

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
УСКОРЯЮЩЕГО ПЯТИАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ  
ДРЕЙФА<sup>1</sup>

©2024г. А. Л. Ситников<sup>а,\*</sup>, Д. Н. Селезнев<sup>а</sup>, Г. Н. Кропачев<sup>а</sup>, А. И. Семенников<sup>а</sup>,  
Т. В. Кулевой<sup>а</sup>, А. М. Опекунов<sup>б</sup>, М. Л. Сметанин<sup>б</sup>

<sup>а</sup> *Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"*

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

<sup>б</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ)*

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

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 11.04.2024 г.

\*e-mail: [aleksey.sitnikov@itep.ru](mailto:aleksey.sitnikov@itep.ru)

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 DTL<sub>1</sub> и DTL<sub>2</sub>, работающих соответственно на частотах 80 и 160 МГц. Предполагается, что ускоряющая структура DTL<sub>2</sub> будет состоять из 28 пятиазорных H-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 фазируемых H-резонаторов, с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между ними. Такое

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

построение DTL обеспечивает компактность ускорителя, допускает посекционную настройку и последовательный ввод в действие.

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

## 2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА DTL<sub>2</sub>

В качестве третьей ускоряющей структуры было предложено использовать пятизорный ИИ-резонатор. Типичный вид ИИ-резонатора представлен на рис. 1. Согласно расчету динамики пучка [2], амплитуда ускоряющего поля в центральных зазорах должна быть равна между собой, амплитуда поля в крайних зазорах должна составлять половину от амплитуды центральных (см. рис. 2). Для того чтобы обеспечить подобное распределение поля, диаметры опор трубок дрейфа были выбраны разными (см. рис. 1).

**Рис. 1.** Общий вид ИИ-резонатора DTL<sub>2</sub>

**Рис. 2.** Требуемое распределение электрического поля на оси ИИ-резонатора.

Важно отметить, что длина ускоряющих зазоров и амплитуда ускоряющего электрического поля увеличивается от резонатора к резонатору. Зависимость ВЧ-мощности от длины ускоряющего зазора представлена на рис. 3. Как видно на рис. 3, рост требуемой ВЧ-мощности пропорционален темпу ускорения.

**Рис. 3.** График зависимости мощности ВЧ-потерь и темпа ускорения от длины ускоряющих зазоров.

Максимальная напряженность электрического поля наблюдается на поверхности трубок дрейфа (см. рис. 4), пропорциональна амплитуде поля в центре зазора и обратно пропорциональна площади поверхности трубок дрейфа. Чтобы напряженность поля на поверхности не превышала  $1.8 K_p$  (в единицах Килпатрика), необходимо либо снижать амплитуду поля, либо увеличивать поверхность трубок дрейфа. Закон изменения амплитуды поля задается динамикой пучка и, как было сказано выше, растет от резонатора к резонатору. Таким образом, чтобы напряженность поля не превышала предельного значения, поверхность трубок дрейфа должна постоянно увеличиваться.

**Рис. 4.** Напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа при запасенной энергии 1 Дж.

Наиболее очевидным способом увеличения поверхности трубок дрейфа является увеличение их диаметров. Это, в свою очередь, приводит к изменению резонансной частоты резонаторов DTL<sub>2</sub>. Для компенсации изменения резонансной частоты можно, например, изменять диаметр резонатора. Такой подход не оптимален с точки зрения изготовления резонаторов, поскольку каждый резонатор DTL<sub>2</sub> будет иметь свой уникальный диаметр. Второй подход заключается в варьировании других геометрических размеров с целью подстройки частоты. Например, это может быть варьирование диаметров опор трубок дрейфа (см. рис. 5).

**Рис. 5.** Резонатор DTL<sub>2</sub> (указаны места варьирования диаметров опор трубок дрейфа).

Недостатком подхода по компенсации изменения резонансной частоты за счет изменения диаметров опор трубок дрейфа при одинаковом диаметре резонатора является то, что ЭДХ резонаторов DTL<sub>2</sub> получаются не оптимальными. В частности, требуемая ВЧ-мощность при вариации диаметра резонаторов для запитки всех резонаторов составляет  $P_0 = 3.9$  МВт, а при постоянном диаметре и вариации диаметров опор трубок дрейфа  $P_0 = 4.1$  МВт.

### 3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕЗОНАТОРА DTL<sub>2</sub>

Было проведено моделирование нагрева и его влияния на геометрические размеры резонаторов DTL<sub>2</sub>. Моделирование проводилось при начальных условиях, представленных в табл.1.

**Таблица 1.** Начальные данные для моделирования тепломеханических 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

Моделирование термомеханических деформаций резонаторов DTL<sub>2</sub> проводилось для резонаторов, выполненных из нержавеющей стали. Внутренняя часть резонатора покрыта слоем меди толщиной 40 мкм, штоки трубок дрейфа и трубки дрейфа выполнены из полированной меди марки М0б. Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL<sub>2</sub> представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Коэффициенты излучения различных элементов резонаторов DTL<sub>2</sub>

Внешняя поверхность резонатора	Полированная нержавеющая сталь	0.3
Внутренняя поверхность резонатора	Матовая медь	0.22
Штоки трубок дрейфа и трубки дрейфа	Полированная медь	0.07

Поскольку импульсная ВЧ-мощность резонаторов DTL<sub>2</sub> растет с ростом энергии пучка, было промоделировано два резонатора DTL<sub>2</sub> – первый и последний по пучку. Значения импульсной и средней ВЧ-мощности резонаторов DTL<sub>2</sub> при разной длине ускоряющих зазоров <sup>g</sup> представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Импульсная и средняя ВЧ-мощность резонаторов DTL<sub>2</sub>

Параметры	$g = 24$ мм	$g = 42$ мм
Напряженность на оси в центре ускоряющего зазора $E_0$ , кВ/см	77	107
Импульсная ВЧ-мощность $P_0$ , кВт	150	200
Средняя ВЧ-мощность $P_{cp}$ , Вт	45	60

Результаты расчета нагрева резонаторов DTL<sub>2</sub> представлены на рис. 6. Как видно на рис. 6, самое горячее место в резонаторах – это трубка дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 40°C и 37°C для первого и последнего резонаторов соответственно.

**Рис. 6.** Нагрева резонаторов DTL<sub>2</sub>.

Термомеханические деформации резонатора DTL<sub>2</sub> с длиной ускоряющего зазора  $g = 24$  мм показаны на рис. 7. Деформации резонатора с  $g = 42$  мм имеют аналогичный вид. Данные по деформации резонаторов DTL<sub>2</sub> сведены в табл. 4, также там представлены данные по деформации резонатора DTL<sub>2</sub> с  $g = 24$  мм без нагрева.

**Таблица 4.** Термомеханическая деформация резонаторов DTL<sub>2</sub>

Оси	$g = 24$ мм (без нагрева)	$g = 24$ мм	$g = 42$ мм
$\Delta x$ , мм	0.0004	0.0243	0.0225
$\Delta y$ , мм	0.0005	0.0692	0.0520
$\Delta z$ , мм	0.0004	0.0984	0.0662

**Рис. 7.** Термомеханические деформации резонатора DTL<sub>2</sub> по оси  $y$  с  $g = 24$  мм.

Как следует из табл. 4, деформация по оси  $y$  составляет 0.07 мм. Такое смещение трубки дрейфа неприемлемо, потому что:

- оно больше требуемого допуска на юстировку резонатора;
- его нельзя компенсировать во время работы резонатора.

Для того чтобы охладить резонатор DTL<sub>2</sub> и, в частности шток и трубку дрейфа, необходимо предусмотреть канал охлаждения в штоке резонатора. В штоках трубки дрейфа резонаторов DTL<sub>2</sub>

с  $g = 24$  мм и  $g = 42$  мм был сделан канал охлаждения с  $\varnothing 10$  мм и длиной 150 мм. Коэффициент принудительной водяной конвекции был взят минимальный и равный  $\alpha = 300$  Вт/(м·К). В результате расчета было получено, что самое горячее место в резонаторах сместилось с трубки дрейфа на основании штока трубки дрейфа. Температура на трубке дрейфа составляет 26 °С и 28 °С для первого и последнего резонаторов соответственно.

Термомеханические деформации резонаторов DTL<sub>2</sub> с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Термомеханическая деформация резонаторов DTL<sub>2</sub> с каналом охлаждения штоков трубок дрейфа

Оси	$g = 24$ мм	$g = 42$ мм
$\Delta x$ , мм	0.016	0.016
$\Delta y$ , мм	0.019	0.023
$\Delta z$ , мм	0.063	0.044

Из табл. 5 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 DTL<sub>2</sub>. Так, резонансная частота изменяется на  $\Delta f = 86$  кГц и на  $\Delta f = 45$  кГц для резонаторов DTL<sub>2</sub> с  $g = 24$  мм и  $g = 42$  мм соответственно.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

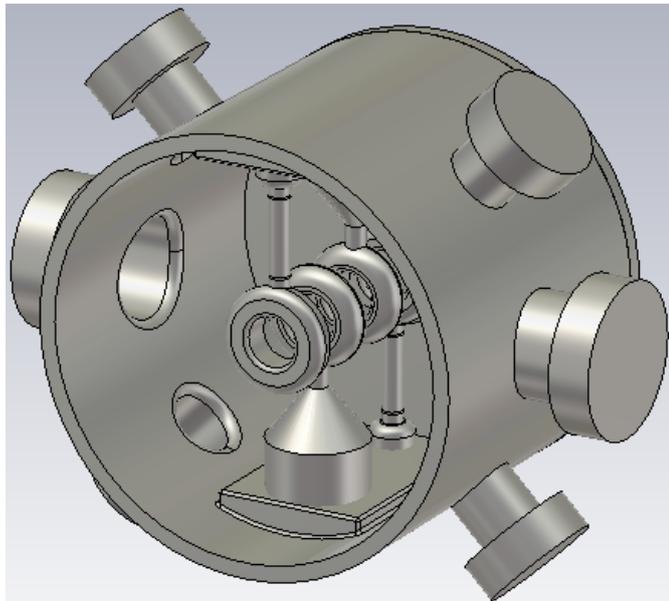
В работе определены параметры резонаторов DTL<sub>2</sub>, при которых достигается заданное динамикой распределение поля. Оптимизированы диаметры трубок дрейфа, при которых напряженность на поверхности трубок не превышает 1.8 Кр. Также обоснована необходимость обеспечить охлаждение штоков трубок дрейфа резонаторов группы DTL<sub>2</sub>. Охлаждение необходимо, чтобы минимизировать термомеханические деформации. Изменение резонансной частоты резонаторов группы DTL<sub>2</sub>, вызванное термомеханическими деформациями, может быть компенсировано подстроечными плунжерами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

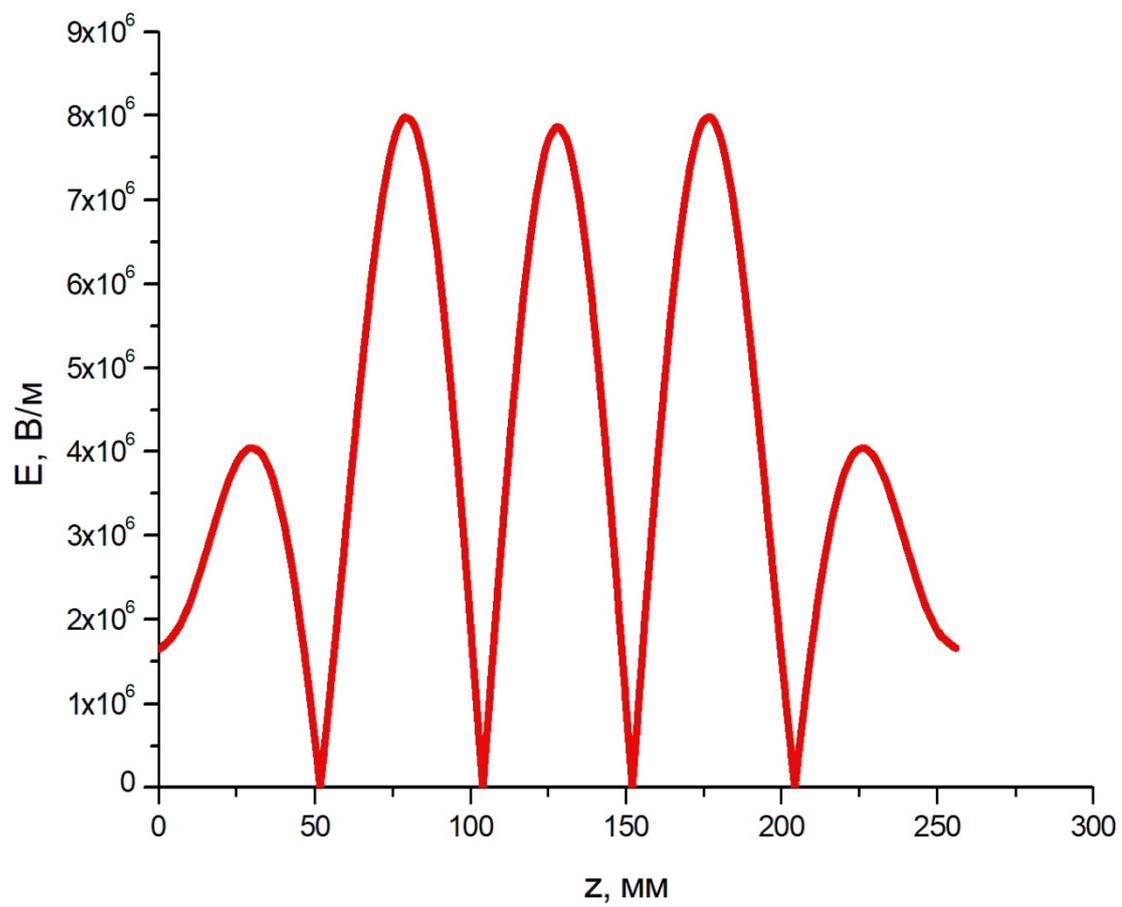
1. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. V. 13. № 6. P. 1126. <http://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
2. *Кропачев Г.Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов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

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Общий вид ИИ резонатора DTL<sub>2</sub>.
- Рис. 2.** Требуемое распределение электрического поля на оси ИИ-резонатора.
- Рис. 3.** График зависимости мощности ВЧ-потерь и темпа ускорения от длины ускоряющих зазоров.
- Рис. 4.** Напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа при запасенной энергии 1 Дж.
- Рис. 5.** Резонатор DTL<sub>2</sub> (указаны места варьирования диаметров опор трубок дрейфа).
- Рис. 6.** Нагрева резонаторов DTL<sub>2</sub>.
- Рис. 7.** Термомеханические деформации резонатора DTL<sub>2</sub> по оси  $u_g = 24$  мм.



**Рис. 1.**



**Рис. 2.**

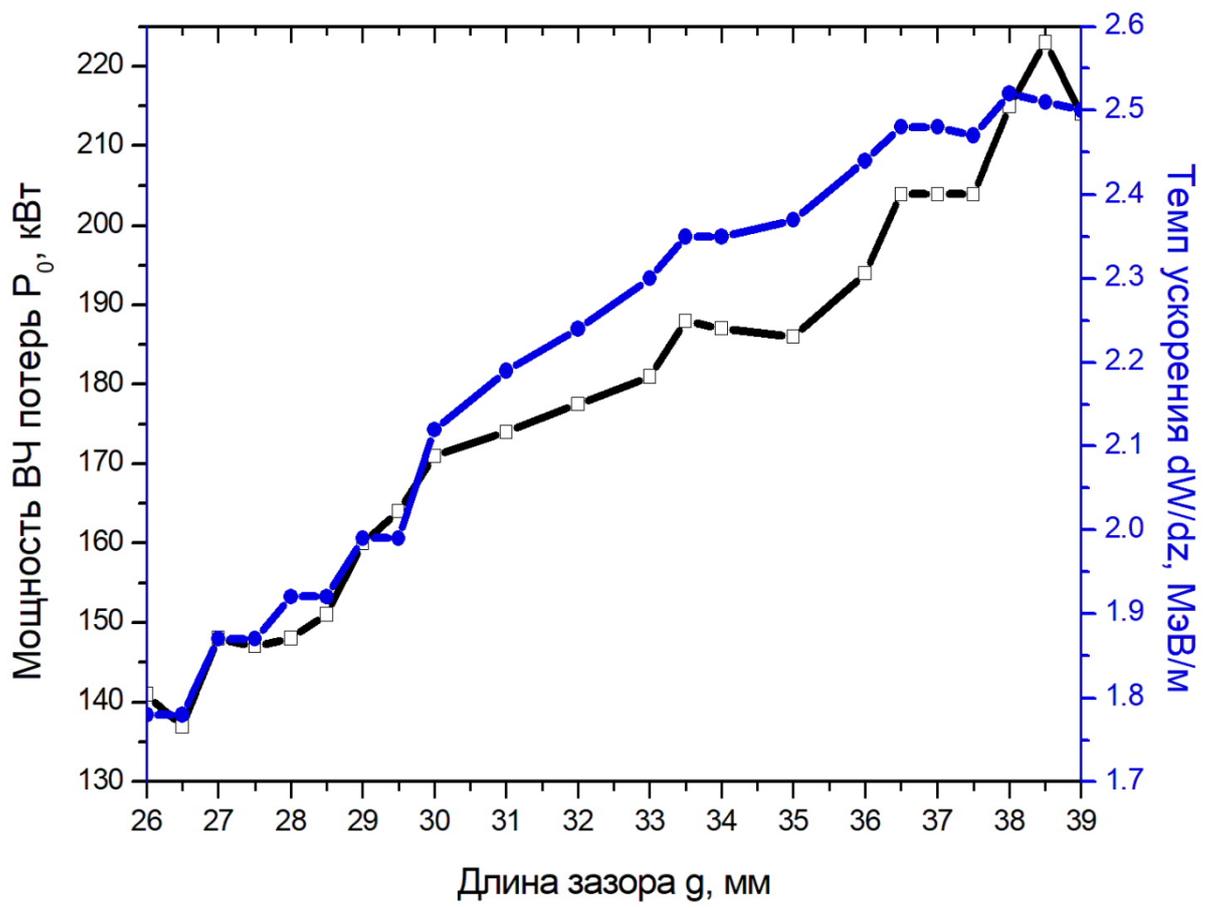
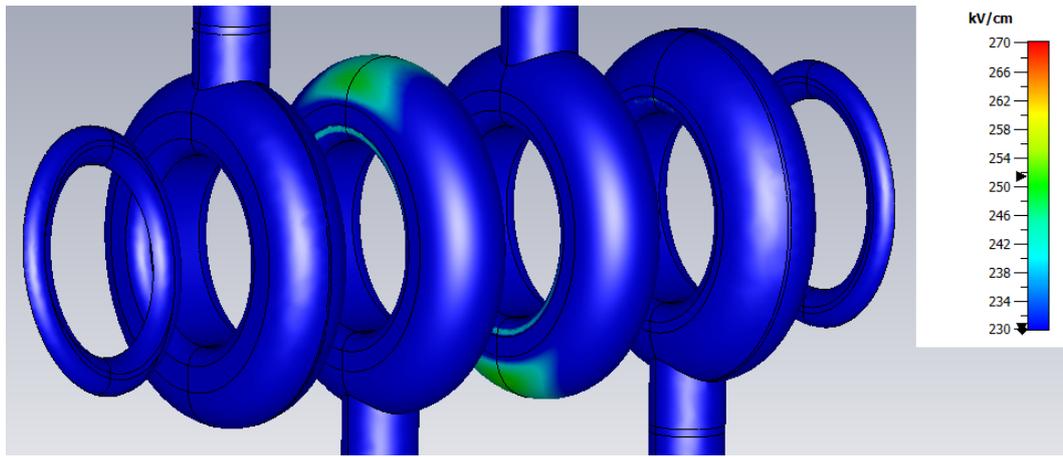
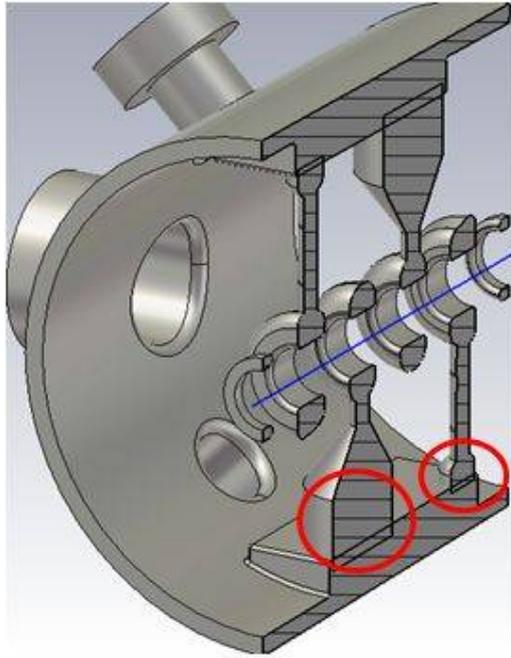


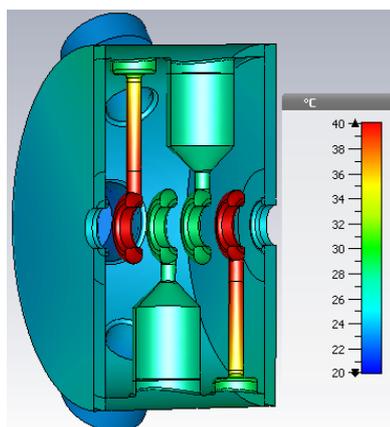
Рис. 3.



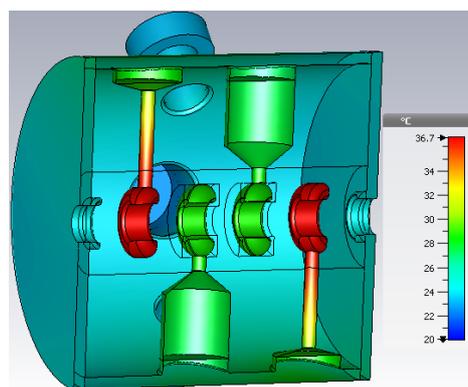
**Рис. 4.**



**Рис. 5.**

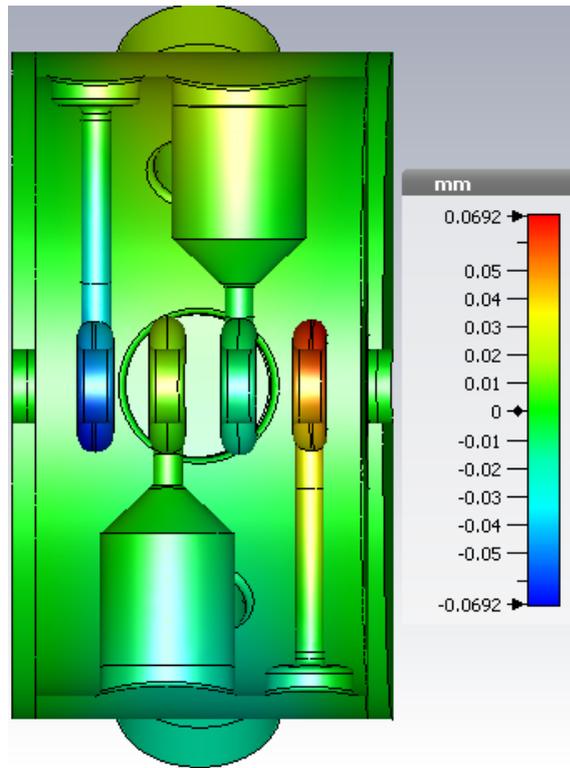


$g = 24 \text{ мм}$



$g = 42 \text{ мм}$

**Рис. 6.**



**Рис. 7.**

Ситников Алексей Леонидович

[aleksey.sitnikov@itep.ru](mailto:aleksey.sitnikov@itep.ru)

Селезнев Дмитрий

[selesnev@itep.ru](mailto:selesnev@itep.ru)

Кропачев Геннадий

[kropachev@itep.ru](mailto:kropachev@itep.ru)

## THE RF PARAMETERS OF 5-GAPS DRIFT TUBE LINAC

**A. L. Sitnikov<sup>1</sup>, D. N. Selesnev<sup>1</sup>, G. N. Kropachev<sup>1</sup>, A. I. Semennikov<sup>1</sup>, T. V. Kulevoy<sup>1</sup>  
A. M. Opekunov<sup>2</sup>, M. L. Smetanin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*NRC “Kurchatov Institute” КСТЕР,*

*Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*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<sub>2</sub> will consist of 28 5-gaps quarter-wave resonators.