колебания  $H_{111}$  и  $H_{112}$  находятся на частотах 137,6 и 176,7 МГц, соответственно.

Для 4К-резонатора нужный тип колебаний  $H_{210}$  для данного резонатора находится на частоте 162,0 МГц. При этом собственная добротность резонатора составляет 13816,6. Два ближайших по частоте типа колебаний находятся на частоте 159,9 МГц. Данные моды являются дипольными ( $H_{110}$ ) и отличаются углом поляризации электрического поля в  $90^\circ$ .

## Расчет квадрупольного распределения напряженности электрического поля в структуре 2Н-резонатора и 4К-резонаторов

Конфигурация резонаторов подбирается таким образом, что на рабочих типах колебаний для обоих резонаторов ( $H_{011}$  и  $H_{210}$ ) силовые линии электрического поля имеют квадрупольное распределение, которое дает фокусирующий эффект.

На рис. 3 представлена характерная картина квадрупольного распределения силовых линий электрического поля в поперечной плоскости резонаторов при фазе ВЧ поля  $\varphi = 0$ .

Из рис. 3 видно, что при фазе ВЧ поля  $\varphi = 0^\circ$  наблюдается фокусирующий (для протонов) эффект.

На рис. 4 и 5 показаны расчетные зависимости нормированных величин поперечной компоненты напряженности электрического поля от соответствующей поперечной координаты в 2Н и 4К резонаторах, соответственно.

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что распределение напряженности электрического поля в двух разных резонаторах имеет одинаковый вид.

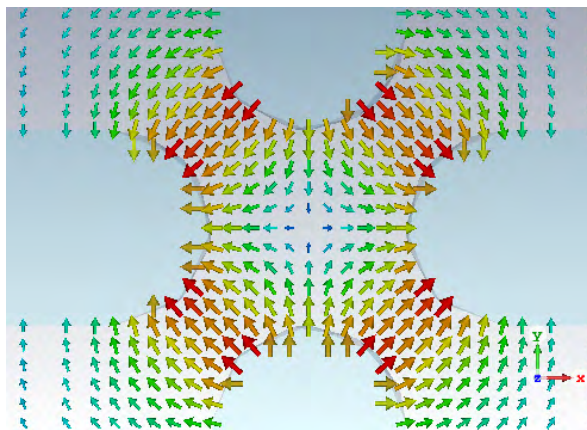
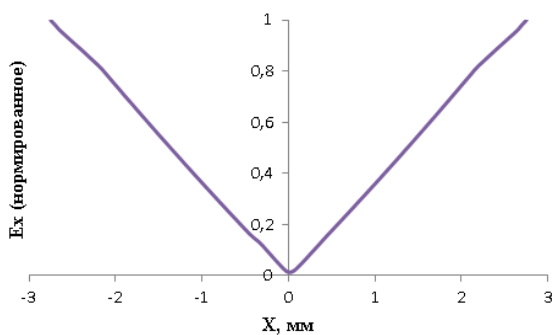
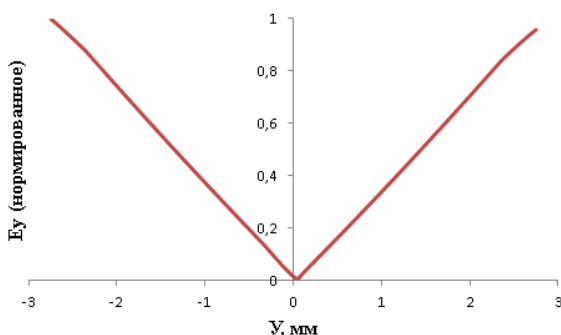


Рис. 3. Квадрупольное распределение силовых линий электрического поля в поперечной плоскости  $\varphi = 0^\circ$

Полученные зависимости подтверждают квадрупольный характер электрических сил, действующих в межэлектродном зазоре. Видно, что фокусирующая величина напряженности электрического поля линейно растет с увеличением расстояния от центральной оси модели.

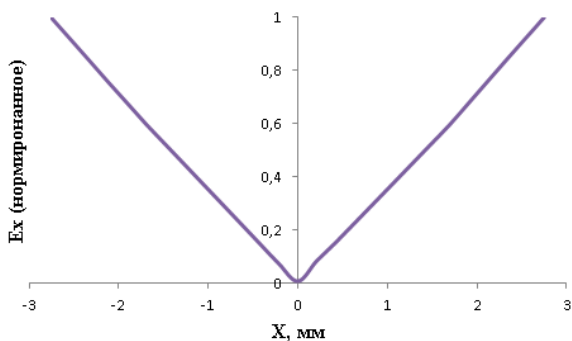


а

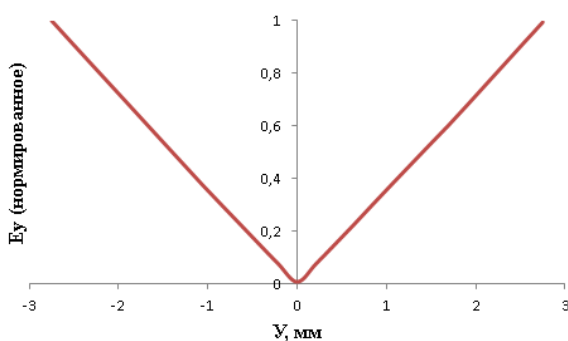


б

Рис. 4. Зависимость нормированной величины напряженности поперечной компоненты электрического поля от координат для 2Н-резонатора: а – распределение электрического поля по оси  $x$ , б – распределение электрического поля по оси  $y$



а



б

Рис. 5. Зависимость нормированной величины напряженности поперечной компоненты электрического поля от координат для 4К-резонатора: а – распределение электрического поля по оси  $x$ , б – распределение электрического поля по оси  $y$

## Оптимизация геометрии 4К-резонатора

При близких значениях добротностей двух рассматриваемых типов резонаторов 4К-резонатор обладает меньшими габаритами и, как следствие, меньшей требуемой мощностью ВЧ питания при прочих одинаковых параметрах. Учитывая выше сказанное, а также большую распространенность такого типа резонатора с ПОКФ, наличие опыта разработки и изготовления на отечественных предприятиях за последние годы 4К-резонаторов [4], для дальнейшей оптимизации и проработки геометрии выбран четырехкамерный резонатор.

Для того чтобы получить отвечающий заданным параметрам режим работы ускорителя был проведен анализ влияния длины приторцевых областей на постоянство напряженности электрического поля вдоль оси резонатора. Эта характеристика, по сути, определяет стабильность процесса ускорения и фокусировки пучка. Напряженность электрического поля должна иметь максимальное и постоянное значение вдоль оси резонатора в пределах электродов и минимальное значение магнитного поля [5].

Магнитное поле в режиме  $H_{210}$  чередуется в смежных квадрантах. На концах магнитное поле огибает лопасти. Емкость образуется в пространстве между торцом и концом лопасти (рис. 6), а индуктивность – на поверхности среза лопастей. Для согласования собственной частоты LC-контура в приторцевой области (рис. 7) с частотой высокочастотного поля в резонаторе необходимо подобрать оптимальную геометрию лопастей в этой области для равномерного распределения электрического поля вдоль оси структуры.

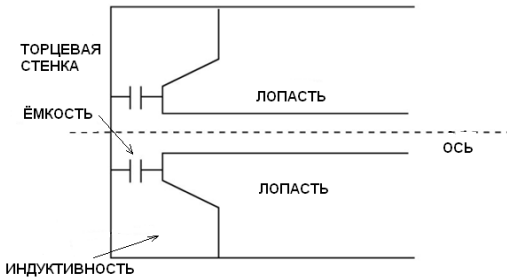


Рис. 6. Профиль приторцевой области 4К-резонатора

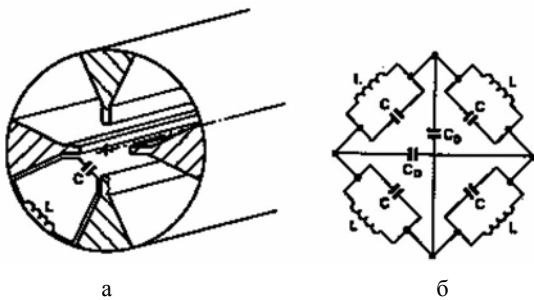


Рис. 7. Эквивалентные схемы приторцевой области 4К-резонатора: а – сечение четырехкамерного резонатора, б – эквивалентная схема LC-контуров в четырехкамерном резонаторе

На рис. 8 представлены расчетные модели. Для анализа взяты три модели с длинами приторцевых областей: 0 мм (рис. 8а), 70 мм (рис. 8б) и 100 мм (рис. 8в).

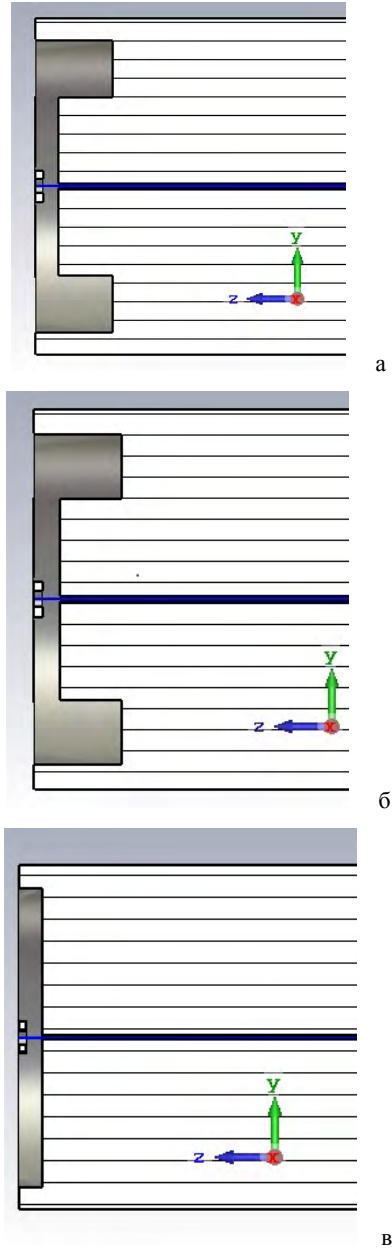
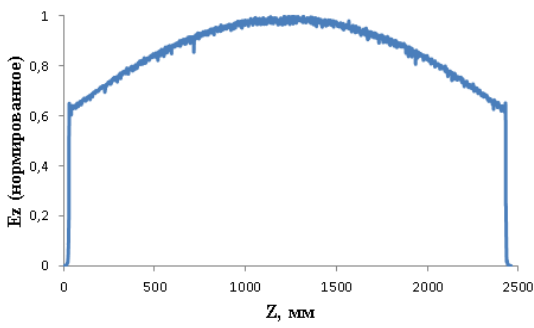


Рис. 8. Длина приторцевой области: а – 0 мм, б – 70 мм, в – 100 мм

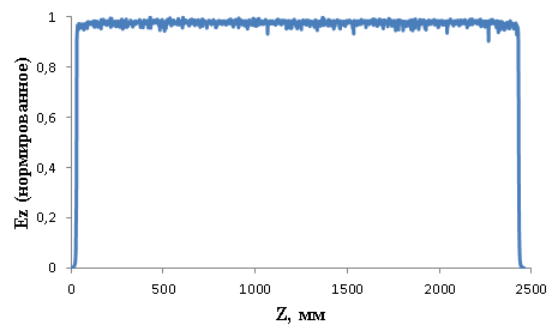
На рис. 9 представлены нормированные распределения напряженностей электрического поля вдоль оси  $z$  у различных моделей.

В модели с длиной приторцевой области 70 мм (рис. 9б) наблюдается наиболее равномерное распределение напряженности электрического поля вдоль оси резонатора. Отклонение составило 2,4 %.

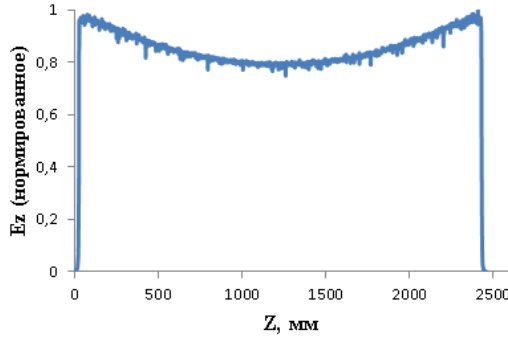
Также проведен анализ влияния длины приторцевых областей на распределение магнитного поля вдоль оси резонатора (рис. 10).



а

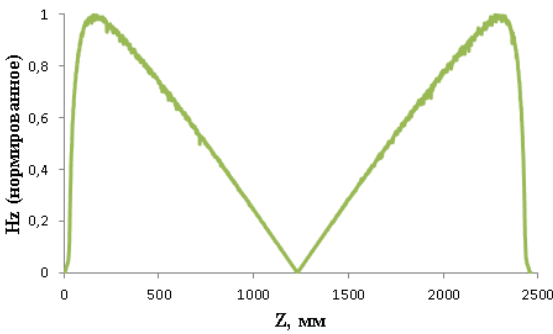


б

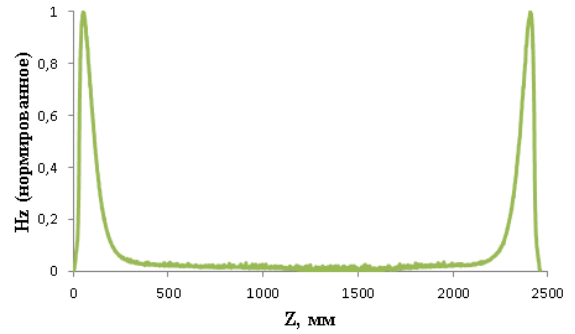


в

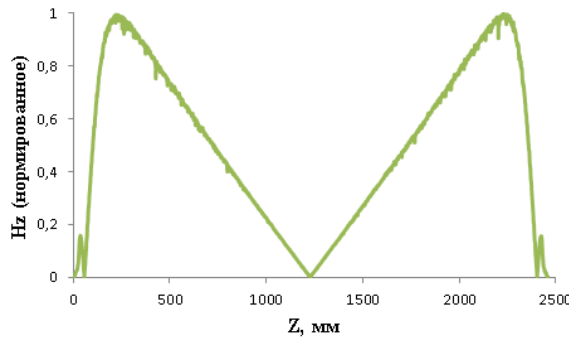
Рис. 9. Нормированные распределения напряженностей электрического поля вдоль оси  $z$  в различных моделях: а – длина приторцевой области 0 мм, б – длина приторцевой области 70 мм, в – длина приторцевой области 100 мм



а



б



в

Рис. 10. Нормированные распределения напряженностей магнитного поля вдоль оси  $z$  в различных моделях: а – длина приторцевой области 0 мм, б – длина приторцевой области 70 мм, в – длина приторцевой области 100 мм

Из рис. 10б видно, что в модели с приторцевой областью 70 мм магнитное поле минимально вдоль оси  $z$  в пределах электродов.

Проведенный анализ различных геометрий приторцевых областей 4К-резонатора показывает, что длина приторцевого зазора в 70 мм обеспечивает оптимальное распределение электрического поля и минимум магнитного поля в межэлектродном зазоре, что отвечает расчетным требованиям динамики протонов на всей длине структуры.

Для оптимизированной модели была рассчитана мощность тепловых потерь в стенках резонатора и поперечное шунтовое сопротивление при условии, что разность потенциалов между электродами составляет 120 кВ. Таким образом, финальные расчетные электродинамические характеристики 4К-резонатора представлены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные электродинамические характеристики 4К-резонатора

Параметр	Значение
Рабочая частота	162 МГц
Частота дипольной моды	157,7 МГц
Амплитуда напряжения между электродами	120 кВ
Собственная добротность	15172
Мощность тепловых потерь	142,5 кВт
Поперечное шунтовое сопротивление	100,8 кОм
Амплитудное значение напряженности электрического поля	22,3 МВ/м

### Заключение

В работе рассмотрены два основных типа резонаторов для линейного протонного ускорителя с ПОКФ (2Н-резонатор и 4К-резонатор). Построены их объемные модели, рассчитанные на рабочую частоту 162 МГц. Рассчитаны их собственные добротности. Получен вид поперечных компонент напряженности электрического поля, который подтвердил квадрупольный характер электрических сил в межэлектродном зазоре для обоих резонаторов.

Для дальнейшей оптимизации модели был выбран 4К-резонатор, так как он обладает меньшими

габаритами при относительно тех же электродинамических характеристиках по сравнению с 2Н-резонатором. Проведен анализ влияния длин приторцевых областей на электрическое и магнитное распределения поля для 4К-резонатора, в результате которого наиболее оптимальный вид эти зависимости имели в модели с длиной приторцевой области 70 мм. В этой модели напряженность вдоль оси  $z$  максимальна и постоянна в пределах электродов, а магнитная составляющая минимальна.

Также для полученной модели 4К-резонатора рассчитаны мощность тепловых потерь в стенках резонатора, собственная добротность, поперечное шунтовое сопротивление резонатора и амплитудное значение напряженности электрического поля.

Полученные в результате электродинамических расчетов характеристики резонатора удовлетворяют расчетным требованиям по динамике частиц в ускорителе и определяют исходные данные для проектирования системы ВЧ питания.

### Литература

1. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей: Динамика частиц, М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.
2. Тепляков В. А., Мальцев А. П., Степанов В. Б. Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития): Препринт ИФВЭ 2006-5. Протвино, 2006. С. 34.
3. Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 528.
4. Koshelev V., Kropachev G., Kulevoy T. et al. Design of 4-vane RFQ with magnetic coupling windows for Nuclotron injector LU-20// Proceeding of LINAC-2016. 2017 P. 575–577
5. Polozov S., Barth W. et al. Beam dynamics study and electrodynamic simulations for the CW RFQ // Proceeding of IPAC-2017. 2017. P. 1333–1336.
6. Mustapha B., Kutsaev S. V., Ostroumov P. N. RF design optimization of 176 MHz CW RFQ // Proceeding of PAC-2013. 2013. P. 990–992.