

P9-2013-49

Н. С. Азарян, М. А. Батурицкий<sup>а</sup>, Ю. А. Будагов,  
В. В. Глаголев, Д. Л. Демин, С. В. Колосов<sup>б</sup>, А. А. Кураев<sup>б</sup>,  
Т. Л. Попкова<sup>б</sup>, А. О. Рак<sup>б</sup>, А. К. Сеницын<sup>б</sup>,  
Г. В. Трубников, Г. Д. Ширков, Н. М. Шумейко<sup>а</sup>

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СОПРЯЖЕНИЯ  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО НИОБИЕВОГО РЕЗОНАТОРА  
С ТРУБКОЙ ДРЕЙФА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ**

---

<sup>а</sup> НИУ «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий» Белорусского государственного университета (НЦ ФЧЭ БГУ), Минск

<sup>б</sup> УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР), Минск

Азарян Н. С. и др.

P9-2013-49

Влияние геометрии сопряжения сверхпроводящего ниобиевого резонатора с трубкой дрейфа на его характеристики

На основе численного моделирования исследовано влияние геометрии сопряжения сверхпроводящего ниобиевого резонатора с трубкой дрейфа. Расчетным путем установлено преимущество эллиптического сопряжения резонатора с трубкой дрейфа по сравнению с сопряжением по окружности: вариант с эллипсом на 7–10 % снижает максимальную величину напряженности электрического поля на стенке резонатора.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Azaryan N. S. et al.

P9-2013-49

The Influence of the Conjugation Geometry of a Superconducting Niobium Cavity with a Drift Pipe on Its Characteristics

Using numerical recipes geometry of connection of superconductive niobium cavity with beam-pipe is investigated. Calculations show the advantage of elliptical connection of the cavity with the beam-pipe in comparison with connection by circle: elliptical connection allows reducing the maximum electric field strength at the cavity wall by 7–10 %.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках участия Объединенного института ядерных исследований в проекте Международного линейного коллайдера (International Linear Collider — ILC) [1, 2] в 2010 г. инициированы работы по созданию сверхпроводящих СВЧ-резонаторов из ниобия силами ведущих научно-исследовательских организаций Республики Белоруссии [3]. Для компьютерного моделирования СВЧ-резонатора в этих работах задействован Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР).

Общий вид одноячеечного резонатора представлен на рис. 1.

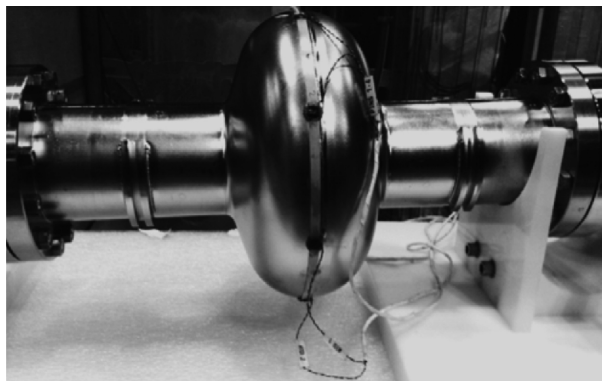


Рис. 1. Внешний вид одноячеечного резонатора

При изготовлении таких резонаторов предъявляются очень высокие требования к обеспечению его основных характеристик. Собственная добротность должна быть не менее  $10^{10}$ , чтобы обеспечить величину ускоряющего градиента на оси около  $E_{\text{acc}} \approx 300\text{--}350$  кВ/см при ограничении на величины пробивного напряжения и магнитного поля на внутренней поверхности. Должна быть обеспечена возможность настройки заданной собственной частоты 1,3 ГГц резонатора при неизбежном отклонении геометрических размеров в процессе изготовления. Обеспечение этих требований невозможно без выяснения основных закономерностей влияния различных факторов на эти главные характеристики. Установление таких закономерностей возможно лишь на основе детального компьютерного моделирования электромагнитных полей в резонаторе при изменении его профиля. Опыт таких расчетов имеется в БГУИР [4].

В результате выполненных ранее в БГУИР исследований совместно с НЦ ФЧВЭ БГУ и ОИЯИ были наработаны методики и созданы оригинальные пакеты эффективных по сравнению с имеющимися программ расчета и оптимизации параметров рассматриваемых резонаторов [5–7].

Следует отметить, что разработанные программы хотя и являются эффективными, однако имеют существенные ограничения, связанные с невозможностью выполнения расчетов трехмерных задач для резонаторов с азимутальной неоднородностью границы. Эта особенность не позволяет, в частности, реализовать расчет резонатора с несимметричными элементами ввода-вывода СВЧ-мощности, элементами управления селекцией мод. Ввиду этого для азимутально-несимметричных задач стоит использовать пакеты трехмерного моделирования. Однако, как показывает сравнение, применение таких пакетов для решения азимутально-симметричных задач приводит к увеличению машинного времени на порядок при той же точности расчетов.

Цель исследования — поиск на основе вычислительного эксперимента с использованием современных профессиональных пакетов программ перспективных вариантов одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов в ИС и разработка методики измерения его добротности.

## 1. ПРОФИЛЬ ИССЛЕДУЕМОГО РЕЗОНАТОРА

Рассматриваемый резонатор представляет собой полость в круглом волноводе. Профиль продольного сечения и используемые для изготовления геометрические параметры резонатора представлены на рис. 2. Радиус регулярного волновода  $b_0$  является критическим для симметричной  $E_{01}$ -волны на заданной частоте. Поэтому в полости резонатора  $z_0 < z < z_L$  запирается симметричная собственная  $E$ -мода, которая для частоты  $f = 1,3$  ГГц является рабочей при использовании такого резонатора в составе ускорительной секции коллайдера. При этом размер пролетного интервала  $2d$  определяется условиями максимума ускорения и равен  $\lambda/2$ .

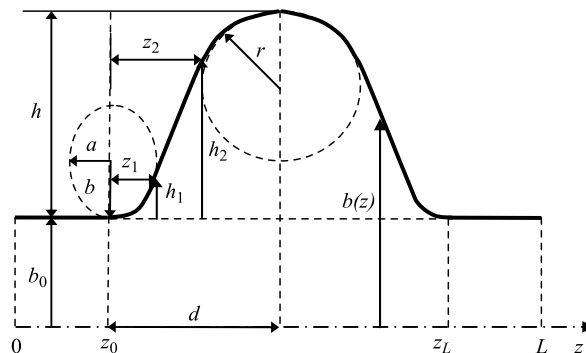


Рис. 2. Геометрия профиля резонатора

Детальная постановка электродинамической задачи для рассматриваемого резонатора, методы ее решения и описание основных рассчитываемых рабочих характеристик резонатора представлены в [4–7]. В данной статье приняты обозначения, приведенные в этих источниках.

Как выявили расчеты [7] по исследованию величины радиусов сопряжения окружностями ( $a = b$ ), добротность повышается, если  $a \rightarrow 0$  и  $r \rightarrow d$ . Однако при  $a \rightarrow 0$  в области сопряжения с отрезком регулярного волновода (при  $z \approx z_0 + 0,7a$ ) резко возрастает напряженность электрического поля на границе резонатора, в то же время при уменьшении  $a$  от  $a < 0,35\lambda/2\pi$  выигрыш в добротности меньше 0,5 %. Здесь и далее  $\lambda = 230,8$  мм — длина волны, соответствующая рабочей частоте  $f = 1,3$  ГГц. Несколько больший выигрыш в добротности (до 5 %) достигается при увеличении верхнего радиуса сопряжения  $1,1 < r < d$ . Однако при фиксированном  $a$  и приближении  $r$  к  $d$  возрастает тангенс наклона сопрягаемой прямой  $tg l$  на боковой границе и опять же наблюдается резкий рост напряженности электрического поля на границе вблизи  $z \approx z_0 + 0,7a$ . Исходя из компромисса по добротности и значению поля на границе, принятому в работе [7], были выбраны рекомендованные для изготовления радиусы сопряжения  $a = 0,31$ ,  $r = 1,1$ , что согласуется с результатами [8].

В работе [8], однако, для нижнего сопряжения использована не окружность, а эллипс, хотя технологически и с точки зрения простоты расчетов легче было бы выполнить сопряжение обычной окружностью.

Для выявления целесообразности эллипсоидального сопряжения в настоящем исследовании были проведены расчеты с целью установления влияния параметров эллипсоидального сопряжения на величину значения поля на границе, которая характеризуется относительным параметром  $E_g^{\max}/E_{\text{acc}}$ . Для этого был разработан модуль расчета эллипсоидального сопряжения, усовершенствована оригинальная программа, описанная в [7], и выполнены расчеты резонатора с профилем, в котором сопряжение с трубкой дрейфа получается с помощью эллипса, как показано на рис. 2.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРА С РАЗЛИЧНЫМ СОПРЯЖЕНИЕМ

В табл. 1 приведены параметры варианта профиля резонатора с нижним сопряжением окружностью ( $a = b$ ), близкого к образцу резонатора, полученного из FNAL и используемого как эталон. В верхних строках табл. 1–5 приведены безразмерные значения (б/р) параметров (отнесенные к  $\lambda/2\pi$ ), в нижних — их значения в миллиметрах.

При такой геометрии получены следующие основные выходные характеристики (их описание приведено в [4–6]):

**Таблица 1. Параметры резонатора, вариант 1 ( $a = b, d = \pi/2$ ), окружность  $W = 1$**

$b_0$	$h$	$d$	$a$	$b$	$r$	$z_1$	$h_1$	$z_2$	$h_2$
1,063	1,764	1,5708	0,31	0,31	1,10	0,298	0,224	0,514	0,970
39,05	64,79	57,65	11,380	11,38	40,37	10,9	8,18	18,9	35,41

$$E_z^{\max} = 0,73683 \text{ (б/р)}; V_0 = 1,30264 \text{ (б/р)}; E_{\text{acc}} = 0,41464 \text{ (б/р)};$$

$$E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,77704; E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,69638;$$

$$B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00039 \text{ Тл/(кВ/см)},$$

$$A_Q \cdot Z_0 = 272,8; Q = 27186; Z_{\text{res}} = R/Q = 418,1 \text{ Ом}.$$

В табл. 2 приведены параметры варианта профиля резонатора с эллипсоидальным сопряжением  $a \neq b$ , соответствующего образцу имеющегося резонатора, полученному группой авторов из FNAL [3]. Этот вариант предлагается для изготовления.

**Таблица 2. Параметры резонатора, вариант 2 ( $a < b, d = \pi/2$ )**

$b_0$	$h$	$d$	$a$	$b$	$r$	$z_1$	$h_1$	$z_2$	$h_2$
1,063	1,777	1,5708	0,245	0,349	1,098	0,2166	0,186	0,541	1,061
39,05	65,27	57,65	9,0	12,82	40,33	7,96	6,83	19,87	38,97

При такой геометрии получены следующие основные выходные характеристики:

$$E_z^{\max} = 5,96941 \text{ (б/р)}; V_0 = 10,62594 \text{ (б/р)}; E_{\text{acc}} = 3,38244 \text{ (б/р)};$$

$$E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,76482; E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,57989;$$

$$B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00038 \text{ Тл/(кВ/см)},$$

$$A_Q \cdot Z_0 = 278,1 \text{ Ом}; Q = 27710; Z_{\text{res}} = R/Q = 418 \text{ Ом}.$$

Из сравнения таблиц видно, что при изменении параметров сопряжения несколько изменилось расположение точек сопряжения.

На рис. 3 представлено характерное распределение электрического поля на оси и на границе резонатора.

Как следует из сравнения характеристик этих двух вариантов резонаторов, при замене сопряжения окружностью на эллипсоидальное, даже несмотря на то, что средний радиус эллипса  $(a + b)/2 = 0,29$  меньше радиуса окружности ( $a = 0,31$ ), величина  $E_g^{\max}/E_{\text{acc}}$  (т. е. максимальное значение поля на границе) получается на 7 % меньше при использовании сопряжения эллипсом.

Ниже приведены результаты расчетов резонатора при изменении различных параметров. У варианта 3 уменьшен радиус  $b_0$  и немного увеличено  $d$  по сравнению с вариантом 2.

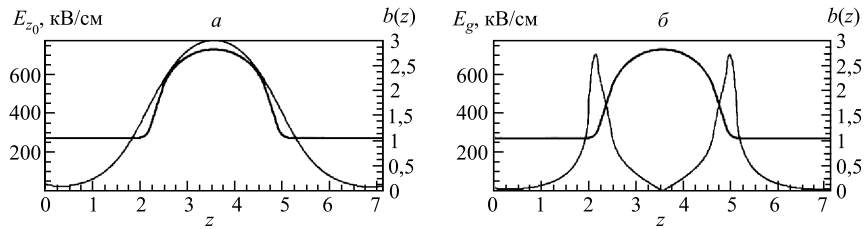


Рис. 3. Распределения полей при  $A = 0,1$ ,  $\sigma = 5,6 \cdot 10^7$  (медь):  $a$  — поле  $E_{z0}$  на оси резонатора;  $b$  — поле  $E_g$  на стенке резонатора;  $b(z)$  — профиль резонатора

**Таблица 3. Параметры резонатора, вариант 3** ( $a < b$ ,  $d > \pi/2$ ), эллипс  $W = 1,009$ ,  $f = 1,31$

$b_0$	$h$	$d$	$a$	$b$	$r$	$z_1$	$h_1$	$z_2$	$h_2$
1,06128	1,7547	1,625	0,245	0,3484	1,143	0,2119	0,1736	0,5666	1,0433
39,00	64,45	59,7	9,0	12,8	42,00	7,78	6,376	20,81	38,32

Основные выходные характеристики, получаемые при такой геометрии:

$$E_z^{\max} = 5,84483 \text{ (б/п)}; \quad V_0 = 10,53943 \text{ (б/п)}; \quad E_{\text{acc}} = 3,24290 \text{ (б/п)};$$

$$E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,80235; \quad E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,54632;$$

$$B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00039 \text{ Тл/(кВ/см)},$$

$$A_Q \cdot Z_0 = 286,6 \text{ Ом}; \quad Q = 28435; \quad Z_{\text{res}} = R/Q = 433,4 \text{ Ом}; \quad \text{tg } l = 2,5.$$

Варианты 4 и 5 (табл. 4 и 5) рассчитаны при сопряжении окружностями. У них выдержаны  $b_0$ ,  $h$ ,  $d$ , как у варианта 3.

**Таблица 4. Параметры резонатора, вариант 4** ( $a = b$ ,  $d > \pi/2$ ), окружность  $W = 1,0$ ,  $f = 1,3$

$b_0$	$h$	$d$	$a$	$b$	$r$	$z_1$	$h_1$	$z_2$	$h_2$
1,06128	1,7547	1,625	0,31	0,31	1,186	0,299	0,227	0,4825	0,887
39,00	64,45	59,7	11,38	11,38	43,56	10,98	8,34	17,72	32,58

$$E_z^{\max} = 5,47196 \text{ (б/п)}; \quad V_0 = 9,73783 \text{ (б/п)}; \quad E_{\text{acc}} = 2,99626 \text{ (б/п)};$$

$$E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,82626; \quad E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,71622;$$

$$B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00039 \text{ Тл/(кВ/см)},$$

$$A_Q \cdot Z_0 = 281,7 \text{ Ом}; \quad Q = 28070; \quad Z_{\text{res}} = R/Q = 421 \text{ Ом}; \quad \text{tg } l = 3,5.$$

Если сделать высоту  $h = 65,26$  мм чуть большей, то при  $r = 40,4$  мм получаем значение  $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,65$ , т.е. оно уменьшается и приближается к значению в американском варианте, но при этом добротность также уменьшается:  $A_Q \cdot Z_0 = 277$  Ом.

У следующего варианта 5 радиус сопряжения приближен к меньшему значению полуоси эллипса у варианта 3. Это сразу привело к увеличению  $E_g^{\max}/E_{\text{acc}}$  на 10 %.

**Таблица 5. Параметры резонатора, вариант 5 ( $a = b, d > \pi/2$ ), расчетные  $W = 1,0$ ,  $f = 1,3$**

$b_0$	$h$	$d$	$a$	$b$	$r$	$z_1$	$h_1$	$z_2$	$h_2$
1,06128	1,7547	1,625	0,26	0,26	1,212	0,248	0,184	0,4656	0,896
39,00	64,45	59,7	9,54	9,54	44,52	9,11	6,76	17,10	32,91

$E_z^{\max} = 5,68714$  (б/п);  $V_0 = 10,16337$  (б/п);  $E_{\text{acc}} = 3,12719$  (б/п);  
 $E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,81861$ ;  $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,71800$ ;  
 $B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00038$  Тл/(кВ/см),  
 $A_Q \cdot Z_0 = 285,65$  Ом;  $Q = 28463,486$ ;  $Z_{\text{res}} = R/Q = 422,57333$  Ом;  
 $\text{tg } l = 3,2$ .

В результате этих расчетов было установлено, что если выбирать скругление радиусом при фиксированной высоте  $h$ , то крутизна боковых стенок получается больше, чем у исходного американского варианта с эллипсоидальным сопряжением. За счет этого  $E_g^{\max}$  получается выше. Поэтому при использовании простого сопряжения окружностью не удастся уменьшить напряженность поля на границе по сравнению с использованием сопряжения эллипсом.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования можно сделать следующий вывод: сопряжение резонатора с отрезком регулярного волновода является наиболее критичным местом для возможного электрического пробоя. Сравнение двух способов сопряжения — с помощью окружности и с помощью эллипса — показало, что использование эллипса позволяет на 7–10 % снизить максимальную величину напряженности электрического поля на границе по сравнению с сопряжением окружностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. International Linear Collider: Reference Design Report. V. 3 — Accelerator. 2007.
2. International Linear Collider: A Technical Progress Report. 2011.



3. *Azaryan N. et al.* Dubna–Minsk Activity on the Development of 1.3 GHz Superconducting Single-Cell RF-Cavity // Proc. of RUPAC2012, WEPPD023. Saint Petersburg, Russia, 2012. P. 602–604.
4. *Kolosov S. V. et al.* The simulation codes CEDR // 11 IEEE IVEC. USA, Monterey, California, 2010. P. 115–116.
5. *Колосов С. В., Кураев А. А., Сеницын А. К.* Расчет ячейки ускорителя электронов и позитронов на сверхпроводящем ниобиевом резонаторе // Материалы 21-й Международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2011. С. 285–286.
6. *Колосов С. В., Кураев А. А., Сеницын А. К.* Расчет девятисекционного резонатора линейного коллайдера // Там же. С. 267–268.
7. *Азарян Н. С. и др.* Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 2(172). С. 247–268.
8. *Aune B. et al.* Superconducting TESLA Cavities // Phys. Rev. Special Topics — Accelerators and Beams. 2000. V. 3. P. 092001.

Получено 6 мая 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 28.05.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,62. Уч.-изд. л. 0,74. Тираж 235 экз. Заказ № 58000.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)