

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРОВ С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ЭНЕРГИЮ ДО 4 МЭВ/НУКЛОН

*Труфанов Денис Сергеевич (sarfti@mephi.ru)¹, Гузов Максим Алексеевич²,
Поляков Леонид Евгеньевич²*

¹ СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

² ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Интерес к разработке линейных резонансных ускорителей тяжелых ионов на энергии от одного до нескольких МэВ связан с их использованием, как для фундаментальных исследований, так и для решения различных практических задач. Они находят применение в качестве инжекторов в большие циклические ускорители (синхротроны, коллайдеры, циклотроны) и широко используются в научных и прикладных целях как самостоятельные установки.

Разработка линейных ускорителей тяжелых ионов представляет особые трудности. Характерной особенностью резонансных линейных 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.

Структура современных ЛУТИ состоит из нескольких частей: источник частиц, начальная и основная часть, каналы транспортировки, системы вывода пучка и системы диагностирования пучка. Начальная часть может быть представлена секцией с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), а основная – секцией с трубками дрейфа. Среди ускоряющих структур с трубками дрейфа четвертьволновый резонатор (или $\lambda/4$ -резонатор) и И-резонатор зарекомендовали себя лучше всего. Особенностью современных ЛУТИ является использование в основной части отдельных индивидуально фазированных резонаторов.

В работе приведены результаты расчетов основных электродинамических характеристик (ЭДХ) упомянутых выше ускоряющих структур ЛУТИ с трубками дрейфа (отношение массы к заряду A/Z от 4,0 до 8,0), работающих на частоте 81,25 МГц и 162,5 МГц соответственно.

Моделирование резонаторов проводилось с целью определения конструктивных особенностей данных структур и определения основных способов подстройки резонансной (рабочей) частоты.

Ключевые слова: ускоритель тяжелых ионов, трубки дрейфа, электродинамические характеристики, трехмерная модель, рабочая частота.

CALCULATION OF THE ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE DRIFT TUBE RESONATORS OF A LINEAR HEAVY ION ACCELERATOR FOR ENERGIES UP TO 4 MEV/NUCLEON

*Trufanov Denis Sergeevich (sarfti@mephi.ru)¹, Guzov Maksim Alekseevich²,
Polyakov Leonid Evgenievich²*

¹ SarPhTI NRNU MPhI, Sarov, Nizhni Novgorod region

² FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Interest to the development of linear resonant accelerators of heavy ions at energies from one to several MeV is related to their use both for fundamental research and for various practical problems. They find application as injectors in large cyclic accelerators (synchrotrons, colliders, cyclotrons) and are widely used for scientific and application purposes as stand-alone facilities.

The development of linear heavy ion accelerators is particularly challenging. A characteristic feature of heavy ions linacs is much lower velocity of particles in the acceleration channels, compared with electrons and protons. This forces to use resonators with lower operating frequency in heavy ions linacs.

The structure of modern heavy ions linacs consists of several parts: particle source, initial and main part, transport channels, beam exit systems and beam diagnostic systems. The initial part can be represented by a spatially homogeneous quadrupole focusing section (RFQ) and the main part by a drift tube section. Among the accelerator structures with drift tubes, the quarter-wave resonator (or $\lambda/4$ resonator) and the IH resonator have proved to be the best. A feature of modern heavy ions linacs is the use of separate individually phased resonators in the main part.

This paper presents the results of calculations of the basic electrodynamic characteristics of the aforementioned accelerator structures for a linear accelerator of heavy ions with drift tubes (mass-to-charge ratio A/Z from 4,0 to 8,0) operating at 81,25 MHz and 162,5 MHz, respectively.

The resonators were simulated to determine the design features of these structures and to determine the main ways of tuning the resonant (operating) frequency.

Key words: heavy-ion linac, drift tubes, electrodynamic characteristics, 3D-model, operating frequency.

Введение

ЛУТИ отличаются типом ускоряющих структур и величиной их рабочих частот. После группировки и захвата в ускорение в начальной части ускорителя, представленной ПОКФ, происходит инжекция в последующие структуры, которые могут быть представлены ускорителями с трубками дрейфа.

Существуют следующие типы структур с трубками дрейфа [1]:

1. ускоряющая структура типа «Видеро»;
2. ускоряющая структура типа «Альварец»;
3. ускоряющая структура на основе ИH-резонаторов (Interdigital H-resonator)
4. ускоряющая структура на основе СН-резонаторов (Cross-bar H-resonator)
5. четвертьволновый резонатор;
6. полуволновый резонатор.

В данной работе рассмотрены два типа ускоряющих резонаторов с трубками дрейфа: четвертьволновый резонатор и ИH-резонатор, которые моделируются с целью разработки методов настройки и оптимизации геометрии и ЭДХ.

Определение особенностей конструкции резонаторов с трубками дрейфа

Перед моделированием ускоряющих структур важным этапом является определение конструктивных особенностей данных резонаторов.

Четвертьволновый резонатор (или $\lambda/4$ резонатор) представляет собой отрезок коаксиального волновода, верхняя часть центрального проводника которого короткозамкнута на корпус, а нижняя – не имеет с ним контакта и заканчивается трубкой дрейфа. В этом случае появляется дополнительная паразитная емкость между закрытым торцом резонатора и внутренним стержнем. Длина резонатора равна четверти длины волны ВЧ колебаний на резонансной частоте.

Для использования данного типа резонатора для ускорения пучков заряженных частиц, на торце центрального стержня располагают трубку дрейфа, такие же трубки (или полутрубки – зависит от рассчитанной динамики пучка) располагают на боковой поверхности резонатора, так, чтобы все трубки были расположены на одной оси (рис. 1).

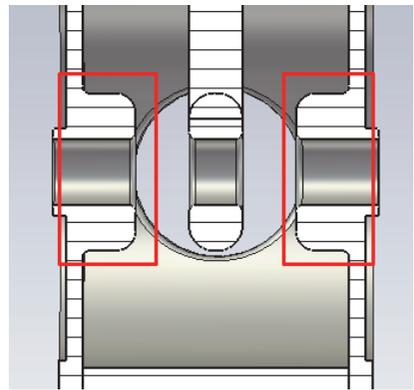


Рис. 1. Полутрубки дрейфа

Будучи несимметричной структурой, четвертьволновый резонатор имеет несимметричное распределение электромагнитного поля, что может негативно повлиять на динамику пучка в ускоряющей структуре, собранной на основе четвертьволнового резонатора [2].

Стоит отметить, что $\lambda/4$ резонаторы чувствительны к механическим колебаниям из-за больших размеров центрального стержня. Проблемы механической стабильности решаются с помощью электронных быстродействующих тюнеров [3] или путем добавления механического демпфера в шток резонатора [4, 5].

ИH-резонатор представляет собой цилиндрический контейнер с трубками дрейфа на встречно-штыревых держателях (interdigital в зарубежной литературе).

Аналогично четвертьволновому резонатору, из-за несимметричного крепления трубок дрейфа ИН-резонатор имеет несимметричное распределение электромагнитного поля. Для выравнивания поля и улучшения электродинамических характеристик структуры используют различные модификации трубок дрейфа и их держателей (рис. 2) [6].

Моделирование электродинамических характеристик четвертьволнового резонатора

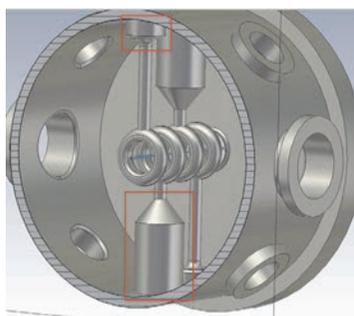
В работе моделировался 2-х зазорный четвертьволновый резонатор, рис.3, работающий на резонансной частоте 81,25 МГц.

Расчет резонатора был начат с построения его физической модели в программе трехмерного электродинамического моделирования. Проводился расчет собственных мод с использованием тетраэдральной сетки. В качестве материала корпуса резонатора и трубок дрейфа в расчете использовался проводник с проводимостью $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м). Расчеты про-

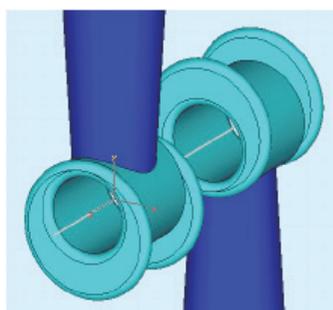
водились при запасенной энергии в объеме резонатора в 1 Дж. Так как наиболее сильное влияние на пучок оказывает электрическое поле в приосевой области, данная область имеет более тонкое сеточное разбиение. Количество ячеек в результате разбиения составило 353 000. Минимальная длина ячейки составила 0,19 мм, а максимальная – 61 мм.

На рис. 3, а представлена конструкция четвертьволнового ускоряющего резонатора. При выборе геометрических размеров учитывались следующие параметры:

- выбранная рабочая частота;
- напряженность электрического поля на внутренней поверхности четвертьволнового резонатора;
- напряженность электрического поля в центре ускоряющего зазора и на поверхности трубок дрейфа;
- На рис. 3, б обозначены основные габаритные размеры построенного резонатора, а их значения приведены – в табл. 1.

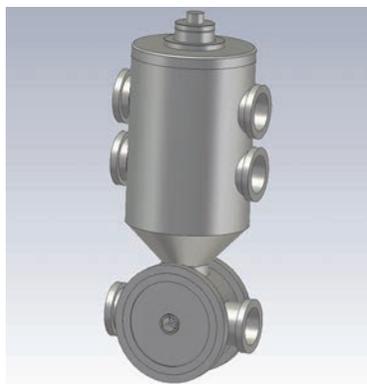


а

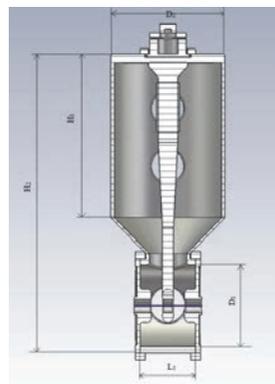


б

Рис. 2. Примеры модификации: а – основание держателя, б – трубка дрейфа ИН-резонатора



а



б

Рис. 3. Четвертьволновой резонатор: а – с патрубками для ввода подвижных плунжеров, б – основные геометрические параметры

Таблица 1

Основные габаритные параметры $\lambda/4$ резонатора

Параметр	Значение
Длина ускоряющей части резонатора L_1 , мм	170
Диаметр ускоряющей части резонатора D_1 , мм	250
Высота цилиндрической части резонатора H_1 , мм	500
Общая высота резонатора H_2 , мм	920
Диаметр цилиндрической части резонатора D_2 , мм	350

Форма корпуса ускоряющей структуры оптимизирована по следующим параметрам: наибольшая собственная добротность (Q), наименьшая реальная мощность ВЧ потерь (P_{real}) и напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа (E_{surf}), не превышающая 1,8 критерия Килпатрика [7] (см. табл. 2).

В результате проведенного моделирования было получено распределение продольной (ускоряющей) компоненты электрического поля на оси четвертьволнового резонатора, график представлен на рис. 4. Колебания поля имеют π -вид.

Настройка четвертьволнового резонатора

После построения и расчета модели ускоряющего резонатора, необходимо провести подстройку рабочей частоты для достижения ее требуемого значе-

ния. Настройка резонансной частоты проведена следующими способами:

- оптимизация геометрии центрального стержня трубки дрейфа (рис. 5);
- введение в объем резонатора через боковые патрубки цилиндрических (подвижных) плунжеров (рис. 6);
- установка на крышке основания корпуса резонатора кольцеобразной накладки (неподвижный плунжер) (рис. 6);

Оптимизация геометрии центрального стержня трубки дрейфа выполнена путем увеличения диаметра основания самого стержня (рис. 5, а), и путем увеличения размеров специальной накладки (бобышки) на стержне (рис. 5, б).

Таблица 2

ЭДХ четвертьволнового резонатора

Параметр	Значение
Длина ускоряющего зазора g , мм	34
Резонансная частота f , МГц	81,25
Собственная добротность Q	9834
Напряженность электрического поля в центре зазора E , кВ/см	80
Напряженность электрического поля на поверхности E_{surf} , кВ/см	200
Нормированная ВЧ мощность собственных потерь P_{norm} , кВт	52
Реальная мощность потерь P_{real} , кВт	59
Реальная запасенная энергия, Дж	1,13

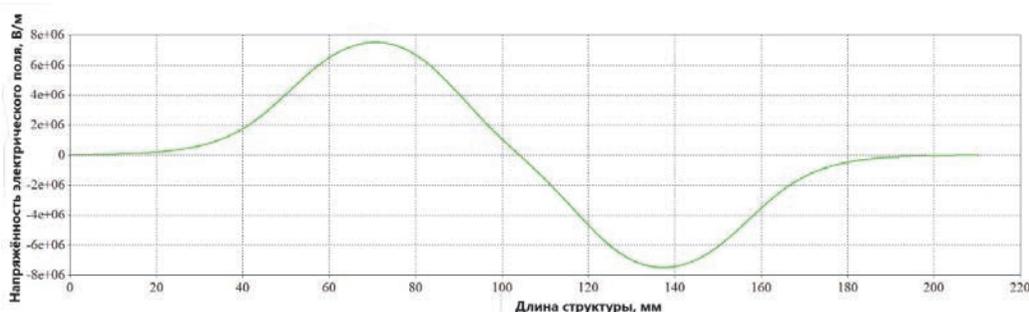


Рис. 4. Распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля на оси четвертьволнового резонатора

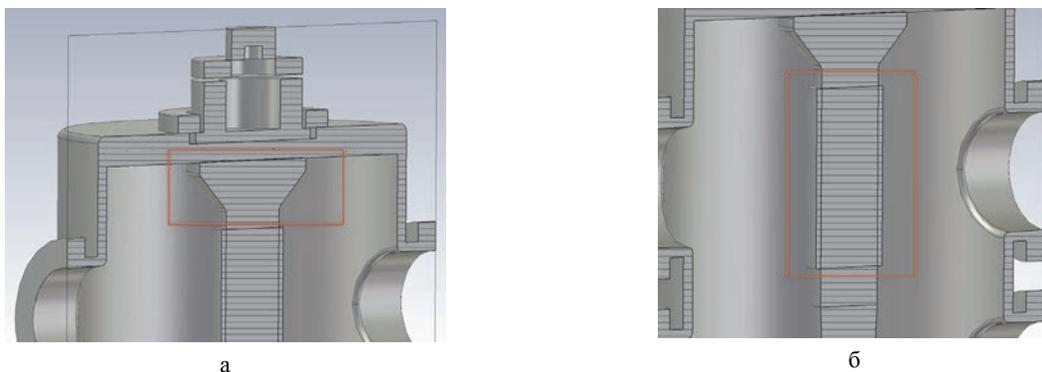


Рис. 5. Моделирование центрального стержня трубки дрейфа: а – увеличение диаметра основания стержня, б – увеличение размеров специальной накладки (бобышки) на стержне. Прямоугольником отмечены места доработки

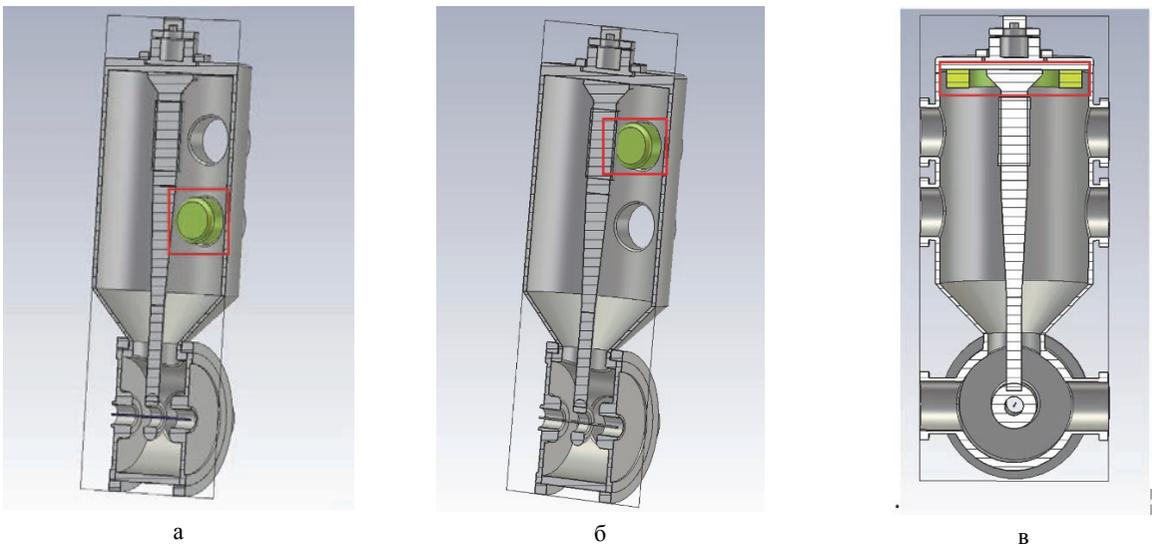


Рис. 6. Моделирование плунжеров: а – подвижный в нижней патрубке, б – подвижный в верхней патрубке, в – неподвижный

После моделирования ускоряющей структуры (центрального стержня) определены зависимости рабочей частоты (f), добротности (Q) и распределения напряженности электрического поля вдоль оси резонатора (E_{surf}) от размеров центрального стержня трубки дрейфа.

В процессе доработки штока варьировался радиус специальной накладки ($R_{боб}$) и радиус основания стержня ($R_{верх}$). Максимальное изменение резонансной частоты наблюдается при $R_{боб} = 35$ мм ($\Delta f = 1$ МГц) и при $R_{верх} = 100$ мм ($\Delta f = 834$ кГц).

Используемые способы оптимизации (настройка рабочей частоты) не оказывают значительного влияния на добротность ($\delta Q < 1\%$) и на распределение напряженности электрического поля вдоль оси резонатора ($\delta E < 1\%$). При этом надо отметить, что подстройка резонансной частоты ускоряющей структуры за счет изменения радиуса бобышки, рис. 5, б, является более удобным вариантом, поскольку доработке подвергается только небольшая часть штока трубки дрейфа.

В процессе работы ускорителя настройка частоты проведена также путем введения в объем резонатора плунжеров (рис. 6): через боковые патрубки подвижных цилиндрических плунжеров (рис. 6, а, б), и путем установки на крышке основания резонатора неподвижных плунжеров (рис. 6, в). При моделировании плунжеров выбирался их фиксированный радиус ($R_{пл}$), варьировалась глубина погружения (h). На рис. 6 плунжеры отмечены прямоугольниками.

Аналогично предыдущему способу, введение плунжеров незначительно ухудшает остальные ЭДХ резонатора ($\delta Q < 1,8\%$ и $\delta E < 1\%$). Также стоит отметить, что плунжер, вводимый в верхний боковой патрубок, рис. 6, б, изменяет частоту в 2 раза больше, чем плунжер, вводимый в нижний боковой патрубок, рис. 6, а. Это связано с тем, что в районе верхнего патрубка сконцентрирована большая плотность магнитного поля. Максимальное изменение

резонансной частоты наблюдается при введении плунжера радиуса $R_{пл} = 40$ мм на глубину $h = 50$ мм в верхний боковой патрубок ($\Delta f = 255$ кГц) и в нижний боковой патрубок ($\Delta f = 152$ кГц), соответственно.

При установке на крышке основания резонатора кольцеобразной накладки (неподвижного плунжера) (рис. 6, в) плунжер представляет из себя кольцо с внешним радиусом $r_{внешн} = 150$ мм. При этом $r_{внешн}$ не менялся в ходе моделирования, варьировался только внутренний радиус кольца $r_{внутр}$ и высота h .

По результатам расчетов определено, что кольцеобразная накладка осуществляет грубую подстройку резонансной частоты. К тому же, неподвижный плунжер ухудшает собственную добротность резонатора на $\delta Q = 3-8\%$. Максимальное изменение резонансной частоты наблюдается при установке плунжера внешнего радиуса $r_{внешн} = 150$ мм и высотой $h = 50$ мм ($\Delta 1,64$ МГц).

Моделирование электродинамических характеристик ИВ-резонатора

В работе исследован 5-и зазорный ИВ-резонатор, рис. 7, работающий на резонансной частоте 162,5 МГц.

Как и в случае четвертьволнового резонатора, расчет ускоряющей структуры был начат с построения ее физической модели в программе трехмерного электродинамического моделирования. Расчет проведен относительно собственных резонансных частот структуры с использованием тетраэдральной сетки. В качестве материала корпуса резонатора и трубок дрейфа в расчете использован проводник с проводимостью $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м). Расчеты проведены при запасенной энергии в 1 Дж. Так как наиболее сильное влияние на пучок оказывает электрическое поле в приосевой области, данная область имеет более частое сеточное разбиение. Количество ячеек в результате разбиения составило 262 000. Минималь-

ная длина ячейки составила 0,27 мм, а максимальная – 77 мм.

На рис. 7, а представлена конструкция ИН-резонатора. При выборе геометрических размеров учитывались следующие параметры:

- выбранная рабочая частота;
- напряженность электрического поля на внутренней поверхности ИН-резонатора;
- напряженность электрического поля в центре ускоряющего зазора и на поверхности трубок дрейфа.

На рис.7, б обозначены основные габаритные размеры построенного ИН-резонатора, а их значения приведены – в табл. 3.

Форма корпуса ускоряющей структуры оптимизирована по следующим параметрам: наибольшая собственная добротность (Q), наименьшая реальная мощность ВЧ потерь (P_{real}) и напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа (E_{surf}), не превышающая 1,8 критерия Килпатрика [7] (см. табл. 4).

В результате моделирования получено распределение продольной (ускоряющей) компоненты электрического поля на оси ИН-резонатора, график представлен на рис. 8.

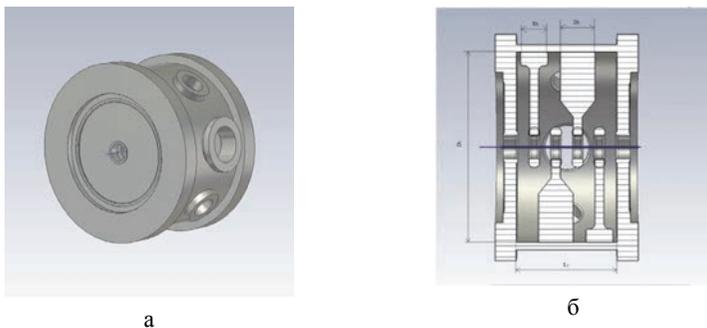


Рис. 7. ИН-резонатор: а – общий вид, б – основные габаритные размеры

Таблица 3

Основные габаритные параметры ИН-резонатора

Параметр	Значение
Длина ускоряющей части резонатора L_1 , мм	222
Диаметр резонатора D_1 , мм	452
Диаметр центральных трубок дрейфа D_2 , мм	76
Диаметр крайних трубок дрейфа D_3 , мм	60

Таблица 4

ЭДХ ИН-резонатора

Параметр	Значение
Длина ускоряющего зазора g , мм	24
Резонансная частота f , МГц	162,5
Собственная добротность Q	7413
Напряженность электрического поля в центре зазора E , кВ/см	86
Напряженность электрического поля на поверхности, кВ/см	250
ВЧ мощность собственных потерь P_{norm} , кВт	139
Реальная мощность потерь P_{real} , кВт	141
Запасенная энергия, Дж	1,03

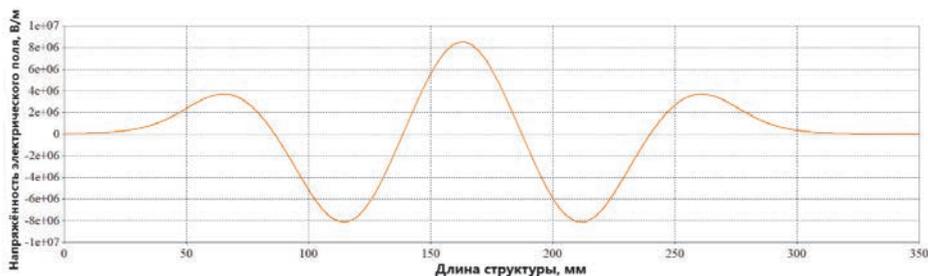


Рис. 8. Распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля на оси ИН-резонатора

Настройка ИВ-резонатора

После построения и расчета модели ускоряющего резонатора, производилась подстройка рабочей частоты для достижения ее требуемого значения. Настройка резонансной (рабочей) частоты проведена следующими способами:

- оптимизация геометрии штоков трубки дрейфа;
- оптимизация геометрии площадок под штоками;
- введение в объем резонатора через боковые патрубки цилиндрических (подвижных) плунжеров;
- установка на торцевых крышках кольцеобразных (неподвижных) плунжеров.

Оптимизация геометрии штоков трубки дрейфа выполнена путем доработки штоков трубок дрейфа и площадки под штоками трубок дрейфа, рис. 9.

Штоки трубок дрейфа и площадки под штоками трубок дрейфа являются наиболее простыми элементами для доработки.

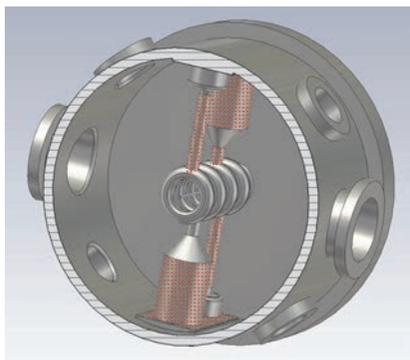


Рис. 9. Места доработки элементов резонатора

В процессе моделирования варьировались ширина ($w_{\text{плоч}}$), высота ($h_{\text{плоч}}$), длина ($l_{\text{плоч}}$) площадки под штоками, радиус ($r_{\text{шт}}$) самого штока трубки дрейфа и радиус ($r_{\text{оп}}$) большей опоры в основании штока соответственно.

Следует отметить, что изменение только площадки под штоками трубок дрейфа грубо меняет резонансную частоту в диапазоне от 2 до 5 МГц, изменение в распределении напряженности электриче-

ского поля составляет $\delta E = 2-4\%$. В свою очередь, уменьшение радиуса штока ($r_{\text{шт}} = 10$ мм – точка сравнения) приводит к заметным изменениям добротности (до 14 %) и резонансной частоты (до 6 МГц), также наблюдается небольшое изменение в распределении поля $\delta E < 3\%$. Наконец, изменение радиуса большей опоры ($r_{\text{шт}} = 38$ мм – точка сравнения) приводит к пренебрежимо малому изменению добротности, а изменение распределения поля составляет $\delta E = 1-4\%$ при изменении резонансной частоты до 5,3 МГц.

Как и в случае четвертьволнового резонатора, настройка резонансной частоты проведена также путем введения в объем резонатора плунжеров (рис. 10): через боковые патрубки подвижных цилиндрических плунжеров (рис. 10, б, в), и путем установки на крышке основания резонатора неподвижных плунжеров (рис. 10, а). На рис. 10 плунжеры отмечены прямоугольниками.

При моделировании неподвижных плунжеров, рис.10, а, с фиксированным радиусом ($R_{\text{пл}}$) поперечного сечения варьировалась глубина их погружения (h) в объем резонатора.

Наибольшее влияние на резонансную частоту оказывает плунжер, вводимый через боковой патрубок, рис.10, б, в. Изменение добротности в случае подвижных плунжеров не превышает $\delta Q \leq 1,3\%$, а изменение распределения поля – $\delta E \leq 0,5\%$ при изменении рабочей частоты $\Delta f = 100-600$ кГц. Максимальное изменение резонансной частоты достигается путем введения подвижного цилиндрического плунжера радиуса $R_{\text{пл}} = 50$ мм на глубину $h = 100$ мм в боковой патрубков ($\Delta f = 526$ кГц), радиуса $R_{\text{пл}} = 32$ мм на глубину $h = 90$ мм в верхний, рис.10, в, и нижний, рис.10, б, боковые патрубки ($\Delta f = 531$ кГц).

В свою очередь, использование кольцеобразной накладки, рис.10, а, грубо изменяет резонансную частоту и добротность резонатора ($\delta Q = 5,6\%$). Изменение напряженности ЭМ поля в данном случае не превышает $\delta E \leq 1,5\%$ при максимальном изменении рабочей частоты $\Delta f = 2,5$ МГц.

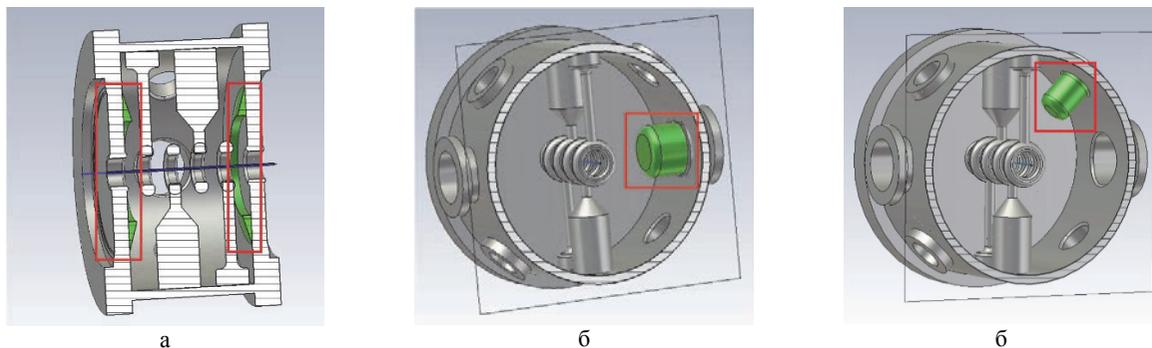


Рис. 10. Моделирование плунжеров: а – неподвижный, б – подвижный в нижнем патрубке, в – подвижные в верхнем патрубке

В данной работе представлены результаты исследований объемных моделей ускоряющих резонаторов с трубками дрейфа, работающих на частоте 81,25 МГц (четвертьволновый резонатор) и 162,5 МГц (ИН-резонатор), соответственно, выполненные в программе трехмерного электродинамического моделирования, и результаты расчетов их основных электродинамических характеристик.

В работе рассмотрены основные способы подстройки резонансной частоты ускоряющих структур на основе четвертьволнового резонатора и ИН-резонатора.

По результатам расчетов $\lambda/4$ резонатора и ИН-резонатора можно сделать следующие выводы:

- все представленные способы настройки резонансной частоты не вносят значимых ухудшений в другие электродинамические характеристики ($\lambda/4$ резонатор);
- кольцеобразная накладка (неподвижный плунжер) осуществляет грубую подстройку резонансной частоты;
- для настройки рабочей частоты можно оптимизировать конструкцию штоков трубок дрейфа, что является наилучшим вариантом, так как изменяется относительно небольшая часть резонатора;
- цилиндрические плунжеры, вводимые в боковые патрубки, возможно использовать для автоматической регулировки резонансной частоты.

1. Von Chuan Zhang aus Zhejiang. Linac Design for Intense Hadron Beams: Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften. Frankfurt am Main, 2009.

2. Padamsee H. Design Topics for Superconducting RF Cavities and Ancillaries. New York: Cornell University, CLASSE, Ithaca, 2015

3. Added N. et. al. Upgraded phase control system for superconducting low velocity accelerating structure / Proc. LINAC 1992 // Linear Accelerator Conference, Ottawa, Ontario, 1992. P. 181.

4. Facco A. et al. On-line performance of the LNL mechanically damped superconducting low beta resonators / Proc. EPAC 1998 // European Particle Accelerator Conference, Stockholm, 1998. P. 1846.

5. Facco A., Zinkann G. Mechanical mode damping in superconducting low- β resonators // Part. Accel. 1998. Vol. 61. P. 265–278.

6. Kurennoy S. S., Rybarcyk L. J., O'Hara J. F., Olivas E. R., Wangler T. P. H-mode accelerating structures with permanent-magnet quadrupole beam focusing // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2012. Vol. 15.

7. Kilpatrick W. D. A Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC / The Review of Scientific Instruments, 1957. N 28.