

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Н. Волков, Е.К. Кенжебулатов, И.В. Купцов,  
И.В. Петров, Е.А. Ротов, И.К. Седяров,  
А.Г. Трибендис

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ НАГРУЗКА  
ВЫСШИХ МОД  
ОДНОМОДОВОГО РЕЗОНАТОРА НА 178 МГц

ИЯФ-2002-37

НОВОСИБИРСК  
2002

## **Высокочастотная нагрузка высших мод одномодового резонатора на 178 МГц**

*В.Н. Волков, Е.К. Кенжебулатов, И.В. Купцов,  
И.В. Петров, Е.А. Ротов, И.К. Седяров, А.Г. Трибендис.*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, СО РАН  
630090, Новосибирск

В работе приведено описание высокочастотной нагрузки для одномодового резонатора, изготавливаемого для накопительного кольца лазера на свободных электронах в университете DUKE (США). Приводятся результаты исследования поглощающего материала используемого в нагрузке. Представлены расчеты спектра резонатора и максимальных накопленных токов пучка при таком спектре.

## **HOM load for the single-mode 178 MHz cavity**

*V. Volkov, E. Kenzhebulatov, I. Kuptsov, I. Petrov,  
E. Rotov, I. Sedlyarov, A. Tribendis*

Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS  
630090, Novosibirsk

A HOM load for the new Duke FELL cavity is presented. Studies of the RF absorbing material are discussed. The results of the simulations of the beam-cavity interaction are also shown.

---

## 1. Введение

Важной проблемой в современных накопителях является повышение накопленных токов. Одним из ограничений является возникновение неустойчивости из-за взаимодействия пучка с высшими модами (ВМ) резонатора. Особенно остро этот эффект проявляет себя в установках, работающих на относительно невысоких энергиях до 1 ГэВ. Решить эту проблему можно при помощи одномодового резонатора с сильным подавлением ВМ. Принцип работы такого резонатора заключается в том, чтобы все моды кроме основной сильно нагрузить при помощи специальной ВЧ нагрузки. Степень нагруженности ВМ должна быть такова, чтобы напряжение, наведенное пучком, затухло к приходу следующего пучка. Таким образом, предельная величина добротностей ВМ различна для разных установок и зависит от параметров этих установок. Еще одно положительное свойство такого резонатора это то, что в случае если какие-то моды будут не достаточно нагружены, то их легко подавить с помощью обратной связи (так как их полоса пропускания больше нескольких мегагерц, а не килогерцы как у ненагруженного резонатора).

## 2. Общие сведения об одномодовом резонаторе для накопителя Duke

В данное время в лаборатории 6-2 разрабатывается ВЧ система накопителя для лазера на свободных электронах в университете DUKE (США). Параметры накопителя представлены в таблице 1.

На данный момент в DUKE используется обычный резонатор с отстройкой ВМ, изготовленный так же в нашей лаборатории около десяти лет назад. Средние накопленные токи при сегодняшней ВЧ системе составляют 30 – 40 мА, максимальные 60 – 70 мА. Дальнейшее увеличение невозможно из-за возникновения синхротронных колебаний, возникающих в результате взаимодействия пучка с ВМ. В накопителе DUKE хотят достичь токов порядка 300 мА. Расчеты показывают, что достичь таких токов можно использовав в новой ВЧ системе одномодовый резонатор.

Новый резонатор предполагается сделать на базе резонатора микротрона (рисунок 1).

Таблица 1. Параметры кольца DUKE с новой ВЧ системой

Частота обращения	2.789 МГц
Энергия электронов	1.2 ГэВ
Максимальный ток пучка	0.3 А
Приращение тока пучка за одну инжекцию	0.5 – 1.0 мА
Кратность частоты ВЧ	64
Потери на оборот при E=1.2 ГэВ	91.2 кэВ
Максимальное ВЧ напряжение на зазоре резонатора	800 кВ
Рабочая частота ВЧ системы	178.5 МГц
Число сгустков	16
Вакуум при полной ВЧ мощности	$10^{-9}$ торр
Длина прямолинейного промежутка для ускоряющего резонатора	3 – 4 м
Длина сгустка при инжекции	0.3 – 0.5 нсек

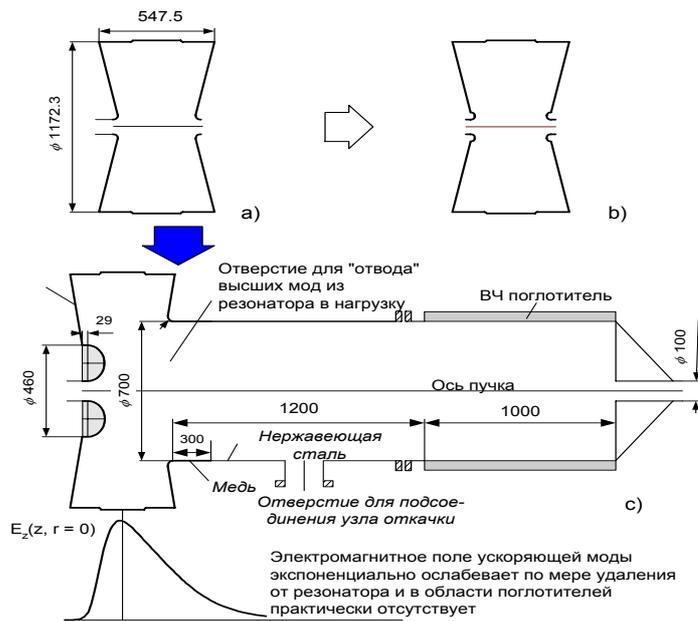


Рис. 1. а) Резонатор микротрона ИЯФ 180.4 МГц, б) существующий резонатор накопителя Duke 178.5 МГц, в) резонатор 178.5 МГц с подавлением высших мод для накопителя Duke (проект).

Параметры всех трех резонаторов представлены в таблице 2 [1].

**Таблица 2. Параметры резонаторов на рабочей частоте**

	Резонатор микротрона ИЯФ	Существующий резонатор Duke	Резонатор Duke с подавлением высших мод
Рабочая частота $f_1$ , МГц	180.4	178.5	178.5
Эффективное характеристическое сопротивление $\rho T^2$ , Ом	109.7	113.5	88.59
Пролетный фактор $T$	0.9034	0.9187	0.7643
Добротность $Q$	41000	42500	39000
Эффективное шунтовое сопротивление $R_{ш}$ , МОм	4.498	4.824	3.455

Подавление высших мод в резонаторе предполагается осуществить при помощи цилиндрической нагрузки, связанной с резонатором волноводом диаметром 700 мм (рисунок 1). Диаметр выбран таким образом, чтобы в волновод проходили все высшие моды. Расстояние до нагрузки выбирается таким образом, чтобы суммарное тепловыделение от основной моды типа E010 в нагрузке составляло меньше нескольких ватт. Длина нагрузки ограничена отведенным под резонатор местом и составляет 1 м.

### 3. Выбор поглощающего материала

В качестве поглощающего материала рассматривалось два варианта. Это используемый за рубежом в подобных проектах феррит и выпускаемая в России во Фрязино ООО НПП “Старт” проводящая керамика КТ-30. Состав керамики:  $TiO_2$  – 30%, А-995 – 70% ( $Al_2O_3$  – 99.8%,  $MgO$  – 0.2%) Имея более предпочтительные поглощающие свойства, феррит обладает рядом недостатков:

- Существующая технология крепления феррита к металлу не позволяет нагревать его выше  $100^{\circ}C$ . А для получения требуемого вакуума необходимо проводить обезгаживающий прогрев резонатора после сборки до температуры  $300^{\circ}C$ . Керамика позволяет прогрев в вакууме до  $1000^{\circ}C$ , на воздухе до  $400^{\circ}C$ .

- Газоотделение феррита в десятки раз хуже чем у керамики, что сильно затрудняет получение хорошего вакуума. Газоотделение у феррита порядка  $10^{-10}$  (торр·л/сек·см<sup>2</sup>), а у керамики около  $6 \cdot 10^{-12}$  (торр·л/сек·см<sup>2</sup>). Но с учетом того, что поверхность эквивалентного по поглощению количества керамики значительно больше поверхности феррита, их суммарные газоотделения приблизительно равны.
- Стоимость феррита в несколько раз выше стоимости эквивалентного по поглощению количества керамики.

В результате предпочтение было отдано керамике.

#### 4. Исследование свойств керамики

Керамика выпускается в виде цилиндрических стаканов высотой 2.5 см и 4.5 см (рисунок 2). Эти элементы с помощью винтов прикрепляются к водоохлаждаемой стенке нагрузки.

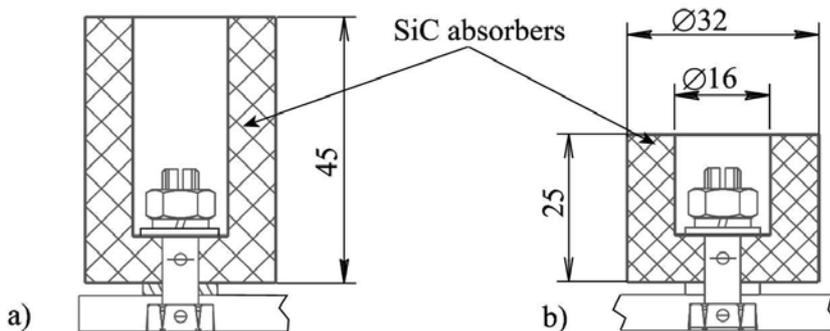


Рис. 2. Поглощающий элемент нагрузки высших мод.

Для исследования поглощающих свойств керамики был изготовлен макет, представляющий собой цилиндр длиной 43.2 см и диаметром 42.2 см (рисунок 3). С помощью этого макета были проведены следующие исследования:

- определено оптимальное расположение поглощающих элементов в нагрузке,
- найдены эквивалентные параметры поглощающего материала ( $\epsilon$  и  $\sigma$ ), для подстановки в программу CLANS.
- Исследована зависимость поглощающих свойств керамики от температуры.

#### **4.1. Определение оптимальное расположение поглощающих элементов в нагрузке**

Для того чтобы определить оптимальное расположение проводились следующие измерения. В макет с различной степенью заполнения устанавливались поглощающие элементы, и измерялись добротности всех мод в диапазоне 500 – 200 МГц. Сначала макет был заполнен максимально плотно, поглощающие элементы находились вплотную друг к другу. Затем было увеличено расстояние между рядами поглотителей вдоль оси макета. После этого проверялся вариант, когда разряжение проводилось в рядах, которые располагались вплотную друг к другу, как в первом случае. И, наконец, проводилось разряжение сразу по двум направлениям, т.е. и между рядами, и в каждом ряду.

Сравнивая результаты измерений, были сделаны следующие выводы:

- Добротности высших мод, частота которых меньше 1 ГГц, не зависят от расположения поглотителей, а зависят только от их количества.
- Для мод, частоты которых больше 1 ГГц наблюдается “эффект экранирования”. При слишком плотном заполнении, поглотители экранируют друг друга, снижая общую эффективность нагрузки. Но этот эффект пропадает если расстояние между поглотителями составляет 3.5 см и более.

Описанные выше измерения проводились для поглощающих стаканов высотой 4.5 см. Подобные исследования были проведены и для низких (высотой 2.5 см) стаканов. Для них так же был обнаружен эффект экранирования с той лишь разницей, что он пропадает при меньших расстояниях между поглотителями (около 2-х сантиметров). Однако, при использовании высоких поглотителей добротности высших мод в 2-3 раза меньше, чем в случае с низкими, при одинаковом числе используемых поглотителей.

На основе полученных данных было решено использовать в нагрузке поглотители высотой 4.5 см, применяя равномерное заполнение с расстоянием между поглотителями 3.5 см. При таком заполнении для нагрузки резонатора Duke длиной один метр понадобится около 500 поглощающих элементов.

#### **4.2. Определение эквивалентных параметров нагрузки**

Для расчета спектра резонатора Duke нами использовалась программа CLANS [2]. Но при использовании этой программы необходимо учитывать, что она работает только с осесимметричными геометриями. Поэтому, для расчетов необходимо заменить ряды нагрузок на эквивалентные осесим-

метричные кольца, ширина которых равна высоте поглотителя (4.5 см), а толщина диаметру поглотителя (3.2 см). Но при такой замене необходимо знать такие поглощающие параметры кольца, при которых поглощение эквивалентно ряду отдельно стоящих поглощающих элементов. Таким образом, возникла задача определить эквивалентную диэлектрическую проницаемость- $\epsilon$  и объемную проводимость- $\sigma$  для выбранного расположения поглотителей в нагрузке.



Рис. 3. Макет нагрузки.

Чтобы определить эти параметры, макет нагрузки (рисунок 3) был промоделирован при помощи программы CLANS. Ряды поглотителей при моделировании были заменены на кольца, как описано выше. Затем, перебирая все наиболее возможные значения  $\epsilon$  и  $\sigma$ , подбирались такие при которых добротности рассчитанных и измеренных на макете высших мод наиболее близки друг к другу. В результате было получено, что в диапазоне частот 500 – 2200 МГц эквивалентными параметрами кольца, заменяющего ряд поглотителей отстоящих друг от друга на 3.5 см, являются  $\epsilon = 30$  и  $\sigma = 0.7$  см/м.

#### **4.3. Исследование зависимости поглощающих свойств керамики от температуры**

Были проведены исследования зависимости поглощающих свойств керамики от температуры. Для этого температура макета вместе с керамикой повышалась на 20<sup>0</sup>С и 40<sup>0</sup>С. Полученный при этом спектр сравнивался со снятым при обычной температуре. Эти исследования показали, что с

увеличением температуры на 20°C добротности высших мод частота которых менее 1 ГГц уменьшается на 5%, а для частот выше 1 ГГц наблюдается увеличение добротности на 10%. При увеличении температуры на 40°C изменение величин добротностей составляет 10% вниз для частот ниже 1 ГГц и 20% вверх для частот выше 1 ГГц.

## 5. Оценка максимальных токов пучка в накопителе Duke

Используя эквивалентные параметры поглотителя, описанные в пункте 4.2, был рассчитан спектр резонатора накопителя Duke в диапазоне частот 178 – 2200 МГц. Часть полученного спектра представлена на рисунке 4. Сравнение добротностей некоторых мод резонатора с нагрузкой и без нее представлено в таблице 3.

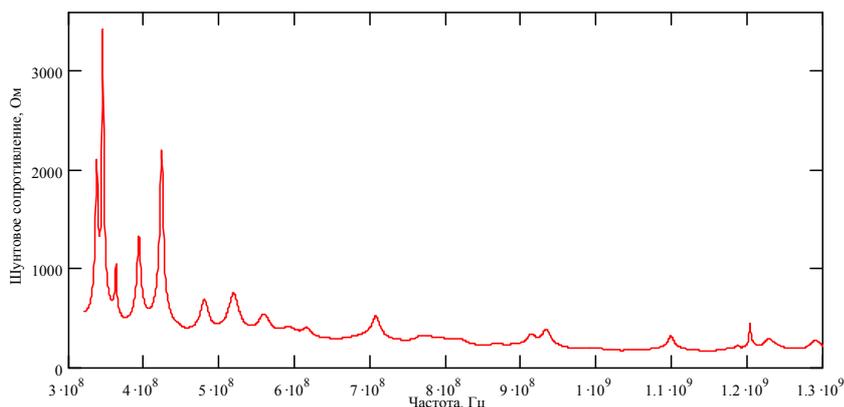


Рис. 4. Зависимость шунтового сопротивления резонатора от частоты в диапазоне 0.3 – 1.3 ГГц.

Зная спектр высших мод резонатора, полученный при помощи CLANS, можно сделать оценку ограничения по току пучка, определяемого ВЧ системой. Расчет проводился при помощи программы MBIM написанной в ИЯФ Митяниной Н.В. [3]. Расчеты показали, что при энергии частиц 1 ГэВ и длине сгустка 0.1 нс, величина максимально допустимого тока составляет 339 мА для 64 сгустков и 373 мА для 8 сгустков.

**Таблица 3. Расчетная добротность некоторых мод резонатора с нагрузкой и без нее**

F, MHz	Q Без нагрузки	Q С нагрузкой
178	48662	48655
351	63689	288
431	74670	134
540	93634	52
619	69741	54
686	102010	18
763	125740	29
798	117260	43
897	80484	67
930	95110	96
981	147840	62
1004	139070	44

## **6. Исследование нагрева керамики во время работы резонатора**

Важно знать, насколько хорошо отводится тепло от поглощающих элементов, чтобы определить перегрев нагрузки во время работы резонатора. Для исследования этого вопроса один стакан из керамики был прикреплен к медной пластине таким же способом, как это будет в резонаторе. Затем он нагревался при помощи намотанной на него проволоки, через которую пропускался постоянный ток. Для теплоизоляции от окружающей среды использовался пенопласт. Контролируя ток и напряжение, измерялась температура керамики и медной пластины. Результаты измерений показали, что с увеличением рассеиваемой мощности на 1 Вт, градиент температур между верхом керамического элемента керамики и медью увеличивается на 5<sup>0</sup>С.

Согласно проведенным расчетам, при 8-ми сгустковом режиме со средним током  $I = 0.3$  А, во всей нагрузке резонатора Duke за счет поглощения высших мод будет рассеиваться порядка 1 кВт. Так как нагрузка состоит из 500 керамических стаканов, то на каждом из них будет рассеиваться примерно 2 Вт, что повлечет за собой перегрев 10<sup>0</sup>С. Такой температурный режим совершенно безопасен для керамики и изменение ее поглощающих свойств незначительно.

## 7. Заключение

Нагрузка на основе керамики КТ-30 удовлетворяет всем необходимым условиям. То есть, достаточно сильно нагружает высшие моды резонатора, хорошо охлаждается, поглощающие свойства слабо зависят от температуры, позволяет прогрев до высоких температур.

Кроме резонатора DUKE предполагается использовать керамику КТ-30 для резонаторов проектов ВЭПП-2000 [4] и Nanohana .

## Литература

- [1] N. Gavrilov, I. Kuptsov, G. Kurkin, L. Mironenko, V. Petrov, I. Sedlyarov, V. Vescherevich. Preprint Budker INP 94-92, Novosibirsk, 1994.
- [2] D.G. Myakishev. Preprint Budker INP 2000-55, Novosibirsk, 2000.
- [3] N.V. Mityanina. Preprint Budker INP 99-46, Novosibirsk, 1999.
- [4] V.N. Volkov et al. VEPP-2000 Single Mode Cavite, Proc. of the 7<sup>th</sup> EPAC (2000).