

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2327/82

13/12-82

9-82-110

А.А.Глазов, Е.Н.Заплатин, Б.Е.Корнеев,
В.А.Кочкин, Б.Н.Марченко, Л.М.Онищенко

С-ЭЛЕКТРОД УСТАНОВКИ "Ф"

1982

Система растяжки выведенного пучка протонов при помощи С-электрода, как показали эксперименты на синхроциклотроне^{1,2/}, является достаточно эффективной, и поэтому такую систему предполагается использовать на установке "Ф". Общие требования к системе растяжки пучка установки "Ф" при помощи С-электрода сформулированы в работе^{3/}. Вкратце они сводятся к следующему: средняя частота системы $f_0 = 14,48$ МГц, девиация частоты $\Delta f_{II} = \pm 30$ кГц, набор энергии за оборот $\Delta W = 15$ кэВ, максимальный радиус $r_m = 2745$ мм, эффективная ширина дорожки $\Delta r = 14,3$ см.

Задача состоит в том, чтобы удовлетворить указанным требованиям оптимальным образом при условии простоты конструктивной схемы С-электрода, минимальной необходимой ВЧ мощности, удобства эксплуатации. Решение ее усложняется заданностью геометрии ускорительной камеры и возможностью значительных радиационных нагрузок вблизи ускорителя. Первое обстоятельство ограничивает выбор конструкций С-электрода, а второе приводит к необходимости размещения ВЧ аппаратуры за защитой на значительном расстоянии от нагрузки.

ВЫБОР СХЕМЫ И РАСЧЕТ С-ЭЛЕКТРОДА

Из энергетических и геометрических соображений С-электрод должен работать на первой кратности частоты обращения протонов. Электрически С-электрод представляет собой два отрезка плоской линии с волновым сопротивлением Z_{OC} длиной $\bar{R}\theta/2$ /где \bar{R} - средний радиус, θ - угловая протяженность С-электрода/, разомкнутых на одном конце и подключенных другим концом к коаксиальной четвертьволновой короткозамкнутой линии. Его параметры в точке подключения к линии определяются выражениями

$$U'_{вх\ c} = U'_m \cos\left(\frac{\beta \bar{R} \theta}{2}\right), \quad /1/$$

$$Z_{вх\ c} = -j \frac{Z_{OC}}{2} \operatorname{ctg}\left(\frac{\beta \bar{R} \theta}{2}\right),$$

где U'_m - нормированное ускоряющее напряжение:

$$U'_m = \frac{U_m}{\Delta W} = \frac{\ell}{2} \sin \frac{\theta}{2}, \quad /2/$$

а волновое сопротивление Z_{0c} с учетом провисания поля определяется выражениями

$$Z_{0c} = \frac{100}{3\epsilon_1} \text{ [Ом]},$$

$$\epsilon_1 = [\Delta r + 2b + \frac{h}{2}] / 0,9\pi a \text{ [пФ/см]},$$

/3/

$$a = H - h \text{ [см]},$$

$$b = [H \ln \frac{2H-h}{a} - h \ln \frac{h(2H-h)}{a}] / \pi \text{ [см]},$$

где h - эффективный вертикальный размер С-электрода /апертура + 1 см/, и предполагается, что его радиальная протяженность равна $(\Delta r + h/2)$.

Был выполнен расчет такой резонансной /С-электрод плюс четвертьволновая линия/ системы для С-электродов различной угловой протяженности при разных апертурах. Предполагалось, что наружный диаметр резонансной линии - 200 мм, волновое сопротивление - 51 Ом.

Вкратце результаты расчета сводятся к следующему: при изменении угловой протяженности электрода от 30 до 90 градусов мощность потерь P_a изменяется примерно от 3 кВт до 600 Вт, длина резонансной линии ~ от 4 до 2 м, добротность Q_c остается примерно постоянной и близкой к 2000.

Видно, что собственная полоса частот системы

$$2\Delta f_c = f_0 / Q_c \leq 8,5 \text{ кГц}$$

/4/

значительно меньше необходимой девиации частоты на С-электроде.

Расширение полосы можно осуществить, нагружая контур сосредоточенным сопротивлением /1/ или используя связанные контуры /4/. В случае питания системы через длинный фидер второй вариант становится неприемлемым ввиду очень значительного изменения входного сопротивления в рабочем диапазоне частот.

Мощность потерь, связанная с получением необходимой полосы частот контура $\pm \Delta f_H$, определяется выражением

$$P_a = P_{\text{reak}} / Q_H = P_{\text{reak}} 2 \frac{\Delta f_H}{f_0},$$

/5/

где P_{reak} - реактивная мощность.

На рис.1 показана зависимость P_{reak} от угловой протяженности С-электрода / $h = 50$ мм/. Видно, что реальным компромиссом /потери-размеры/ является С-электрод с угловой протяжен-

Рис.1. Зависимость реактивной мощности от угловой протяженности С-электрода.

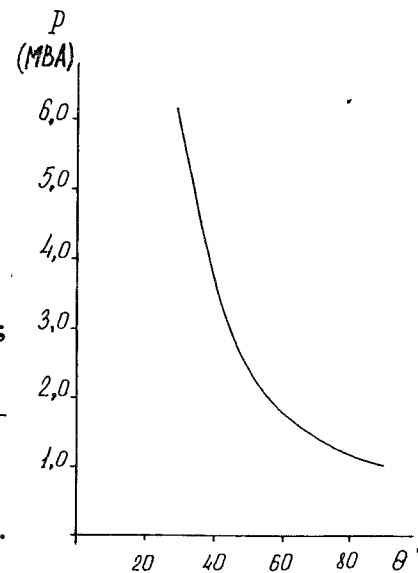
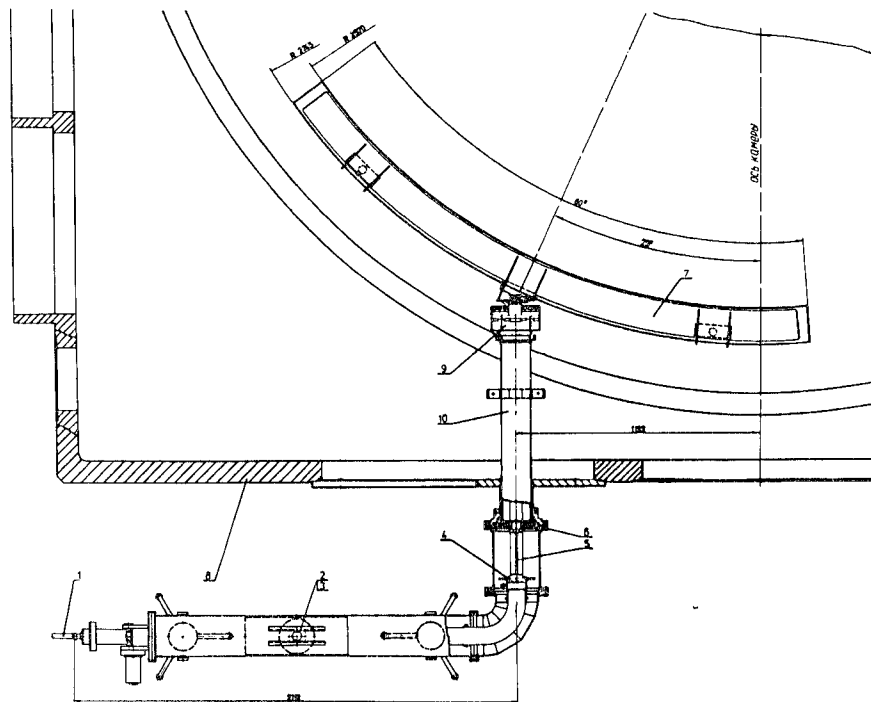


Рис.2. Конструкция С-электрода и резонансной линии: 1 - ввод воды; 2,3 - водоохлаждаемый резистор и высокочастотный разъем; 4 - конденсатор; 5 - ввод воды охлаждения С-электрода; 6 - проходной изолятор; 7 - С-электрод; 8 - ускорительная камера; 9 - система крепления С-электрода в ускорительной камере; 10 - 50-омная резонансная линия.



ностью 60 градусов. Конструкция С-электрода представлена на рис.2, расчетные параметры в табл.1. При этом в соответствии с /5/ суммарная мощность потерь для получения необходимой полосы частот /контур плюс шунтирующее сопротивление/ $P_{a\Sigma}$ должна составлять 8 кВт.

Таблица 1

θ	U_{max}	I_{bc}	P_{ac}	P_{max}	l_a	I_{dmax}	P_{al}	P_{paal}	P_{paal2}	Q
град	кВ	А	Вт	МВА	м	А	Вт	МВА	МВА	-
60	15	195	100	1,416	3,09	330	850	0,514	1,93	2000

ВОЗБУЖДЕНИЕ С-ЭЛЕКТРОДА

Эквивалентная схема контура С-электрода в точке возбуждения при кондуктивной связи представляет собой параллельно включенные импеданс С-электрода и резонансной линии Z , активного сопротивления линии R_L и шунтирующего сопротивления R , пересчитанного в точку включения, R_3 ; причем Z определяется запасенной энергией, R_L - мощностью потерь в линии, R_3 - мощностью потерь в сопротивлении /в том случае, когда точки подключения сопротивления и связи совпадают, $R_3=R$ /:

$$R_{BX} = U_{BX}^2 / 2P_{a\Sigma} = Z_0^2 I_m^2 \sin^2(\beta_0 l_{BX}) / 2P_{a\Sigma},$$

$$R_L = Z_0^2 I_m^2 \sin^2(\beta_0 l_{BX}) / 2P_{ал} = R_{BX} (P_{a\Sigma} / P_{ал}), \quad /6/$$

$$R_3 = R \sin^2(\beta_0 l_{BX}) / \sin^2(\beta_0 l_R),$$

$$P_{a\Sigma} = 8 \text{ кВт.}$$

Поскольку R_{BX} образуется в результате параллельного соединения R_L и R_3 ,

$$R_3 = R_L R_{BX} / (R_L - R_{BX}) = R_{BX} (P_{a\Sigma} / P_{ал}) / (P_{a\Sigma} / P_{ал} - 1). \quad /7/$$

Приведенные выражения и данные табл.1 позволяют установить связь между l_{BX} и R_{BX} , l_X и R .

Импеданс контура имеет вид

$$Z = \frac{R_{BX}}{1 + \kappa^2 (\Delta f)^2} - j \frac{R_{BX} \alpha \Delta f}{1 + \kappa^2 (\Delta f)^2}, \quad /8/$$

где Δf - отклонение частоты от резонансной, $\kappa = 2Q_H / f_0$.

На краях полосы $\kappa \Delta f = \pm 1$ и

$$Z = \frac{R_{BX}}{2} \mp j \frac{R_{BX}}{2}, \quad /8'/$$

т.е. фидер возбуждения оказывается нагруженным на комплексное сопротивление, компоненты которого по абсолютной величине равняются половине сопротивления при резонансе. В связи с этим встает вопрос, каким должно быть соотношение между R_{BX} и Z_0 кабеля, чтобы отраженная мощность в диапазоне частот была минимальной.

В том случае, когда затухание в фидере мало, т.е. во всех практически интересных случаях, волновое сопротивление фидера Z_0 можно считать действительным и усредненный поток мощности, проходящий по фидеру, будет равняться разности мощностей падающей $P_{пад}$ и отраженной $P_{отр}$ волн:

$$P = P_{пад} - P_{отр} = P_{пад} (1 - |\dot{\Gamma}|^2), \quad /9/$$

где коэффициент отражения по напряжению $\dot{\Gamma}$ определяется выражением

$$\dot{\Gamma} = \frac{U_{отр}}{U_{пад}} e^{-2\gamma\xi} = \frac{U_{отр}}{U_{пад}} e^{-2(\alpha\xi + j\beta\xi)}, \quad /10/$$

α - коэффициент затухания, β - постоянная распространения фидера, ξ - расстояние от нагрузки. В месте включения кабеля и резонансной линии $\xi = 0$, $Z_H = r_H + jx_H$,

$$|\dot{\Gamma}_H|^2 = \frac{(r_H - Z_0)^2 + x_H^2}{(r_H + Z_0)^2 + x_H^2} e^{-4\psi}, \quad \text{tg}\psi = \frac{2x_H Z_0}{(r_H^2 + x_H^2) - Z_0^2}. \quad /11/$$

И, следовательно,

$$\frac{P_{отр}}{P_{пад}} \Big|_H = |\dot{\Gamma}_H|^2 = \frac{(r_H - Z_0)^2 + x_H^2}{(r_H + Z_0)^2 + x_H^2}. \quad /12/$$

На краю полосы пропускания контура С-электрода $x_H = R_H = R_{BX} / 2$ и, следовательно,

$$|\dot{\Gamma}_{HK}|^2 = \frac{(1-y)^2 + 1}{(1+y)^2 + 1}, \quad /13/$$

где $y = 2Z_0 / R_{BX}$.

Выражение /13/ стремится к 1 при $y \rightarrow 0$ или бесконечности и имеет минимум в точке

$$y_{min} = \sqrt{2} \quad \text{или} \quad R_{BX} = \sqrt{2} \cdot Z_0. \quad /14/$$

Таблица 2

y	1,0	1,25	$\sqrt{2}$	1,5	1,75	2,0
$(P_{отр} / P_{пад})_r$	0,2000	0,1753	0,1716	0,1724	0,1825	0,2000
$(P_{отр} / P_{пад})_p$	0,1111	0,0532	0,0294	0,0204	0,0044	0,0000

Таблица 3

L_k	м	0	10	20	30	50	80	100	
ПК-50-11-21	$P_{гр}$	кВт	7,73	8,16	8,63	9,12	10,18	12,01	13,42
	$P_{гк}$	кВт	9,05	9,55	10,10	10,63	11,92	14,06	15,70
ПК-50-24-16	$P_{гр}$	кВт	7,73	7,79	7,86	7,93	8,06	8,33	8,4
	$P_{гк}$	кВт	9,05	9,12	9,20	9,28	9,44	9,76	9,84

В табл. 2 представлены отношения $P_{отр} / P_{пад}$, рассчитанные по формуле /13/ для ряда значений y , а также соответствующие значения $P_{отр} / P_{пад}$ при резонансе, рассчитанные с помощью выражения

$$\frac{P_{отр}}{P_{пад}} \Big|_p = \frac{(1 - y/2)^2}{(1 + y/2)^2} \quad /15/$$

Для кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом в соответствии с /14/ входное сопротивление С-электрода должно быть

$$R_{вх} = 70,71 \text{ Ом.}$$

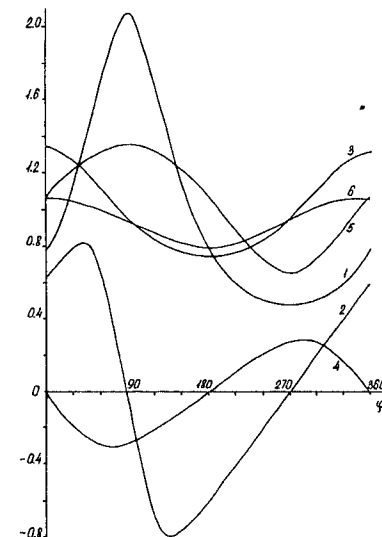
Падающая мощность, поступающая к нагрузке $P_{нп}$, в связи с потерями в кабеле будет меньше, чем мощность генератора $P_{г}$:

$$P_{г} = P_{нп} e^{2\alpha l} \quad /16/$$

где $P_{нп} = P_{н} / (1 - |\Gamma_{н}|^2)$, $P_{н}$ - мощность в нагрузке, l - длина кабеля.

Среди ВЧ кабелей, обеспечивающих передачу необходимой мощности, конструктивно наиболее удобным /тонким/ является кабель РК-50-11-21 с коэффициентом затухания α , на частоте 14 МГц равным $2,76 \cdot 10^{-3}$ н/м. Может быть также использован кабель

Рис. 3. Входные характеристики фидера /1 - $\text{Re}(\frac{Z_{вх}}{Z_0}) = f(\phi)$ /, /2 - $\text{Im}(\frac{Z_{вх}}{Z_0}) = f(\phi)$ / на краю полосы пропускания; 3 - $\text{Re}(\frac{Z_{вх}}{Z_0}) = f(\phi)$, 4 - $\text{Im}(\frac{Z_{вх}}{Z_0}) = f(\phi)$ в центре полосы пропускания; 5 - $|U_{вх} / U_0| = f(\phi)$ на краю полосы пропускания; 6 - $|U_{вх} / U_0| = f(\phi)$ в центре полосы пропускания.



РК-50-24-16, который благодаря большим размерам имеет значительно меньший коэффициент затухания:

$$\alpha_{f=14 \text{ МГц}} = 4,18 \cdot 10^{-4} \text{ /н/м/}.$$

В табл. 3 представлены значения $P_{г}$ при резонансе и на краю полосы в зависимости от длины кабеля /РК-50-11-21 и РК-50-24-16/ для случая, когда $R_{вх \text{ рез}} = \sqrt{2} Z_0$ кабеля, а $P_{н} = 8$ кВт.

Входное сопротивление фидера в точке подключения к генератору определяется выражением

$$Z_{вх} = Z_0 \frac{1 + \Gamma e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma e^{-2\gamma l}} \quad /17/$$

которое можно представить, воспользовавшись /11/ и /14/, в виде

$$\frac{Z_{вх}}{Z_0} = \frac{1 - a^2 e^{-4\alpha l} - j 2a e^{-2\alpha l} \sin \phi}{1 + a^2 e^{-4\alpha l} - 2a e^{-2\alpha l} \cos \phi} \quad /18/$$

где в центре полосы пропускания

$$a_p = (\sqrt{2} - 1)^2, \quad \sin \phi_p = \sin 2\beta l, \quad \cos \phi_p = \cos 2\beta l, \quad /19/$$

а на краю

$$a_k = (\sqrt{2} - 1), \quad \sin \phi_k = -\cos 2\beta l, \quad \cos \phi_k = \sin 2\beta l. \quad /20/$$

Видно, что с ростом $al \dot{Z}_{BX}/Z_0 \rightarrow 1$, однако при приемлемых значениях потерь в кабеле вариации \dot{Z}_{BX} при изменении его длины довольно значительны. На рис.3 приведены значения \dot{Z}_{BX}/Z_0 для кабеля РК-50-11-21 с начальной длиной $l = 2\lambda_k / 29,28$ м/ при изменении его длины с шагом $\sim 0,61$ м ($\Delta\phi = 30^\circ$), рассчитанные для центра и края полосы пропускания С-электрода. Там же представлены величины напряжения, полученные с помощью выражения

$$\left| \frac{\dot{U}}{U_H} \right| = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Z_0^2}{\rho^2} \right) \operatorname{ch} 2\alpha\xi + \frac{Z_0 R}{\rho^2} \operatorname{sh} 2\alpha\xi + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Z_0^2}{\rho^2} \right) \cos 2\beta\xi + \frac{Z_0 x}{\rho^2} \sin 2\beta\xi, \quad /21/$$

где $\rho^2 = R^2 + x^2$, $R_p = \sqrt{2} Z_0$, $x_p = 0$, $R_k = x_k = Z_0 / \sqrt{2}$.

Изменение фазовой длины фидера, связанное с изменением частоты в процессе девиации

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \frac{2\pi l}{c} \Delta f, \quad /22/$$

где c - скорость света, для рассматриваемого случая не принимается во внимание, т.к. составляет всего $1 \div 2$ градуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А.А. и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т.1, с.242.
2. Марченко Б.Н., Томила Т.Н., Яковлев В.А. ОИЯИ, Р9-12-621, Дубна, 1979.
3. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-12-882, Дубна, 1979.
4. Fiebig A., Hohbach R. Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Appl. Basel, 1975, p.175-179.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 февраля 1982 года.

Глазов А.А. и др.

9-82-110

С-электрод установки "Ф"

Проводится расчет параметров системы растяжки пучка с помощью С-электрода. Основные требования к системе растяжки: средняя частота системы - 14,48 МГц, девиация частоты ± 30 кГц, набор энергии за оборот - 15 кэВ, максимальный радиус - 2745 мм, эффективная ширина дорожки - 143 мм. Электрически С-электрод представляет собой два отрезка плоской линии в форме сегмента, разомкнутых на одном конце и подключенных другим концом к коаксиальной четвертьволновой короткозамкнутой линии. В связи с наличием значительных радиационных нагрузок в месте расположения С-электрода учитывается необходимость размещения ВЧ аппаратуры за защитой на значительном расстоянии от системы растяжки.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Glazov A.A. et al.

9-82-110

C-Electrode of "F" Installation

Parameters of the system of beam stretching by means of C-electrode are calculated. The main requirements for beam stretching are: average frequency - 14.48 MHz, frequency deviation ± 30 kHz, energy gain - 15 keV, maximum radius - 2745 mm, path effective length - 143 mm. Electrically C-electrode involves two sections of a plane line having a form of a segment, open on one end and connected by the other end to coaxial quarter-wave short-circuit line. Due to significant radiation loads in the place of C-electrode location, it is necessary to position H.F. apparatus behind the protection on a sufficient distance from the load.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.