

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
УСКОРЯЮЩЕГО ДВУХАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ
ДРЕЙФА¹

©2024г. А. Л. Ситников^{а,*}, Д. Н. Селезнев^а, Г. Н. Кропачев^а,
А. И. Семенников^а, Т. В. Кулевой^а, А. М. Опекунов^б, М. Л. Сметанин^б

^а *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"*

Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

^б *Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
(ВНИИЭФ)*

Россия, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37

**e-mail: aleksey.sitnikov@itep.ru*

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

В ККТЭФ НИЦ "Курчатовский Институт" ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 8$, энергией 4 МэВ/н и током 10 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ), работающего на частоте 40 МГц, и двух ускоряющих структур с трубками дрейфа DTL₁ и DTL₂, работающих соответственно на частотах 80 и 160 МГц. Предполагается, что ускоряющая структура DTL₁ будет состоять из 12 двухазорных четвертьволновых резонаторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективной является схема, когда ускоритель состоит из двух секций: RFQ и DTL, между которыми осуществляется 6-мерное согласование пучка [1]. Секция DTL построена по модульному принципу и состоит из цепочки отдельных, индивидуально

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск.

фазуемых H-резонаторов, с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между ними. Такое построение DTL обеспечивает компактность ускорителя, допускает посекционную настройку и последовательный ввод в действие.

В данной работе представлен выбор ускоряющего двухзазорного резонатора с трубками дрейфа и представлены его электродинамические характеристики (ЭДХ).

2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА DTL₁

Типичный вид четвертьволнового резонатора представлен на рис. 1. Форма корпуса резонатора DTL₁ была оптимизирована с точки зрения наибольшей собственной добротности, ВЧ-мощности собственных потерь и напряженности электрического поля на поверхности трубок дрейфа (см. табл. 1). Однако такая форма не позволяет разместить два резонатора ближе друг к другу, чем $|\Delta z| = 278$ мм. С учетом динамики пучка в ускорительном канале [2] расстояние между четвертьволновыми резонаторами должно быть не больше чем 200 мм.

В связи с этим было принято решение уменьшить диаметр основания корпуса резонатора (см. рис. 2). Это позволит разместить резонаторы максимально близко друг другу в положении, когда трубки дрейфа во всех резонаторах будут “висеть”. ЭДХ четвертьволнового резонатора представлены в табл. 2. Как следует из табл. 2, собственная добротность и ВЧ-мощность собственных потерь резонатора, представленного на рис. 2, несколько хуже аналогичных параметров резонатора, представленного на рис. 1 (см. табл. 1). Это объясняется меньшим диаметром основания корпуса резонатора, а следовательно, и большей плотностью поверхностных токов.

Таблица 1. ЭДХ четвертьволнового резонатора

Длина зазора, мм	31
Напряженность электрического поля на оси резонатора в центре зазора, кВ/см	80
Собственная добротность	12000
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	54

Рис. 1. Типичный вид двухзазорного четвертьволнового резонатора.

Рис. 2. Конструкция четвертьволнового резонатора с уменьшенным диаметром основания корпуса.

Таблица 2. ЭДХ четвертьволнового резонатора конструкции

Длина зазора, мм	34
Напряженность электрического поля на оси резонатора в центре зазора, кВ/см	80
Собственная добротность	9600
ВЧ-мощность собственных потерь, кВт	60

3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ РЕЗОНАТОРОВ DTL₁

Было проведено моделирование нагрева и его влияния на геометрические размеры резонаторов DTL₁. Моделирование проводилось при начальных условиях, представленных в табл. 3. Моделирование термомеханических деформаций резонаторов DTL₁ проводилось для резонаторов, выполненных из нержавеющей стали. Внутренняя часть резонатора покрыта слоем меди толщиной 40 мкм, шток и трубка дрейфа из полированной меди марки М0б. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL₁ представлены в табл. 4.

Таблица 3. Начальные данные для моделирования термомеханических деформаций

Длительность ВЧ-импульса, мкс	300
Частота повторения ВЧ-импульсов, Гц	1
Скважность	3333
Температура окружающей среды, °С	20
Конвективный теплообмен с внешней средой, Вт/(м · К)	10

Таблица 4. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL₁

Внешняя поверхность резонатора	Полированная нержавеющая сталь	0.3
Внутренняя поверхность резонатора	Матовая медь	0.22
Шток и трубка дрейфа	Полированная медь	0.07

Был промоделирован первый и последний резонатор группы DTL₁. Значения импульсной и средней ВЧ-мощности резонаторов DTL₁ при разной длине ускоряющих зазоров g представлены в табл. 5.

Таблица 5. Импульсная и средняя ВЧ-мощность резонаторов DTL₁

Параметры	$g = 34$ мм	$g = 48$ мм
Напряженность на оси в центре ускоряющего зазора E_0 , кВ/см	80	80
Импульсная ВЧ-мощность P_0 , кВт	60	90
Средняя ВЧ-мощность P_{cp} , Вт	18	27

Результаты расчета нагрева резонатора DTL₁ с $g = 34$ мм представлены на рис. 3. Как видно на рис. 3, самое горячее место в резонаторе – это трубка дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 39 °С и 47 °С для первого и последнего резонаторов соответственно.

Рис. 3. Нагрев резонаторов DTL₁ с $g = 34$ мм.

Термомеханические деформации резонатора DTL₁ с длиной ускоряющего зазора $g = 34$ мм показаны на рис. 4. Деформации резонатора с $g = 48$ мм имеют аналогичный вид. Данные по деформации резонаторов DTL₁ сведены в табл. 6, также там представлены данные по деформации резонатора DTL₁ с $g = 34$ мм без нагрева.

Рис. 4. Термомеханические деформации резонатора DTL₁ по оси y с $g = 34$ мм.

Таблица 6. Термомеханическая деформация резонаторов DTL₁

Оси	$g = 34$ мм (без нагрева)	$g = 34$ мм	$g = 48$ мм
Δx , мм	0.001	0.016	0.023
Δy , мм	0.027	0.241	0.342
Δz , мм	0.001	0.014	0.021

Как следует из табл. 6 деформация по оси y составляет 0.241 мм. Такое смещение трубки дрейфа неприемлемо, потому что оно больше требуемого допуска на юстировку резонатора и его нельзя компенсировать во время работы резонатора.

Для того чтобы охладить резонатор DTL₁ и, в частности шток и трубку дрейфа, необходимо предусмотреть канал охлаждения в штоке резонатора. В штоках трубки дрейфа резонаторов DTL₁ с $g = 34$ мм и $g = 48$ мм был сделан канал охлаждения с $\varnothing 10$ мм и длиной 700 мм. Коэффициент принудительной водяной конвекции был взят минимальный и равный $\alpha = 300$ Вт/(м·К). Результаты расчета нагрева резонатора DTL₁ с $g = 34$ мм с каналом водяного охлаждения штока трубки дрейфа представлены на рис. 5. Как видно на рис. 5, самое горячее место в резонаторе сместилось с трубки дрейфа на основание штока трубки дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 21.6 °С и 22.4 °С для первого и последнего резонаторов соответственно. А температура основания штока трубки дрейфа – 22.1 °С и 23.1 °С соответственно.

Термомеханические деформации резонаторов DTL₁ с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа представлены в табл. 7.

Таблица 7. Термомеханическая деформация резонаторов DTL₁ с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа

Оси	$g = 34$ мм	$g = 48$ мм
Δx , мм	0.0025	0.0036
Δy , мм	0.0481	0.0600
Δz , мм	0.0025	0.0037

Из табл. 7 следует, что термомеханические деформации укладываются в допуск на юстировку резонатора. Однако данные деформации, возникающие в процессе работы, будут изменять ЭДХ резонаторов, в частности их резонансные частоты. Было проведено моделирование с целью оценки влияния термомеханических деформаций на изменение резонансной частоты резонаторов DTL₁. Так, резонансная частота изменяется на $\Delta f = 4$ кГц и на $\Delta f = 5$ кГц для резонаторов DTL₁ с $g = 34$ мм и $g = 48$ мм соответственно.

Рис. 5. Нагрев резонатора DTL₁ с $g = 34$ мм с каналом охлаждения штока трубки дрейфа.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен выбор формы резонаторов DTL₁, которая, с одной стороны, обеспечивает необходимые ЭДХ резонаторов, а с другой – позволяет разместить между резонаторами квадрупольные магнитные линзы. Также в работе обоснована необходимость обеспечить охлаждение штоков трубок дрейфа резонаторов группы DTL₁. Охлаждение необходимо, чтобы минимизировать термомеханические деформации. Изменение

резонансной частоты резонаторов группы DTL₁, вызванное термомеханическими деформациями, может быть компенсировано подстроечными плунжерами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. V. 13. № 6. P. 1126.
<http://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
2. *Кропачев Г.Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Завьялов Н. В.* // Сибирский физический журнал. 2024. (принята к печати).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Типичный вид двухззорного четвертьволнового резонатора.
- Рис. 2.** Конструкция четвертьволнового резонатора с уменьшенным диаметром основания корпуса.
- Рис. 3.** Нагрев резонаторов DTL_1 с $g = 34$ мм.
- Рис. 4.** Термомеханические деформации резонатора DTL_1 по оси y с $g = 34$ мм.
- Рис. 5.** Нагрев резонатора DTL_1 с $g = 34$ мм с каналом охлаждения штока трубки дрейфа.

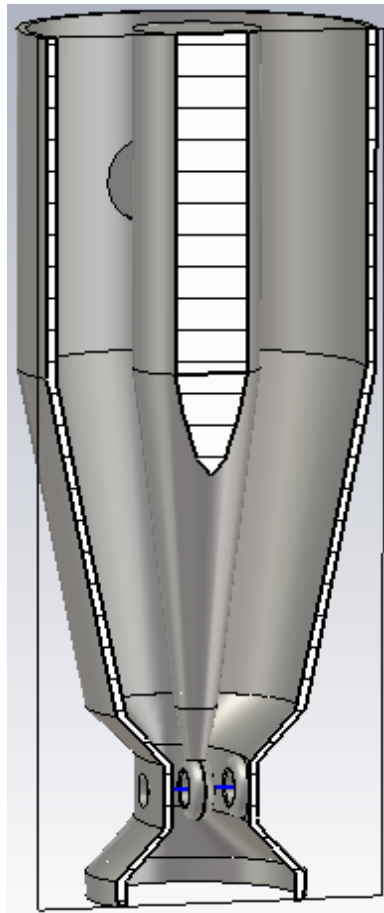


Рис. 1.

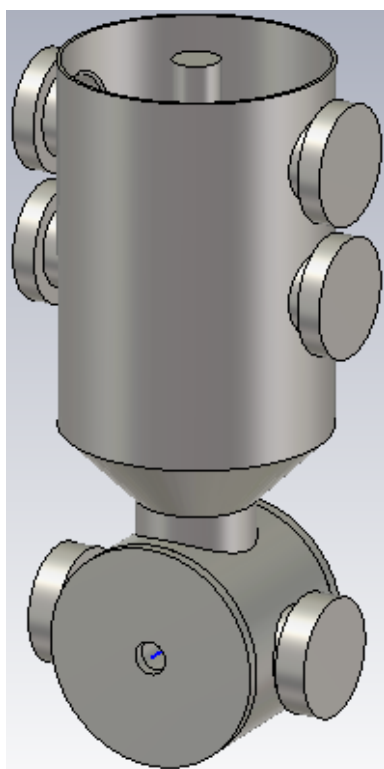


Рис. 2.

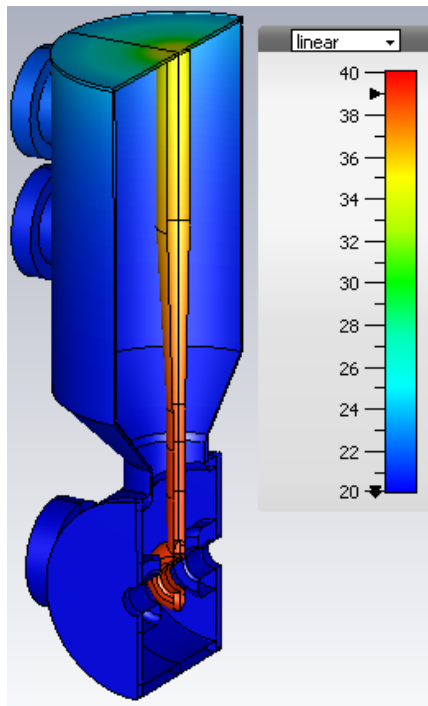


Рис. 3.

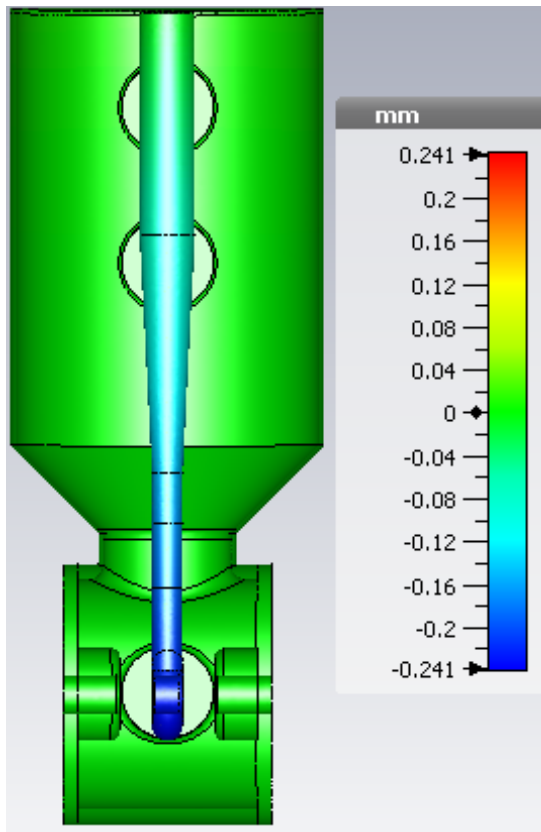


Рис. 4.

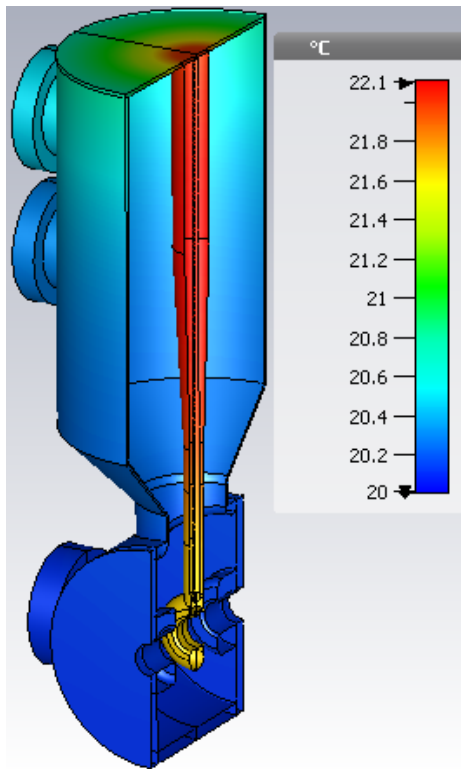


Рис. 5.

Для связи с авторами:

Ситников Алексей Леонидович

aleksev.sitnikov@itep.ru

Селезнев Дмитрий

selesnev@itep.ru

Кропачев Геннадий

kropachev@itep.ru

Для переводчика:

THE RF PARAMETERS OF 2-GAPS DRIFT TUBE LINAC

A. L. Sitnikov¹, D. N. Selesnev¹, G. N. Kropachev¹, A. I. Semennikov¹, T. V.

Kulevoy¹ A. M. Opekunov², M. L. Smetanin²

¹*NRC “Kurchatov Institute” KCTEP,*

Moscow, Russia

²*All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF),*

Sarov, Nizhniy Novgorod Region, Russia

Abstract.

The linear accelerator (linac) with a mass-to-charge ratio of $A/Z = 8$, an energy of 4 MeV/n and a current of 10 mA is under develop at NRC Kurchatov Institute. The linac consists of an accelerator with radio frequency quadrupole (RFQ) operating at a frequency of 40 MHz, and two accelerating structures with drift tubes operating at frequencies of 80 and 160 MHz, respectively.

It is assumed that the accelerating structure of DTL_1 will consist of 12 2-gaps quarter-wave resonators.