

Сверхпроводящая ускоряющая СВЧ–структура для ускорителя SVAAP

И.А. Звонарев, Л.М. Севрюкова

Отраслевая проблемная лаборатория технологии и исследования сверхпроводящих резонаторов (ОПЛ ТИСПр) Минатома России при ГНЦ ИФВЭ, Протвино, Россия

Н.А. Иванов

ДАНТ Минатома России

Введение

В связи с интенсивным развитием исследований в области использования высокочастотной сверхпроводимости в ускорительной технике, а также с развитием исследований по высокотемпературной сверхпроводимости в Отраслевой проблемной лаборатории Минатома России при ГНЦ ИФВЭ ведется работа по созданию сверхпроводящего ускорителя для облучения ВТСП керамики. Этот ускоритель известен за рубежом как сверхпроводящий вертикальный ускоритель для прикладных целей (SVAAP) [1,2]. В табл. 1 приведены основные характеристики ускорителя SVAAP.

Таблица 1

№	Наименование	Значение
1	Максимальная энергия электронов на выходе, МэВ	7.5
2	Энергетический разброс частиц в сгустке протяженностью 20°, %	0.5
3	Энергия инжекции, кэВ	80
4	Ток ускоренных частиц, μA	10
5	Режим работы ускорителя	Непрерывный
6	Тип ускоряющей структуры	TESLA-shape

Ускоритель должен будет использоваться для облучения ВТСП–керамики, для стабилизации ее стехиометрического состава и обеспечения стабильной работы ускоряющих резонаторов.

1. Геометрия ускоряющей СВЧ-структуры

Ускоряющая структура для ускорителя SVAAP состоит из двух секций: ускоряющей и группирующей (рис.1). Ранее в работе [3] проведен выбор геометрических размеров ускоряющей структуры и расчет основных электродинамических характеристик структуры (табл.2).

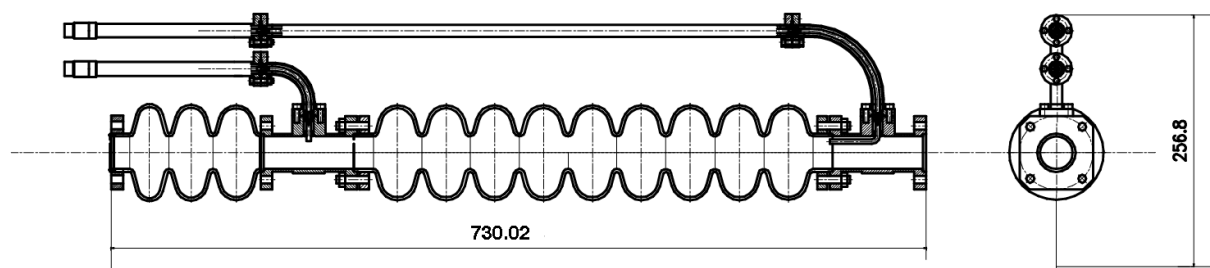


Рис. 1. Внешний вид ускоряющей структуры ускорителя SVAAP.

На рис. 2 показано распределение электрического поля на оси ускоряющей секции, состоящей из девяти ячеек. Отличие реально существующего распределения электромагнитного поля от требуемого характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения, которое в нашем случае не должно превышать $\sigma = 1\%$ [4].

Таблица 2

№	Наименование	Значение
1	Ускоряющее поле, МВ/м	12
2	Рабочий вид колебаний	π
3	Собственная добротность резонатора Q_0	$1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10}$
4	Рабочая частота, МГц	2950
5	Число ячеек: группирующая секция ускоряющая секция	3 9

Известно, что отклонение геометрических размеров ячеек от расчетных может привести к двум нежелательным эффектам [4]:

- изменяется скорость волны, и появляется дополнительное скольжение ступка относительно волны;
- уменьшается амплитуда ускоряющей волны.

Оба этих процесса приводят к уменьшению энергии на выходе ускоряющего волновода и увеличению энергетического разброса частиц.

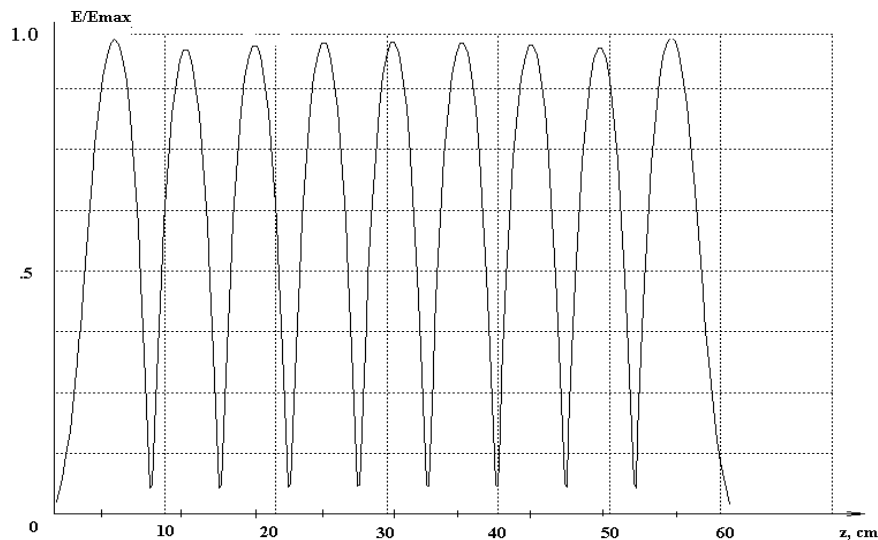


Рис. 2. Распределение электрического поля на оси ускоряющей секции.

Ускоряющая структура располагается в криостате в вертикальном положении, что приводит к деформации ячеек под действием силы тяжести. Следовательно, необходимо оценить влияние деформации резонатора на сдвиг рабочей частоты резонатора и его влияние на распределения поля на оси резонатора.

2. Изменение геометрических размеров ускоряющего резонатора под действием силы тяжести

Рассмотрены несколько вариантов закрепления ускоряющей структуры в криостате и соответствующие им деформации при различных значениях толщины стенок:

- ускоряющая структура имеет один свободный фланец (верхний, либо нижний), а другой жестко закреплен;
- оба фланца закреплены.

В первом варианте (рис. 4) действие силы тяжести приводит к изменению общей длины ускоряющей секции, а во втором варианте (рис.5) изменение длины секции отсутствует, причем удлинение верхних ячеек компенсируется сжатием нижних.

На рис. 3 показано изменение геометрии ячеек резонатора под действием силы тяжести. Исходная форма ячейки изображена линией 1, а деформированная – линией 2. Как видно из рисунка, граница ячейки описывается дугами окружностей и касательными к ним отрезками.

Анализируя деформацию ячейки, можно сделать вывод, что изменение геометрии ячейки происходит за счет изменения периода ячейки. Наибольший вклад в изменение периода ячейки вносит изменение углов наклона образующих ячейки.

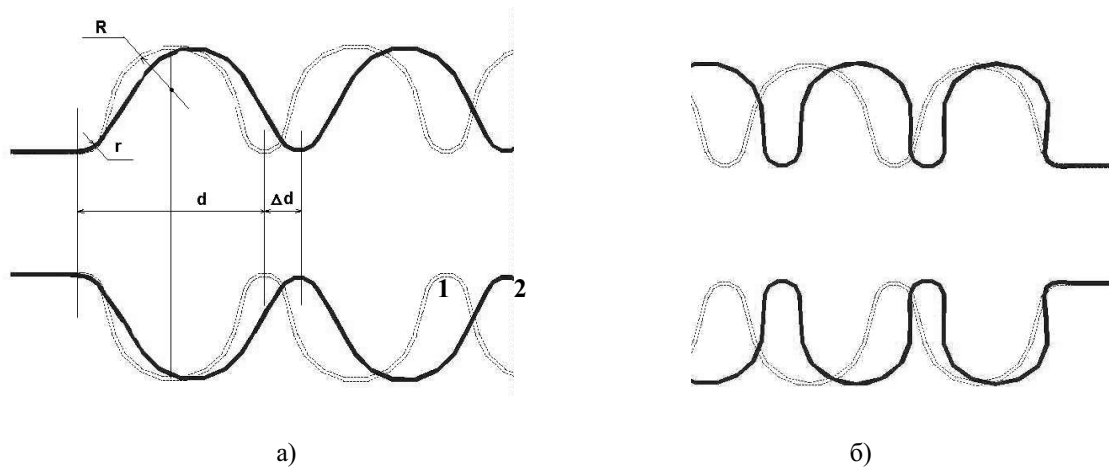


Рис. 3. Изменение форм деформированных ячеек резонатора: а) растяжение ячеек; б) сжатие ячеек.

В результате численного моделирования получен набор абсолютных деформаций геометрии структуры для различных значений толщины ее стенок (рис. 4). Резонатору с толщиной стенки 1 мм соответствует наибольшее изменение длины (около 9 мкм).

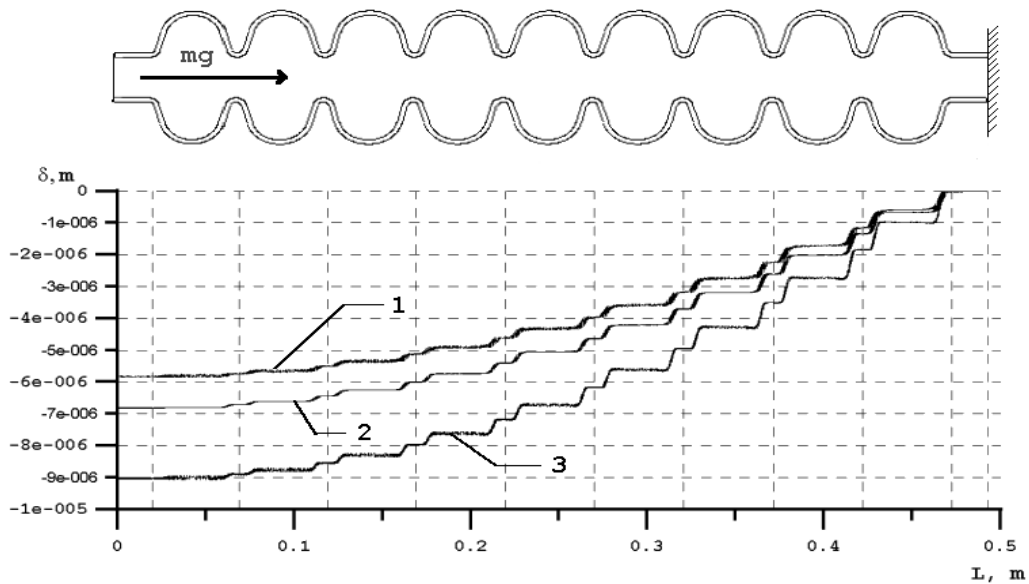


Рис. 4. Деформация ускоряющего резонатора с фиксированным нижним фланцем при различных значениях толщины стенки: 1 – толщина стенки 3 мм; 2 – толщина стенки 2 мм; 3 – толщина стенки 1 мм.

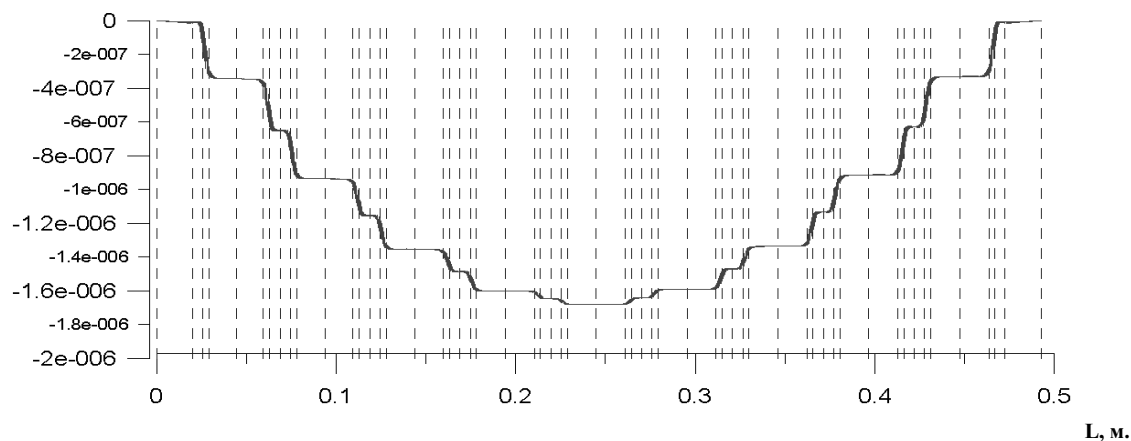


Рис. 5. Деформация ускоряющего резонатора с фиксированным нижним и верхним фланцем при толщине стенки 2 мм.

На рис.5 показана деформация резонатора для случая, когда резонатор жестко закреплен с двух сторон.

3. Влияние изменения длины ускоряющей секции на ее электродинамические характеристики

Уход собственной частоты ячейки приведет к изменению амплитуды электромагнитного поля в этой ячейке, а следовательно, изменится и распределение поля на оси резонатора. Следовательно, необходимо определить значения допустимых изменений в геометрии структуры, которые не приведут к серьезным нарушениям в распределении электромагнитного поля на оси резонатора.

Результаты расчета ухода резонансной частоты из-за деформации ячейки показаны на рис. 6а, а на рис. 6б показано изменение электрического поля на оси ячейки.

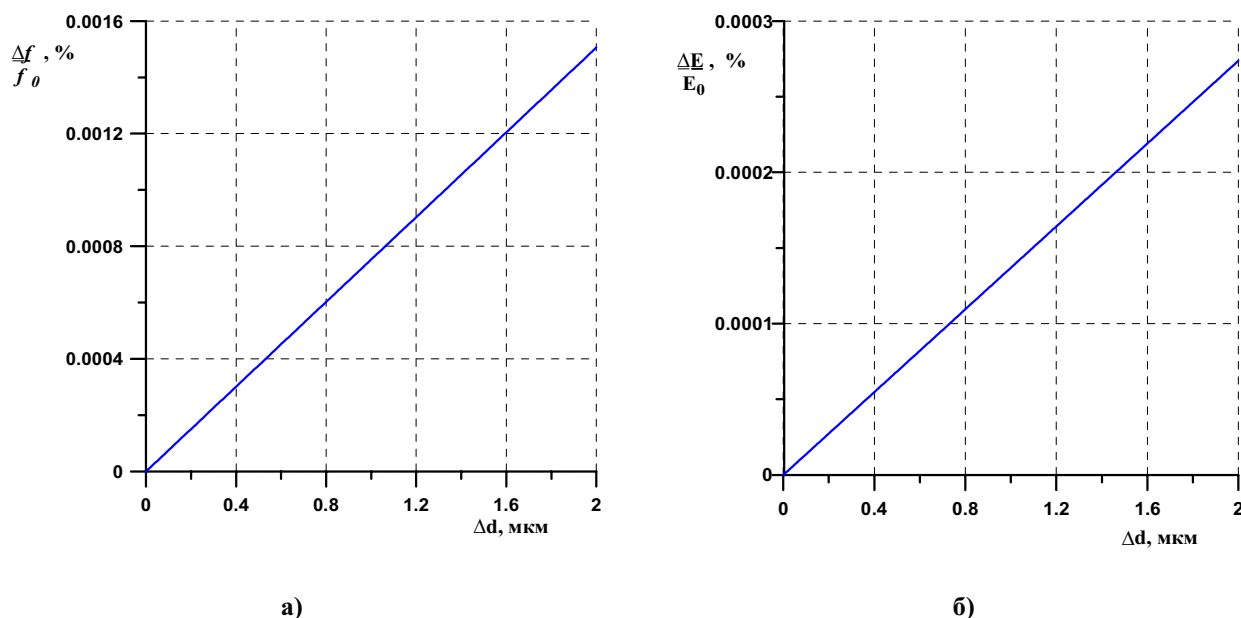


Рис. 6. Сдвиг резонансной частоты (а) и изменение амплитуды электрического поля на оси (б) при изменении длины ячейки.

Таким образом, проведенный анализ влияния деформации ускоряющего резонатора на его электрофизические параметры показал, что изменение периода ячейки, вызванное силой тяжести, приводит к изменению резонансной частоты ячейки и амплитуды электрического поля на оси резонатора. Однако эти изменения настолько малы, что ими можно пренебречь при анализе факторов, влияющих на уход рабочей частоты структуры.

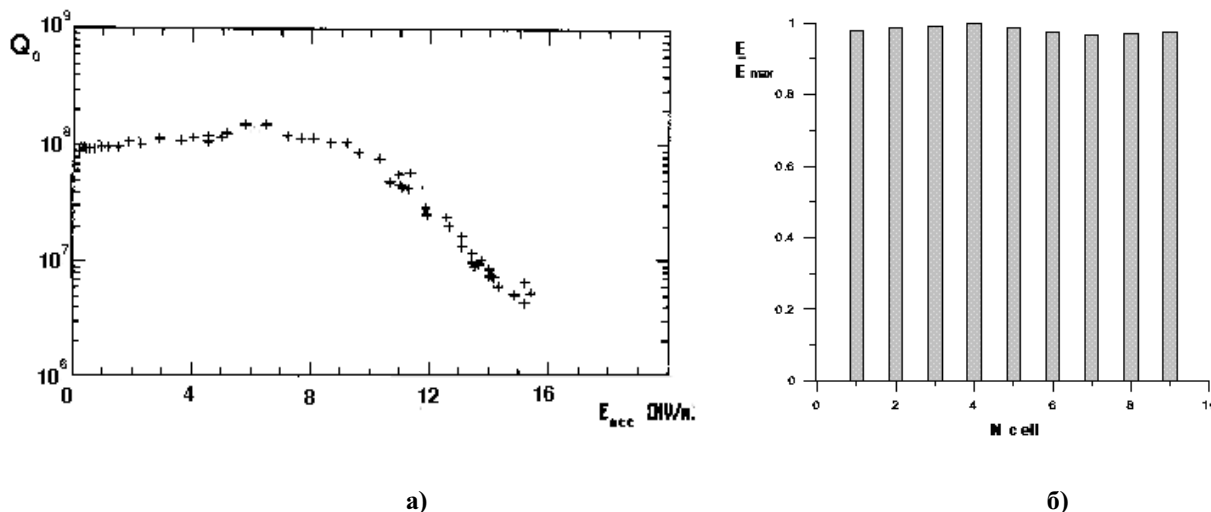


Рис. 7. Экспериментальные результаты исследования ускоряющего резонатора из 9 ячеек: а) зависимость добротности резонатора от ускоряющего поля; б) распределение поля вдоль оси структуры.

В настоящее время в ОПЛ ТИСПР изготовлена сверхпроводящая ускоряющая структура для ускорителя SVAAP. Проведенные эксперименты по программе «Частота-время» (Госстандарт России) в рамках научно-технического сотрудничества с Сибирским НИИ физико-технических и радиотехнических измерений подтвердили возможность использования в качестве темпа ускорения величины, равной 12 МэВ/м (рис 7а). На рис. 7б приведены результаты измерения распределения электрического поля на оси резонатора из девяти ячеек на рабочей частоте (2951.57 МГц).

Литература

1. A. Vasiliev, O.Voinalovich, A. Glazkov, A. Koliaskin, A. Ponomarenko, L. Sevryukova, I. Zvonarev. Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes (SVAAP). – Proceed. of the European Conference on Accelerator Linac. EPAC-96, Sitges (Barselona), Spain, 1996, June 10-14, v.1, p. 762-764.
2. А.А. Васильев, О.А. Войналович, А.А. Глазков, И.А. Звонарев, А.Д. Коляскин, Л.М. Севрюкова. Состояние работ по проекту сверхпроводящего вертикального ускорителя для прикладных целей. -Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц. ГНЦ РФ ИФВЭ, Протвино, 1996, т. 2, с. 401-406.
3. И.А. Звонарев, А.Д. Рябов, Л.М. Севрюкова. Расчет геометрических размеров и основных электрофизических параметров СВЧ-структуры для ускорителя SVAAP – Препринт ИФВЭ 2000 – 6, Протвино, 2000, 11 с.
4. V. Komarova, L. Sevryukova, M. Tchernov, I. Zvonarev. The Influence of the Injection Energy on the Acceleration RF Structure Geometry and the Beam Dynamics SVAAP. – Proceed. of the 8-th Workshop on RF Superconductivity. Abano Terme (Padya), Italy, 6-10 Oct. 1997, v.1 Superconducting Particle Accelerators. P. 269-275.