



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000-21  
ОУ У-70 ОЛУ

О.К.Беляев, В.Е.Бородин, В.Б.Степанов

## ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОЧНОСТИ В УСКОРИТЕЛЕ С ВЧК-ФОКУСИРОВКОЙ

Направлено в ПТЭ

Протвино 2000

## **Аннотация**

Беляев О.К., Бородин В.Е., Степанов В.Б. Повышение электропрочности в ускорителе с ВЧК-фокусировкой: Препринт ИФВЭ 2000-21. – Протвино, 2000. – 8 с., 3 рис., 3 табл., библиогр.: 12.

На основании экспериментальных данных о проявлении электронной нагрузки в ускорителях с ВЧК-фокусировкой и их аналитической обработки сделан вывод о загрязнении электродов ускоряющей системы при работе ионной пушки. Принятые специальные меры, включающие в себя очистку протонного пучка в согласующем канале и очистку электродов ускоряющей системы с помощью ВЧ-тренировки, позволяют снизить влияние электронной нагрузки и обеспечить повышенную электропрочность ускоряющей структуры.

## **Abstract**

Beliaev O.K., Borodin V.E., Stepanov V.B. Increase of the Disrupting Strength in the Accelerator with RFQ-Focusing: IHEP Preprint 2000-21. – Protvino, 2000. – p. 8, figs. 3, tables 3, refs.: 12.

The conclusion have been done that accelerating structure electrodes are polluted by the ion gun operation. It was done in virtue of experimental data for the electron loading phenomenon in RFQ linacs and the analysis of ones. Taken spesial measures, including the cleaning of the proton beam in the Low Energy Beam Transport (LEBT) and the refining of accelerating structure electrodes by RF conditioning, permit to descrease the electron loading influence and make sure the high disruptive strength of the accelerating structure.

В линейных ускорителях ионов с ВЧК-фокусировкой применяют более высокую напряженность электрического поля на поверхностях электродов, чем в ускорителях Альвареца. В табл. 1 приведены максимальные напряженности поля на поверхности электродов в ускорительных установках с ВЧК-фокусировкой в ИФВЭ и диапазоны энергий  $\Delta W$ , в которых они ускоряют протоны.

Таблица 1.

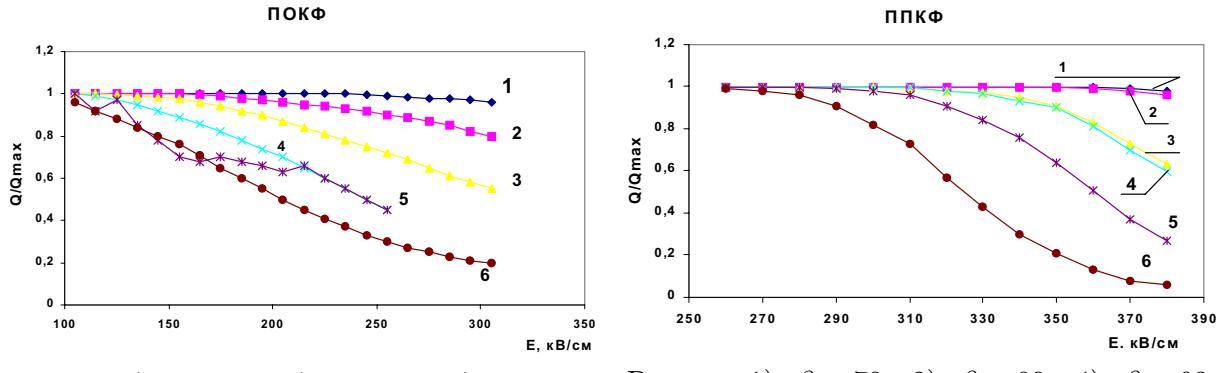
Параметры	Лите- ратура	$E_s$ , [кВ/см]		$\Delta W$ , [МэВ]		Частота пробоев, %
		ПОКФ	ППКФ	ПОКФ	ППКФ	
УРАЛ-30 (1977 г.)	—	354	480	0,1÷2,0	2,0÷30,0	10
УРАЛ-30 (1980 г.)	—	276	380	0,1÷2,0	2,0÷30,0	1
УРАЛ-30 (с 1989 г.)	[1]	225	380	0,1÷2,0	2,0÷9,0	0,02
ЛУСИ (ПЛ-10)	[7]	225	350	0,1÷2,0	2,0÷10	0,05
ДУ-1	[8]	234	—	0,04÷1,0	—	0,02
НЧУ-1,8	[9]	256	—	0,1÷1,8	—	—

Так, в ускорителе УРАЛ-30 [1] — инжекторе бустера протонного синхротрона ИФВЭ в начальной части ускорителя (НЧУ) — напряженность поля на поверхности электродов структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ или RFQ) достигает 225 кВ/см, а в основной части ускорителя (ОЧУ) на электродах структуры с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ) — 380 кВ/см. В процессе эксплуатации ускорителя отмечалось, что при такой разнице в напряженностях поля частоты пробоев в этих структурах примерно одинаковые. На основании проведенных исследований и результатов их анализа [2] сделан вывод о возможности достижения в структуре с ПОКФ такой же напряженности поля на поверхности электродов, что и в структуре с ППКФ при выполнении определенных условий.

Повышение электропрочности актуально при проектировании и создании ускорителей с ПОКФ для работы в непрерывном режиме. Выбор величины максимальной напряженности поля на поверхности электродов обусловлен минимальным количеством пробоев при максимальном токопрохождении [3]. Первое условие требует уменьшения напряженности, второе — увеличения. Выполнение таких противоречивых требований возможно при высокой электропрочности зазоров ускоряющей структуры.

В предлагаемой работе приводятся более подробные, чем в [2], экспериментальные данные и результаты их обработки, позволяющие обеспечить работу ускорителей с ВЧК-фокусировкой при повышенных напряженностях поля на поверхности электродов.

Экспериментальная зависимость относительной добротности от напряженности поля на электродах (рис. 1 ППКФ) получена для структуры с ППКФ (секция С1-1 УРАЛ-30) при выполнении работы [4]. В работе [2] по той же схеме и методике [4] на структурах с ПОКФ и ППКФ ускорителя ЛУСИ были проведены аналогичные измерения.



Расчет: 1)  $\beta_E=500$ ; 2)  $\beta_E=700$ ; 3)  $\beta_E=900$ ; 4)  $\beta_E=1100$ ; 6)  $\beta_E=1300$ .

Эксперимент: 5.

Расчет: 1)  $\beta_E=70$ ; 2)  $\beta_E=80$ ; 4)  $\beta_E=93$ ; 5)  $\beta_E=100$ ; 6)  $\beta_E=110$ .

Эксперимент: 3.

Рис.1. Зависимость относительной добротности от напряженности электрического поля на поверхности электродов при различных  $\beta_E$ .

В структуре с ПОКФ ускорителя ЛУСИ обнаружено ярко выраженное влияние электронной нагрузки, заключающееся в падении относительной добротности (уширение полосы пропускания) резонатора при увеличении сигнала в резонаторе. Экспериментально полученная зависимость относительной добротности от напряженности поля на поверхности электродов показана на рис. 1 ПОКФ. 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 ускорителя ЛУСИ Es снижена по сравнению с установкой УРАЛ-30 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, при котором плотность тока автоэмиссии описывается формулой Фаулера-Нордгейма. Обычно численные значения коэффициента локального увеличения поля  $\beta_E$  и эффективной площади эмиссии  $S_{\vartheta\phi}$ , входящие в формулу, определяются путем

обработки экспериментально полученной вольт-амперной характеристики исследуемой пары электродов.

При этом предполагается наличие на исследуемой паре одного эмиссионного центра, параметры которого ( $\beta_E$  и  $S_{\vartheta\phi}$ ) и определяются. По величине  $\beta_E$  и  $S_{\vartheta\phi}$  делается вывод о характере эмиссионного центра — механический дефект или загрязнение поверхности, вкрапление неоднородностей и т.д. [10]. При изучении влияния электронной нагрузки в резонаторах ускорителя ионов изложенная методика не реализуема из-за наличия множества электродов, с которых одновременно происходит эмиссия, и сложности непосредственного измерения вольт-амперной характеристики. Параметры и  $\beta_E$   $S_{\vartheta\phi}$  применяемой в этом случае формулы Фаулера-Нордгейма имеют обобщенный характер и могут быть определены по результатам измерений зависимости относительной добротности резонатора от напряженности поля на поверхности электродов.

Выражение для относительной добротности резонатора при наличии электронной нагрузки можно записать следующим образом:

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

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 [5].

Среднее значение плотности эмиссионного тока на высокой частоте при напряженности поля  $E_s$  на поверхности медных электродов [5]:

$$\begin{aligned} \bar{J}_F &\approx 7 \cdot 10^{-12} \cdot \Phi^{-1,75} \cdot 10^{4,52 \cdot \Phi^{-0,5}} \cdot (\beta_E E)^{2,5} \exp(-6,53 \cdot 10^9 \cdot \Phi^{1,5} / \beta_E E) = \\ &= A \cdot (\beta_E E)^{2,5} \cdot \exp(-B / \beta_E E). \end{aligned} \quad (2)$$

Численное значение коэффициентов при работе выхода меди  $\Phi \approx 4,5$  эВ

$$A = 68,03 \cdot 10^{-12}; \quad B = 62,34 \cdot 10^9. \quad (3)$$

Потери за счет электронной нагрузки:

$$P_e = S_{\vartheta\phi} \cdot \bar{J}_F \cdot U = \bar{I}_F \cdot U, \quad (4)$$

где  $U$  — межэлектродное напряжение;  $\bar{I}_F$  — ток электронной нагрузки. Тогда формула (1) может быть написана следующим образом:

$$Q/Q_{MAX} = [1 + S_{\vartheta\phi} \cdot A \cdot (\beta_E \alpha E_0)^{2,5} \cdot (-B / \beta_E \alpha E_0) \cdot U_0 / P_0 \alpha]^{-1}, \quad (5)$$

где  $E_0$ ,  $U_0$ ,  $P_0$  — напряженность поля, межэлектродное напряжение и мощность потерь в резонаторе в номинальном режиме без электронной нагрузки;  $\alpha = E/E_0 = U/U_0 = \sqrt{P/P_0}$  — коэффициент изменения параметров номинального режима.

Из формулы (5) следует система уравнений:

$$\begin{aligned} S_{\vartheta\phi} \cdot A \cdot (\beta_E \alpha E_0)^{2,5} \cdot \exp(-B / \beta_E \alpha E_0) \cdot U_0 / P_0 \alpha &= (Q_{MAX}/Q) - 1 \\ S_{\vartheta\phi} \cdot A(\beta_E E_0)^{2,5} \cdot \exp(-B / \beta_E E_0) \cdot U_0 / P_0 &= (Q_{MAX}/Q)_0 - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

Отношение этих уравнений дает выражение для коэффициента локального увеличения поля  $\beta_E$ :

$$\beta_E = 62,34 \cdot 10^9 (\alpha^{-1} - 1) / E_0 \ln \{ [(Q_{MAX}/Q)_0 - 1] \alpha^{1,5} / [(Q_{MAX}/Q) - 1] \}. \quad (7)$$

Величина эффективной площади эмиссии  $S_{\text{эф}}$  вычисляется по формуле (4), где под мощностью потерь за счет электронной нагрузки  $P_e$  понимается разность потерь в резонаторе, определенных “горячим способом”, т.е. на высоком уровне мощности, и “холодным”, т.е. без нагрузки [5, 10]. Определение  $S_{\text{эф}}$  подстановкой (7) в (6) приводит к тому же результату через громоздкие вычисления.

В результате проведенных измерений и вычислений получены следующие величины:

$$\text{структура с ПОКФ} \quad \beta_E \approx 1100; \quad S_{\text{эф}} \approx 3,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2; \quad (8)$$

$$\text{структура с ППКФ} \quad \beta_E \approx 93; \quad S_{\text{эф}} \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (9)$$

Соответствующие токи электронной нагрузки:

$$\bar{I}_{FPOK\Phi} \approx 1,7 \text{ A}; \quad \bar{I}_{FPKK\Phi} \approx 2,2 \text{ A}. \quad (10)$$

На рис. 1 показаны рассчитанные по формуле (5) зависимости для найденных значений  $\beta_E$  и  $S_{\text{эф}}$  для нескольких произвольно заданных  $\beta_E$ . Из этих графиков следует, что для устранения электронной нагрузки в структуре с ПОКФ необходимо снизить напряженность поля с 225 до 100 кВ/см или уменьшить коэффициент  $\beta_E$  до 500. Для структуры с ППКФ напряженность поля должна быть уменьшена с 380 до 300 кВ/см или коэффициент  $\beta_E$  снижен до значения менее 80. Уменьшение напряженности поля на электродах ограничено требованиями динамики частиц. Значения коэффициентов  $\beta_E$  определяются только состоянием поверхности электролов, и могут быть изменены путем специальной обработки поверхностей [10].

Большое различие найденных величин  $\beta_E$  (8), (9) для структур с ПОКФ и ППКФ может свидетельствовать о различных причинах возникновения электронной нагрузки. Согласно литературным данным [10,11], значения  $\beta_E > 200$  могут быть объяснены наличием на поверхности электролов пленок, неметаллических включений, а меньшие значения  $\beta_E$  — микронеровностями. Причина существования неровностей обычно определяется технологией обработки поверхности. Электролды структуры ППКФ ЛУСИ обрабатывались по более современной технологии, чем электролды структуры ППКФ УРАЛ-30. Экспериментально установленное отсутствие электронной нагрузки в структуре ППКФ ЛУСИ (кривая 3 на рис. 1 ППКФ) указывает на  $\beta_E < 80$  для этих электролов.

Причины появления пленок неметаллических включений могут быть различны. В работах [1,6] отмечается влияние технологии сборки и напусков атмосферы на загрязнение электролов. С целью установления причин загрязнения электролов в структуре с ПОКФ на установке ДУ-1 был проведен ряд экспериментов в определенных условиях. Ускоряющая структура собиралась в специальном обеспыленном помещении. Рабочее давление в ускорителе  $P \approx 5 \cdot 10^{-9}$  Тор обеспечивалось двумя магниторазрядными насосами НМД-0,16 и одним насосом из нераспыляемого геттера емкостью 15 л. Геттерный насос поддерживал при длительных остановках ускорителя (порядка месяца) давление, обеспечивающее включение насосов НМД-0,16 без предварительной работы форвакуумных насосов, что исключало возможное проникновение паров масла в вакуумный объем установки. Элементы вакуумного объема изготавливались из алюминиевого сплава вакуумной плавки

АМГ-6 с последующим высококачественным меднением. В течение длительного срока (с 29.12.90 г. по 06.05.93 г.) в вакуумный объем атмосфера не напускалась.

ВЧ-питание ускоряющей системы (УС) осуществлялось по автогенераторной схеме с включением УС в цепь обратной связи. По этой причине измерение зависимости относительной добротности от уровня поля в резонаторе не проводилось. Влияние загрязнений электродов на эмиссионные явления, приводящее к электронной нагрузке и снижению электрической прочности, оценивалось по мощности дозы рентгеновского излучения ( $P_X$ ) и характеру ее распределения по длине ускоряющей системы. Измерения  $P_X$  проводились в контрольных точках (в начале и конце ускорителя) ДУ-1 без пучка ускоренных ионов при фиксированном уровне поля в резонаторе после выполнения различных операций с УС (табл. 2). Результаты измерений представлены на рис. 2.

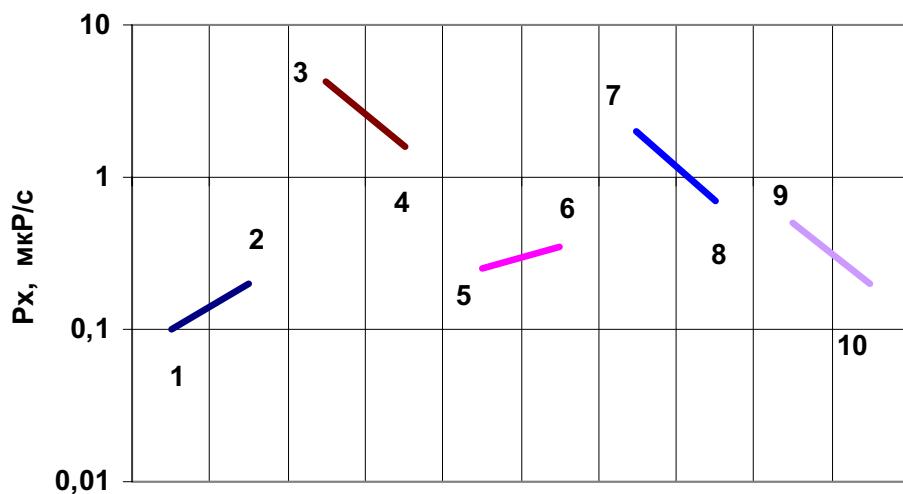


Рис. 2. Изменение  $P_X$  во времени и по длине установки ДУ-1.

Таблица 2.

Обозначения на рис. 2	Дата измерения $P_X$	Операция, предшествовавшая измерению $P_X$
1 ÷ 2	29.12.90 г.	Первое включение установки без пучка
3 ÷ 4	06.05.93 г.	Длительная работа установки с ионной пушкой
5 ÷ 6	16.06.93 г.	Проведена механическая очистка электродов и покрытие их TiN
7 ÷ 8	29.06.95 г.	Эпизодическая работа установки с ионной пушкой
9 ÷ 10	06.02.96 г.	ВЧ-тренировка установки без пучка

Из рис. 2 (отрезки: 1 – 2 и 3 – 4) видно, что уровень и распределение  $P_X$  вдоль УС значительно изменились через 3 года после включения установки [2]. Кроме резкого увеличения рентгеновского излучения произошло изменение наклона (со сменой знака производной) распределения  $P_X$  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 растрюба, в котором напряженность поля значительно ниже значения, указанного в табл. 1. Проведенная тренировка ВЧ-мощностью не изменила ситуацию с рентгеновским излучением.

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 отрезок 5 – 6).

Затем за время, равное примерно двухлетней эпизодической работе установки, снова был зафиксирован рост рентгеновского излучения преимущественно в начале канала ускорения (отрезок 7–8). ВЧ-тренировкой УС удалось вернуть уровень  $P_X$  к первоначальному значению (отрезок 9 – 10).

Из анализа данных следует: возрастание величины рентгеновского излучения при вводе ВЧ-мощности происходит после работы ускорителя с ионной пушкой; чистка электродов УС резко снижает уровень рентгеновского излучения. Это позволяет сделать вывод, что причиной загрязнения электродов структуры с ПОКФ, приводящего к появлению электронной нагрузки и снижению электрической прочности, являются продукты работы ионной пушки (ИП).

В установке с ПОКФ НЧУ-1,8 (табл. 1) были приняты меры для уменьшения загрязнения электродов. В согласующий канал с двумя линзами между ИП и УС были включены две диафрагмы различной формы для фильтрации протонного пучка [9], позже между ними был установлен расширительный объем для уменьшения поступления газовой компоненты в НЧУ-1,8. Оценка количества частиц, поступающих в УС из ИП, проведенная по малой величине изменения давления в объеме НЧУ-1,8, показала, что при срабатывании клапана напуска водорода в ИП в УС выбрасывалось не более  $10^{13}$  частиц за импульс. Эта величина соизмерима с числом ускоряемых протонов за время импульса 10 мкс. Давление внутри вакуумного объема не превышало  $5 \cdot 10^{-8}$  Тор. На рис. 3 показана динамика изменения уровня рентгеновского излучения за длительный период наблюдения за работой установки НЧУ-1,8 (табл. 3).

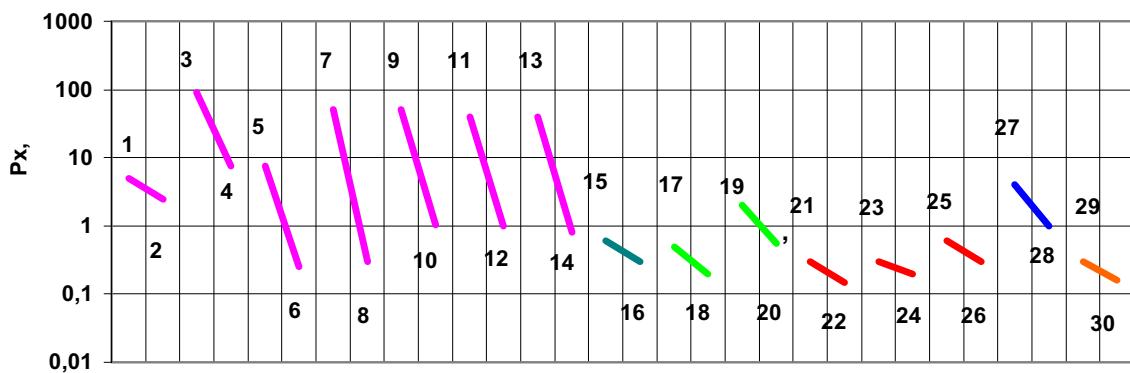


Рис. 3. Изменения  $P_X$  во времени и по длине на установке НЧУ-1,8.

Из анализа представленных результатов следует, что после проведения наладочных работ и запуска установки для снижения влияния загрязнений электродов, кроме мер по очистке пучка из ИП, требуется периодическая очистка электродов УС. Механическая очистка необходима в случае сильного загрязнения, характеризующегося возрастанием уровня рентгеновского излучения более чем в 10 раз (в рассматриваемом слу-

чае  $P_X = 100$  мкР/с). Периодическая очистка электродов УС ВЧ-тренировкой в течение  $50 \div 70$  часов эффективна при возрастании уровня рентгеновского излучения в  $5 \div 6$  раз (в рассматриваемом случае  $P_X = 5 \div 7$  мкР/с). При проведении периодической очистки электродов на установке НЧУ-1,8 с ПОКФ было зафиксировано значительное повышение электропрочности. Экспериментально полученное значение напряженности на электродах превысило в 3,4 раза напряженность по критерию Килпатрика, т.е. около 450 кВ/см, что близко к напряженностям, наблюдаемым на электродах структуры с ППКФ (табл. 1).

Таблица 3.

Обозначения на рис.3	Дата измерения $P_X$	Операция, предшествовавшая измерению $P_X$
1 $\div$ 2	21.12.95 г.	Первое включение установки без пучка
3 $\div$ 4	21.12.96 г.	Работа установки с ИП и напуском атмосферы
5 $\div$ 6	25.12.96 г.	Тренировка установки без пучка $f=5$ Гц; $T_{раб.}=50$ ч
7 $\div$ 8	20.01.97 г.	Работа установки с ИП
9 $\div$ 10	24.01.97 г.	Ликвидация аварии вакуумного оборудования; напуск атмосферы
11 $\div$ 12	02.04.97 г.	Работа установки с ИП
13 $\div$ 14	18.04.97 г.	ВЧ-тренировка установки без пучка: $f=5$ Гц; $T_{раб.}=40$ ч
15 $\div$ 16	30.09.97 г.	Механическая очистка электродов
17 $\div$ 18	06.02.98 г.	Работа с ИП после установки расширительного объема в согласующем канале
19 $\div$ 20	13.05.98 г.	Работа установки с пучком, $I=120$ мА
21 $\div$ 22	03.06.98 г.	ВЧ-тренировка установки без пучка: $f=5$ Гц ( $T_{раб.}=33$ ч), $f=10$ Гц ( $T_{раб.}=12$ ч)
23 $\div$ 24	16.12.98 г.	Работа с пучком, $I=20$ мА
25 $\div$ 26	21.04.99 г.	Работа с пучком, $I=20$ мА
27 $\div$ 28	14.10.99 г.	Работа с пучком $I=10$ мА без расширительного объема
29 $\div$ 30	05.11.99 г.	Тренировка установки без пучка: $f=5$ Гц, $T_{раб.}=69$ ч

## Заключение

Результаты наблюдений и измерения показали, что основной причиной существования электронной нагрузки в ускоряющей структуре с ПОКФ (при исключении напусков атмосферы и проникновения паров масла из форвакуумного насоса) 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 микроперовностями 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 позволило 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. Кроме того, показана необходимость ведения регулярного контроля за величиной уровня и распределением рентгеновского излучения вдоль УС для оценки степени загрязнения электродов.

### Список литературы

- [1] Zenin V.A., Maltsev A.P., Maltsev I.G. et al. — In: Proceedings of the 1994 Int. LC. Tsukuba, Japan, 1994, v.1, p.158.  
Зенин В.А., Мальцев А.П., Мальцев И.Г. и др. Препринт ИФВЭ 93-147, Протвино, 1993.
- [2] Беляев О.К., Степанов В.Б. — В сб.: Труды XVI Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1999, т.1, с.228.
- [3] Ferdinand R., Duperrier R. //IPHI REQ Reliability Approach. NEA/OECD Utilisation and Reliability of High Power Accelerators Workshop. Aix en Provence, 1999.
- [4] Belyaev O.K., Gamarsky V.P., Gladkov A.V. et al. — In: Proceedings of the 1990 Int. LC. Albuguerue, New Mexico, 1991, p.743.  
Беляев О.К., Гамарский В.П., Гладков В.В. и др.//ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования, Харьков, 1990, вып. 10(18), с.38.
- [5] Belyaev O.K. — In: Proceedings of the 1994 Int. LC. Tsukuba. Japan, 1994, v.1, p.222. 6.
- [6] Зенин В.А. Чиманков М.Н. Препринт ИФВЭ 87-36, Серпухов 1987.
- [7] Линейный ускоритель ЛУСИ (ПЛ-10). Проспект на Международной научно-технической выставке-ярмарке идей и технологий "Будущее России" — Протвино, 1994.
- [8] Borovikov A.A. , Ershov O.V., Maltsev A.P. et al. — In://Abstracts for the XII Int. Conf. on Application of Accelerators in Research and Industry. Denton, Texas, USA , 1992, p.144.  
Боровиков А.А., Ершов О.В., Мальцев А.П. и др. — В сб.: Труды XII ВС по УЗЧ. Дубна 1992, т.2, с.120.
- [9] Атачкин А.Ж., Беляев О.К., Голубков В.П. и др. Сборник научных трудов МИФИ. Москва 1998, часть 3, с. 161.
- [10] Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [11] Wang J.W. RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Colliders; SLAC-339, VC-28 (A), July 1989.
- [12] Атачкин А.Ж., Андрианов М.Н., Беляев О.К. и др. — В сб.: Труды XIV Совещания по УЗЧ. Протвино, 1994, т. 3, с. 137.

*Рукопись поступила 15 июня 2000 г.*

О.К.Беляев, В.Е.Бородин, В.Б.Степанов.  
Повышение электропрочности в ускорителе с ВЧК-фокусировкой.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.  
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 19.06.2000. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.  
Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 0,8. Тираж 120. Заказ 134. Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2000-21, ИФВЭ, 2000

---