

# Электронная нагрузка в ускорителе с ВЧК-фокусировкой

О.К.Беляев, В.Б.Степанов

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## 1. Общие замечания

В ускорителе с ВЧК-фокусировкой [1,5] используются две ее разновидности: пространственно-однородная квадрупольная фокусировка (ПОКФ) и пространственно-периодическая фокусировка (ППКФ). В табл. 1 приведены максимальные напряженности поля  $E_s$  на поверхности электродов в исследуемых ускорительных установках и диапазоны энергий, в которых они ускоряют протоны.

Таблица 1:

Параметры Установка		$E_s$ (кВ/см)		Диапазоны энергий (МэВ)	
		ПОКФ	ППКФ	ПОКФ	ППКФ
Секция С1-1 УРАЛ-30	[1]		380		2 - 9
ЛУСИ (ПЛ-10)	[5]	225	350	0.1 - 2.0	2 - 10
ДУ-1	[6]	234		0.4 - 1.0	
НЧУ-1.8	[7]	256		0.1 - 1.8	

## 2. Электронная нагрузка и уширение полосы пропускания

Показанная на рис.1а зависимость относительной добротности от напряженности поля на электродах получена для структуры с ППКФ (секция С1-1 УРАЛ-30) при выполнении работы [2]. В предлагаемой работе по той же схеме и методике [2] на структурах с ПОКФ и ППКФ ускорителя ЛУСИ были проведены аналогичные измерения.

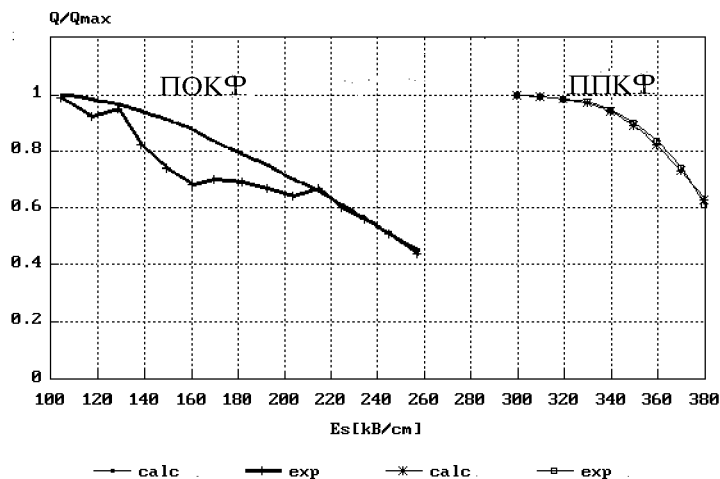


Рис. 1: Зависимости относительной добротности от напряженности электрического поля на поверхности электродов.

В структуре с ПОКФ обнаружено ярко выраженное влияние электронной нагрузки, заключающееся в падении относительной добротности (уширении полосы пропускания) резонатора при увеличении сигнала в резонаторе. Экспериментально полученная зависимость

относительной добротности от напряженности поля на поверхности электродов показана на рис.16. Из результатов измерений потребляемой НЧУ ВЧ мощности следует, что в номинальном режиме в резонатор поступает 645 кВт вместо расчетных 386 кВт. Такое расхождение согласуется с полученной зависимостью. В структуре с ППКФ  $E_s$  снижена до 350 кВ/см (табл.1) и влияния электронной нагрузки не обнаружено. Этот факт подтверждается соответствием измеренной ВЧ-мощности 432 кВт, потребляемой резонатором в номинальном режиме, величине расчетной потребляемой мощности 414 кВт.

Из проведенных измерений уширения полосы пропускания следует, что в структуре ПОКФ ЛУСИ с напряженностью поля 225 кВ/см электронная нагрузка есть, в структуре ППКФ ЛУСИ с напряженностью поля 350 кВ/см нагрузки нет, в структуре ППКФ УРАЛ-30 с напряженностью поля 380 кВ/см — есть. Видно, что в структуре ПОКФ электронная нагрузка появляется при значительно меньших напряженностях электрического поля на поверхностях электродов, чем в структуре ППКФ. Для объяснения этого факта необходимо провести анализ полученных зависимостей  $Q/Q_{max} = f(E)$ .

Анализ проводился в предположении автоэмиссионного характера возникновения электронной нагрузки, полагая, что плотность тока автоэмиссии описывается формулой Фаулера-Нордгейма. Выражение для относительной добротности резонатора при наличии электронной нагрузки можно записать следующим образом:

$$Q/Q_{max} = 1/(1 + P_e/P), \quad (1)$$

где  $P_e$  — мощность потерь за счет электронной нагрузки;  $P$  — мощность потерь в резонаторе (без электронной нагрузки).

Формула (1) написана в предположении независимости накопленной энергии в резонаторе от электронной нагрузки. Такое предположение основывается на малости тока электронной нагрузки по сравнению с током, текущим по поверхности резонатора [3]. Из сопоставления экспериментальных данных с расчетными определялись параметры:  $B$  — коэффициент локального усиления поля и  $S_{эф}$  — эффективная площадь эмиссии. В нашем случае эти параметры имеют обобщенный характер. Результаты аналитической обработки экспериментальных данных приведены в табл.2:

Таблица 2:

Фокусировка	ПОКФ	ППКФ
Параметр		
B	1100	93
I эл.н [А]	1.7	2.2

Значительное различие величин B для структур с ПОКФ и ППКФ может свидетельствовать о различных причинах возникновения электронной нагрузки. На основании литературных данных и результатов наблюдений, а также учитывая непосредственное подключение ионной пушки к исследуемым структурам с ПОКФ, можно сделать предположение о наличии загрязнений на электродах структуры, причиной которых является работа ионной пушки (ИП).

### 3. Электронная нагрузка и рентгеновское излучение

В работах [1,4] отмечается влияние загрязнений электродов на электрическую прочность и рентгеновское излучение в секциях ускорителя, вызванных технологией сборки и напусками атмосферы в объем ускоряющей системы. Влияние же загрязнений, вызванных

работой ИП, на эмиссионные явления и соответственно на уровень рентгеновского излучения в УС не рассмотрено. На ускорителе ДУ-1 [6] при фиксированном уровне поля в УС измерялось рентгеновское излучение (рис.2) в начале (точки "x") и в конце (точки "o") УС с ПОКФ (для наглядности эти точки соединены отрезками прямых). Такие измерения повторялись перед и после каких-либо изменений в режиме работы УС. Эти изменения зафиксированы на рис.2 вертикальными записями между датами измерений рентгеновского излучения. Давление в УС около  $5 \cdot 10^{-9}$  Тор обеспечивалось двумя магниторазрядными насосами НМД-0,16 и одним насосом из нераспыляемого геттера (НГ) емкостью 15 литров при нормальных условиях. Насос из НГ поддерживал в длительных паузах (порядка месяца) давление, достаточное для включения НМД-0,16. Глубокий вакуум получен в УС благодаря качественному меднению внутренних поверхностей и применению металлических уплотнений из индия.

В течение трех лет (с 29.12.90 г. по 06.05.93 г. на рис.2) в УС ни разу не нарушалась вакуумная ситуация. ВЧ-мощность вводилась от автогенератора, в цепь обратной связи которого включена УС. Поэтому измерений уширения полосы частот от уровня поля в резонаторе не проводилось.

Из рис.2 видно, что уровень и распределение рентгеновского излучения (R) вдоль УС значительно изменились через 3 года после включения установки. Кроме резкого увеличения рентгеновского излучения произошло изменение наклона (со сменой знака производной) распределения (R) по длине установки. Характер полученной зависимости не соответствует напряженности поля на поверхности электродов, которая слабо увеличивается от начала к концу ускоряющего канала. Кроме того, в самом начале канала ускорения имеется динамический согласователь в виде раструба, в котором напряженность поля значительно ниже значения, указанного в табл. 1. Проведенная тренировка ВЧ-мощностью не изменила ситуацию с рентгеновским излучением.

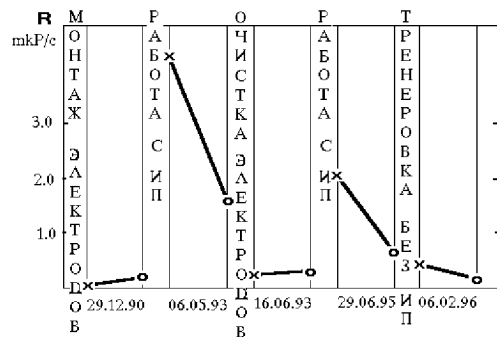


Рис. 2: Распределение рентгеновского излучения (R) по длине (1.6 м) установки в различные интервалы времени. Измеренная величина R в начале (x) и в конце (o) утановки.  $U_p = 1.15$  ( $U_m = 80$  кВ).

Далее электроды были сняты с УС, очищены от черной пленки (количество черноты убывало от начала к концу канала ускорения), покрыты TiN на магнетронной установке и смонтированы вновь. После откачки и ввода мощности уровень рентгеновского излучения вернулся к почти первоначальному значению (рис.2, дата 16.06.93 г.).

С целью уменьшения загрязнения электродов на установке НЧУ-1,8 в согласующий канал с двумя линзами между ИП и структурой ПОКФ были включены две диафрагмы различной формы для фильтрации протонного пучка [7] и установлен между ними расширительный объем для уменьшения поступления газовой компоненты в НЧУ-1,8. При таких доработках наблюдения за величиной и распределением рентгеновского излучения вдоль новой УС были выполнены по аналогичной методике.

Результаты наблюдений и измерений показали, что основной причиной существования электронной нагрузки в ускоряющей структуре с ПОКФ является загрязнение электродов УС газообразными компонентами, поступающими из работающей ИП, при напряженности поля на поверхности электродов около 230 кВ/см. Поскольку снижение этой напряженности нецелесообразно из-за ухудшения качества фокусировки пучка, то для устранения влияния электронной нагрузки остаются пути уменьшения количества загрязнений за счет совершенствования вакуумной камеры ионной пушки с каналом транспортировки пучка и регулярной очистки электродов от загрязнений, например с помощью тренировки их ВЧ-мощностью в конце каждого сеанса работы с пучком.

Наличие электронной нагрузки в ускоряющей структуре с ППКФ объясняется микронеровностями поверхности электродов и большой напряженностью электрического поля на их поверхностях. Так, снижение напряженности поля до 350 кВ/см в ускорителе ПЛ-10 (вместо 380 кВ/см в УРАЛ-30) и улучшение качества поверхности электродов (измеренный коэффициент 80 вместо 93 для УРАЛ-30) позволили работать без электронной нагрузки несколько лет.

Полученные результаты можно использовать для повышения надежности и экономичности существующих УС с ВЧК-фокусировкой и при создании новых структур с ВЧК-фокусировкой для получения пучков с высокой яркостью за счет увеличения напряженности поля на электродах и, следовательно, повышения жесткости фокусирующего канала.

## Список литературы

- [1] Zenin V.A. et al. Proceedings of the 1994 Int.LC. Tsukuba. Japan, 1994, v.1,p.158. Зенин В.А. и др. Препринт ИФВЭ 93-147, Протвино, 1993.
- [2] Belyaev O.K. et al. Proceedings of the 1994 Int.LC. Albuguergue, New Mexico, 1991, p.743. Беляев О.К. и др. ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования, Харьков, 1996, вып.10(18), с.38.
- [3] Belyaev O.K. et al. Proceedings of the 1994 Int.LC. Tsukuba.Japan, 1994, v.1,p.222. Беляев О.К. Препринт ИФВЭ 93-141, Протвино, 1993.
- [4] Зенин В.А., Чиманков М.Н. Препринт ИФВЭ 87-36, Серпухов, 1987.
- [5] Линейный ускоритель ЛУСИ (ПЛ-10). Проспект на Международной научно-технической выставке-ярмарке идей и технологий "Будущее России". Протвино, 1994.
- [6] Borovikov A.A. et al. Abstracts for the XII Int. Conf. on Application of Accelerators in Reserch and Industry. Denton, Texas, USA , 1992 p.144. Боровиков А.А. и др. Труды XII ВС по УЗЧ. Дубна, 1992, т.2, с.120.
- [7] Атачкин А.Ж. и др. Сборник научных трудов МИФИ. Москва, 1998, часть 3, с.161.