

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

941/2-80

3/3-80

P9 - 12882

С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин

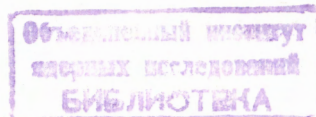
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМЫ РАСТЯЖКИ ПУЧКА УСТАНОВКИ "Ф"
ПРИ ПОМОЩИ Си-ЭЛЕКТРОДА

1979

P9 - 12882

С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМЫ РАСТЯЖКИ ПУЧКА УСТАНОВКИ "Ф"
ПРИ ПОМОЩИ Си-ЭЛЕКТРОДА



Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П.,
Заплатин Н.Л.

P9 - 12882

Расчет параметров системы растяжки пучка
установки "Ф" при помощи Си-электрода

Увеличение длительности импульса протонного пучка сильноточного фазотрона ОИЯИ предполагается осуществлять при помощи дополнительной ускоряющей системы - Си-электрода. Целью работы являлся выбор оптимальных параметров системы растяжки пучка. Исследование проводилось путем численного моделирования на ЭВМ процесса растяжки. Выбранные параметры системы согласованы с ускорительными режимами и условиями внешнего вывода пучка. Найдены режимы растяжки, обеспечивающие 100%-ную эффективность работы системы при минимальном напряжении на Си-электроде.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Vorozhtsov S.B., Dmitrievsky V.P.,
Zaplatin N.L.

P9 - 12882

Calculation of the C-Electrode Beam Stretching
System for the JINR Phasotron

Secondary accelerating system, C-electrode, will be used for producing long proton pulses of the high current JINR phasotron. The purpose of this paper is calculation of the optimal beam stretching system parameters. The results of the computer simulation of the beam stretching process for the high current phasotron are given. The parameters of the beam stretching system are chosen in accordance with the acceleration modes and the beam extraction conditions. The beam stretching regimes with 100% efficiency and minimum C-electrode voltage are found.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Увеличение длительности импульса протонного пучка сильноточного фазотрона ОИЯИ /установка "Ф"/^{1/} предполагается осуществлять при помощи дополнительной ускоряющей системы - Си-электрода^{2/}. Расчет параметров системы растяжки пучка проводился описанным в работе^{3/} методом. Общая схема ускоряющей камеры установки "Ф" с указанием вероятного расположения Си-электрода приведена на рис. 1.

РЕЖИМЫ УСКОРЕНИЯ
ПУЧКА

Оптимальная работа системы
растяжки предполагает согла-
сование ее параметров с фазо-

вым движением пучка под контролем основной ускоряющей системы - дуанта. Частотная программа дуанта, измеренная на макете вариатора, представлена на рис. 2. Масштаб времени на этом рисунке определялся заданием времени ускорения $t_{\text{уск}} \approx 1,04$ мс и рабочим диапазоном частот $f_D = 18,20 - 14,41$ МГц. Время ускорения согласно^{1/} находилось исходя из максимального значения средней интенсивности пучка, зависящей от времени его захвата, и размера фазовой площади сепаратрис дуанта $A_{\text{БД}}$ в центре ускорителя. Ввиду имеющегося запаса по нижней и верхней частоте дуантной программы рабочий ход составляет $\approx 56\%$ периода модуляции. Расчет фазовой площади сепаратрисы в зависимости от радиуса при напряжении на дуанте $V_{\text{мД}} = 50$ кВ /рис. 3/ показал, что для экспериментальной частоты $f_{\text{Д эксп}}(t)$ наблюдается уменьшение фазовой площади в зоне $R = 1,5$ м, что приводит к потерям частиц. Сравнение сепаратрис для центра ускорителя /1/ и для /2/ минимума $A_{\text{БД min}} = 300$ МэВ·нс приведено на этом же рисунке. Коррекция частотной программы для получения $A_{\text{БД}} = A_{\text{БД0}} = 470$ МэВ·нс определялась путем решения дифференциального уравнения первого порядка^{4/}:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{R^2}{2} \right) = \frac{\psi_1(R, t)}{\psi_2(R)},$$

/1/

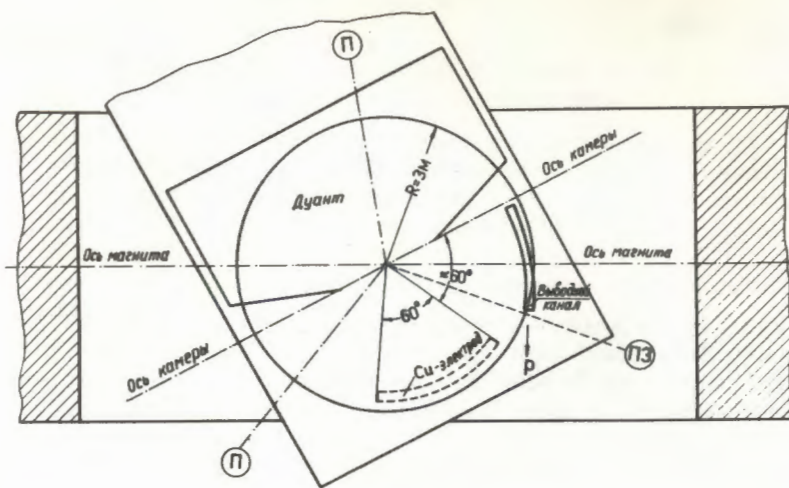


Рис. 1. Схема ускорительной камеры установки "Ф".

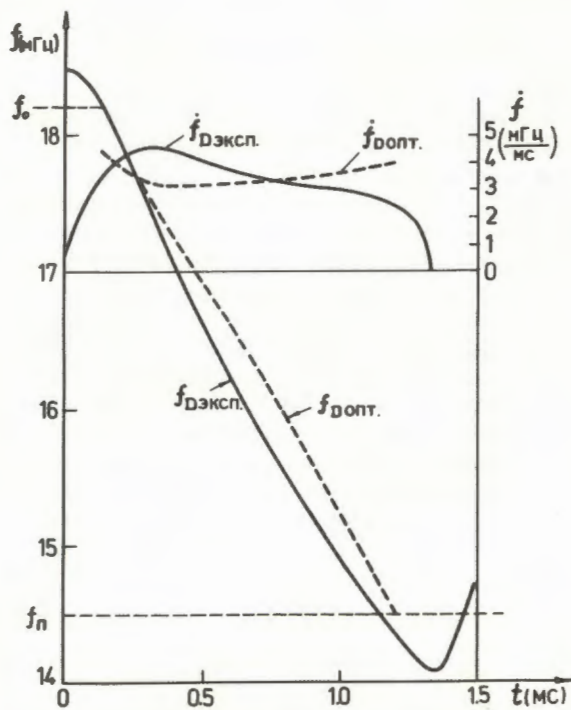


Рис. 2. Частотная программа дуанта.

где

$$\psi_1 = f_D = - \frac{\cos \phi_{SD} \Delta W_{mD} \cdot K \cdot f_D^2}{E}, \quad /2/$$

R - энергетический радиус частицы /м/, ΔW_{mD} - максимальный набор энергии за оборот /эВ/, E - полная энергия /эВ/, ϕ_{SD} - равновесная фаза, определяемая из условия $A_{bD} = \text{const}$,

$$\psi_2 = \frac{1}{R} \frac{df_D}{dR} = \left(\frac{2\pi}{c}\right)^2 f_D^3 \left[\left(\frac{E_0}{BRc}\right)^2 n - 1 \right], \quad /3/$$

B - среднее магнитное поле (Т),

$$n = \frac{R}{B} \frac{dB}{dR},$$

c - скорость света /м/с/.

При вычислении частоты обращения частиц и параметра K считалось, что равновесная орбита мало отличается от круговой. Результаты расчета оптимальной частотной программы $f_{D \text{ опт.}}(t)$ при $A_{bD} \approx 470$ МэВ·нс представлены на рис. 2.

При неизменной частотной программе дуанта исключения фазовых потерь частиц в районе $R = 1,5$ см можно добиться за счет варьирования напряжения V_{mD} таким образом, чтобы $A_{bD} \approx A_{bD \text{ мин}} = 300$ МэВ·нс во всем диапазоне ускорения. Технически это осуществляется при помощи быстродействующего программируемого модулятора автогенератора ускорителя ^{15/}. Такой режим работы обеспечивает минимальную потребляемую в.ч. мощность при заданной интенсивности внутреннего пучка протонов. Требуемое значение V_{mD} находится исходя из решения уравнения ^{14/}

$$A_{bD \text{ мин}} = c_2 \sqrt{V_{mD}} \cdot \alpha \left(\frac{c_1}{V_{mD}} \right), \quad /4/$$

где

$$c_1 = - \frac{E f_D}{2K \cdot f_D^2},$$

$$c_2 = \frac{8}{\pi^{3/2} \cdot f_D} \sqrt{\frac{E}{K}}, \quad /5/$$

$\alpha(\cos \phi_{SD})$ - нормализованная площадь сепаратрисы. Результат вычисления V_{mD} по уравнению /4/ с шагом по времени $\Delta t = 57,6$ мкс представлен на рис. 4.

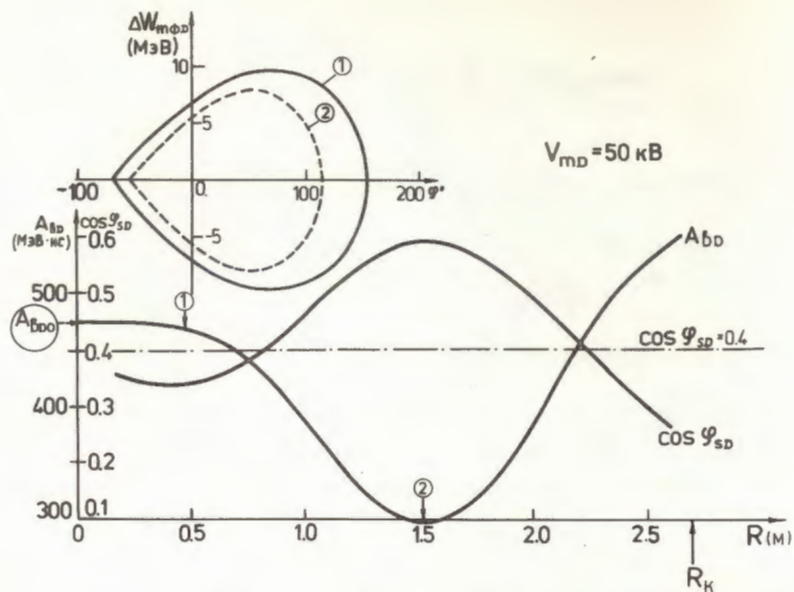


Рис. 3. Параметры фазового движения в дуанте.

Первоначальный запуск сильноточного фазотрона предполагается осуществлять при пониженной интенсивности ускоренных частиц $I \approx 10$ мкА вместо планируемой $I \approx 50$ мкА. Для обеспечения такого режима необходимо найти зависимость $V_{мД}(t)$ для $A_{бД} \approx 100$ МэВ·нс. При этом предполагается, что для заданной частоты модуляции дуантной программы $f_{мод} \approx 543$ Гц интенсивность пучка прямо пропорциональна величине фазовой площади сепаратрисы $A_{бД}$. На рис. 4 представлена зависимость $V_{мД}(t)$ для этого режима.

Таблица 1

Режим ускорения	1	2	3
$A_{бД}$ /МэВ·нс/	100	300	470
$f_{Д}$	$f_{Д \text{ эксп.}}$	$f_{Д \text{ эксп.}}$	$f_{опт.}$
$V_{мД}$ /кВ/	19-37	7,5-50	14,7-50
I /мкА/	10	30	50

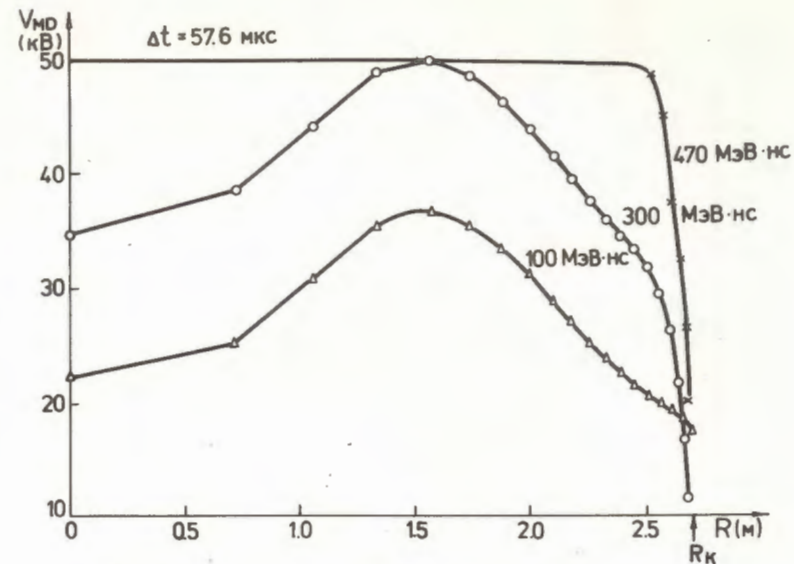


Рис. 4. Модуляция напряжения на дуанте.

Таким образом, можно выделить три режима ускорения пучка при помощи основной ускоряющей системы /табл. 1/. Резкое уменьшение $V_{мД}$ вблизи $R = R_K$ для 2-го и 3-го режимов связано с принятой схемой растяжки пучка, о чем будет сказано ниже.

СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА И СИ-ЭЛЕКТРОД

Расчет параметров системы растяжки должен быть согласован с условиями регенеративного вывода частиц из камеры ускорителя [8,7]. На рис. 5 представлена схема взаимного расположения обеих систем. В точке минимума равновесной орбиты условно показаны радиальные и азимутальные размеры пучка для различных режимов ускорения в начальный момент снятия напряжения $V_{мД}$ дуанта. В процессе регенеративной раскочки радиальная неустойчивость наступает в первую очередь для частиц, имеющих максимальную амплитуду начальных свободных колебаний $A_{r0 \max}$. При этом они достигают энергии W_{\max} , равновесная орбита которой изображена на рис. 5. Поэтому до начала растяжки энергия частиц, находящихся в максимуме фазовых колебаний по энергии, не должна превышать W_{\max} во избежание появления импульса малой длительности на входе выводного канала. По результатам расчета регенеративного вывода пучка была получена зависимость вы-

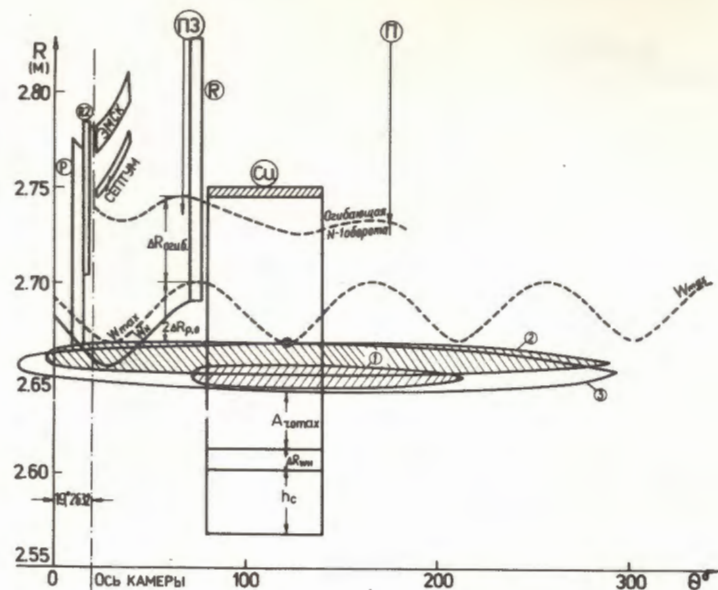


Рис. 5. Схема систем растяжки и вывода пучка. П1, П2 - пробники, 1 - $A_{\text{бД}}=100$ МэВ·нс, 2 - $A_{\text{бД}}=300$ МэВ·нс, $f_{\text{Д}} \rightarrow 0$, 3 - $A_{\text{бД}}=470$ МэВ нс, $f_{\text{Д}} \rightarrow 0$, P, R, R2 - возбуждатель, регенератор, второй регенератор, ЭМСК - электромагнитная секция канала.

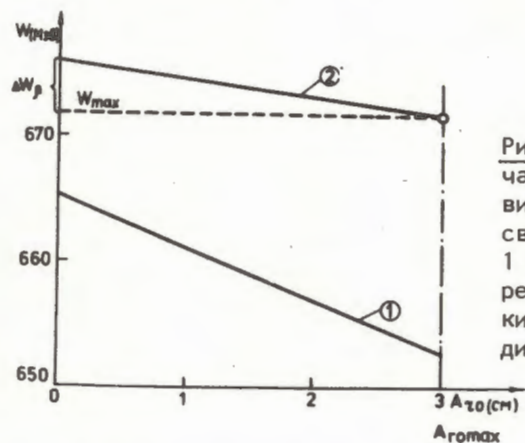


Рис. 6. Распределение частиц по энергии в зависимости от амплитуды свободных колебаний: 1 - к моменту начала регенеративной раскачки, 2 - в точке радиальной неустойчивости.

водной энергии частиц от исходной радиальной амплитуды $A_{\text{го}}$ /рис. 6/, откуда следует, что $W_{\text{max}} = 671,8$ МэВ. Таким образом, все частицы в диапазоне начальных амплитуд $A_{\text{го}}=0-A_{\text{гомах}}$ и в максимуме фазовых колебаний по энергии попадут в вывод-

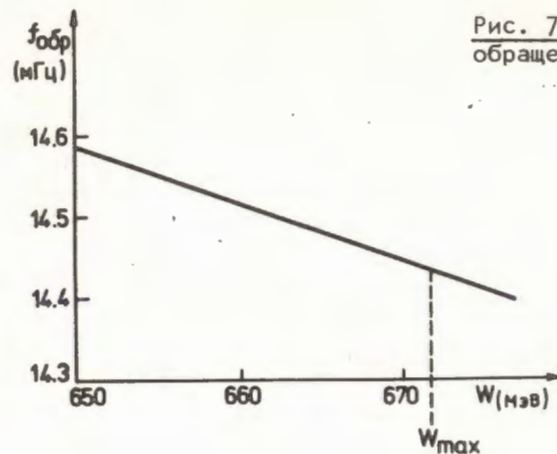


Рис. 7. Зависимость частоты обращения от энергии частиц.

ной канал с разбросом по энергии $\Delta W_{\beta} = 4,2$ МэВ. Это соответствует согласно рис. 7 диапазону частот Си-электрода $\Delta f_{\beta} = 30$ кГц. Кривая зависимости частоты обращения $f_{\text{об}}$ от энергии частиц, приведенная на рис. 7, получена путем численного интегрирования уравнений движения частиц в магнитном поле модели магнитной системы установки "Ф".

Суммарный частотный диапазон Си-электрода зависит от режима ускорения и растяжки и определяется по формуле

$$\Delta f_{\text{с}} = \Delta f_{\beta} + \Delta f_{\phi}, \quad /6/$$

где Δf_{ϕ} - зависит от полуразмера $W_{\text{мфс}}$ -нестационарной сепаратрисы Си-электрода в начальный момент доускорения.

Переход от энергии к частоте производится в соответствии с рис. 7.

Радиальный размер Си-электрода находится согласно рис. 5 по формуле

$$\Delta R_{\text{с}} = \Delta R_{\text{огт.б}} + 2\Delta R_{\text{р.о}} + 2\Delta R_{\text{мфс}} + A_{\text{гомах}} + \Delta R_{W_{\text{H}}} + h_{\text{с}}, \quad /7/$$

где $2\Delta R_{\text{мфс}}$ - радиальный размер нестационарной сепаратрисы Си-электрода, величина которого зависит от режима растяжки, $\Delta R_{W_{\text{H}}}$ - радиальный диапазон настройки линий нулевого поля возбуждателя и регенератора на соответствующую равновесную орбиту в диапазоне энергий $W_{\text{H}} = 666,8 \text{ МэВ} \pm 5 \text{ МэВ}$, $\Delta R_{W_{\text{H}}} = 1,1$ см, $2h_{\text{с}}$ - апертура Си-электрода по оси Z. Остальные обозначения ясны из рис. 5.

Радиальное положение задней стенки Си-электрода определялось огибающей пучка за один оборот до попадания в канал, $R_{СК} = 2,745$ м. Азимутальное положение системы растяжки зависело от наличия свободного пространства в камере ускорителя, причем азимутальный размер системы был выбран $\Delta\theta_c = 60^\circ$ исходя из требований в.ч. питания Си-электрода.

Вертикальная апертура Си-электрода вычислялась по формуле

$$2h_c = 2|\Delta Z_{mB}| + 2|\bar{Z}_{Br}|, \quad /8/$$

где $2|\Delta Z_{mB}|$ - максимальный размер пучка по оси Z в точке радиальной неустойчивости / ≈ 3 см/, $|\bar{Z}_{Br}|$ - искажение медианной плоскости ускорителя за счет радиальной компоненты магнитного поля. Возмущение медианной плоскости определялось по формуле

$$\bar{Z}_{Br} = \frac{RB_r}{B \cdot Q_z^2} + \frac{RB_{rH}}{B \cdot Q_z^2(N^2 - 1 - n)}, \quad /9/$$

где: B_r - азимутально-средняя составляющая радиальной компоненты поля / ≈ 5 Гс, фактически эта величина по условиям системы вывода должна быть много меньше/, $B_{rH} - N$ - гармоника этой компоненты / $N = 4$, $B_{rH} \approx 10$ Гс/, Q_z - частота аксиальных свободных колебаний ($\approx 0,23$). В области расположения Си-электрода / $R \approx 2,65$ м/ имеем $n \approx 0,15$; $B = 1,62$ Т /рис. 8/. В конечном итоге получим $2h_c \approx 6,6$ см.

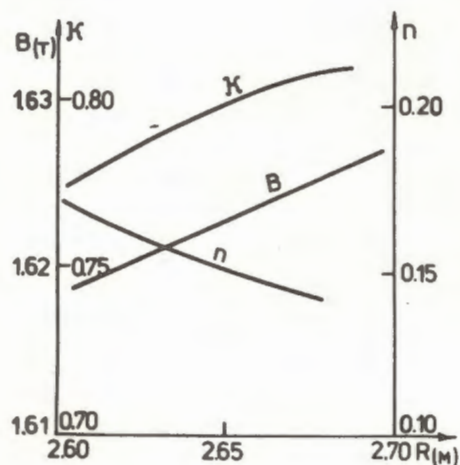


Рис. 8. Магнитное поле в зоне вывода пучка.

РЕЖИМЫ РАСТЯЖКИ ПУЧКА

В соответствии с тремя режимами ускорения пучка были рассмотрены три режима его растяжки при использовании методики расчета, изложенной в /3/. В качестве основной задачи рассматривалось наличие полного перезахвата пучка Си-электродом при минимально возможном в.ч. напряжении V_{mc} и минимальном изменении условий ускорения пучка в дуанте.

Для случая $A_{bD} = 100$ МэВ·нс был выбран режим перезахвата из предварительно остановленного пучка /ППОП/. В соответствии с рис. 9 определялся необходимый максимальный набор энергии за оборот в системе растяжки. Возрастание к моменту перезахвата фазовой площади, занятой пучком, до значения $A_H \approx 350$ МэВ·нс связано с распределением частиц по всем фазам в диапазоне $(0 \div 2\pi)$ при отсутствии напряжения на дуанте, а также с увеличением энергетического размера пучка ΔW_H при конечном времени снятия напряжения дуанта $2\tau \geq 30$ мкс. На рис. 10 представлены зависимости эффективности перезахвата ϵ , сдвига пучка по энергии ΔW_{CD} за время $2\Delta\tau$ и величины ΔW_H от времени снятия V_{mD} при $\Delta W_{mc} = 13,4$ кэВ. В начальный момент снятия напряжения дуанта равновесная энергия пучка равна $(W_{max} - \Delta W_{CD})$. Поэтому на рис. 5 для 1-го режима растяжки пучок расположен ниже орбиты с энергией W_{max} . Основные параметры этого режима представлены в табл. 2 и 3. Частотная программа Си-электрода считалась линейной по времени. Предполагалось, что длительность растянутого импульса составит 95% периода модуляции частоты. Наклон частотной программы находился исходя из частотного диапазона Си-электрода.

При $A_{bD} = 300$ МэВ·нс, $W_{m\phi D} = 3,9$ МэВ применение режима растяжки ППОП привело бы согласно рис. 9 к необходимости иметь на Си-электроде $\Delta W_{mc} > 30$ кэВ, т.к. в этом случае

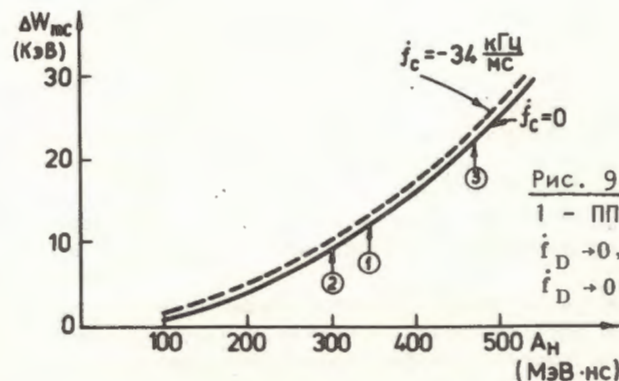


Рис. 9. Режимы растяжки:
1 - ППОП, 2 - ПСДП,
 $f_D \rightarrow 0$, 3 - ПСДП,
 $f_D \rightarrow 0$, f_D опт.

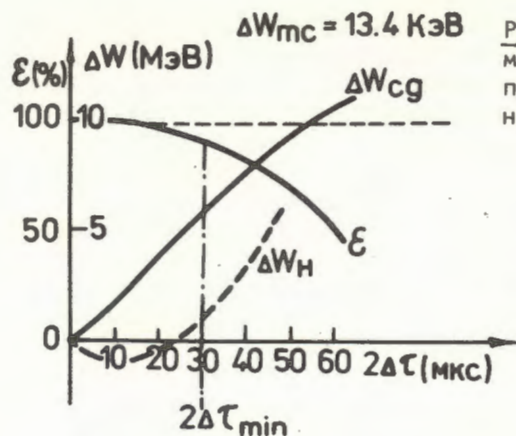


Рис. 10. Зависимость параметров остановленного пучка от времени снятия напряжения дуанта.

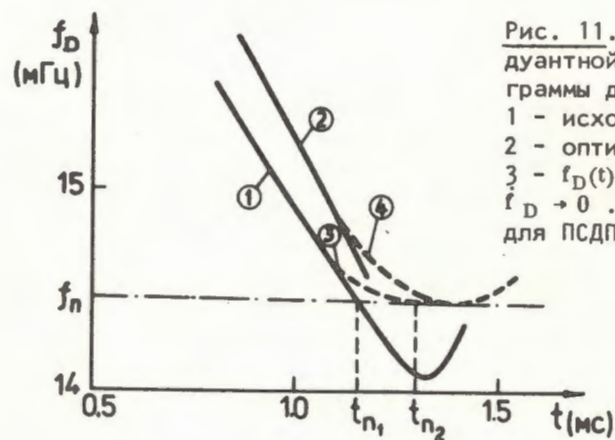


Рис. 11. Изменение дуантной частотной программы для режима ПСДП. 1 - исходная $f_{D \text{ эксп.}}(t)$, 2 - оптимальная $f_{D \text{ опт.}}(t)$, 3 - $f_D(t)$ для ПСДП при $f_D \rightarrow 0$. 4 - $f_D(t)$ для ПСДП и $f_{D \text{ опт.}}(t)$.

фазовая площадь остановленного пучка составит $A_H = 540$ МэВ·нс. С другой стороны, для режима перезахвата из сепаратрисы дуантной программы /ПСДП/ согласно [3] имеет место $\epsilon \approx 80\%$ ввиду различных форм сепаратрис дуанта и Си-электрода. Для устранения этого недостатка было предложено работать в режиме ПСДП при $f_D \rightarrow 0$. Для этих целей нужна модификация частотной программы дуанта подобно тому, как это показано на рис. 11. Изменение частотной программы дуанта сопровождается соответствующим изменением напряжения на дуанте в соответствии с рис. 12.

Из этого рисунка также видна степень согласования форм сепаратрис дуанта и Си-электрода. Переход из одной ускоряющей системы в другую происходит без изменения равновесной

Таблица 2
Момент снятия V_{mD}

Параметр	Режимы растяжки	ППОП	ПСДП, $f_D \rightarrow 0$	ПСДП, $f_{D \text{ опт.}}$
Площадь сепаратрисы, A_{bD} /МэВ·нс/		100	302	473
Напряжение на дуанте, V_{mD} /кВ/		19	7,5	14,7
Размер сепаратрисы $2 \times W_{m\phi D}$ /МэВ/		2x2,7	2x3,9	2x5,8
$\cos \phi_{SD}$		0,70	0,10	0,05
W_S /МэВ/		661,5	668,2	666,4
f_{SD} /МГц/		14,507	14,459	14,469
f'_{SD} /МГц/мс/		-2,77	-0,15	-0,15

Таблица 3
Начало ускорения Си-электродом

Параметр	Режимы растяжки	ППОП	ПСДП, $f_D \rightarrow 0$	ПСДП, $f_{D \text{ опт.}}$
Площадь сепаратрисы, A_{bC} /МэВ·нс/		370	305	467
Максимальный набор энергии за оборот, ΔW_{mc} /кэВ/		15,6	11	24
Размер сепаратрисы, $2 \times W_{m\phi C}$ /МэВ/		2x4,4	2x3,6	2x5,4
$\cos \phi_{SC}$		0,02	0,03	0,01
W_S /МэВ/		667,5	668,2	666,4
f_{SC} /МГц/		14,467	14,459	14,469
f'_{SC} /МГц/мс/		-0,034	-0,032	-0,039
Радиальный размер сепаратрисы, $2\Delta R_{m\phi C}$ /см/		2x0,96	2x0,80	2x1,20

энергии пучка, что и отмечено на рис. 5 его соответствующим положением. Модификация предложенного варианта режима ПСДП в сравнении с описанным ранее ^{13/} заключается в иной зависимости V_{mc} от времени /рис. 12/. Кроме того, в течение перезахвата пучка $2\Delta t$ частота Си-электрода постоянна, т.е. $\dot{f}_c = 0$. Параметры данного режима растяжки приведены в табл. 2 и 3, во второй колонке.

Для $A_{bD} = 470$ МэВ·нс предлагается использовать тот же вариант ПСДП /за исключением того, что основная ускоряющая система имеет оптимальную частотную программу $f_{D\text{опт}}(t)$ /. Параметры этого режима также приведены в табл. 2 и 3, модификация частоты f_D - на рис. 11. Необходимое изменение V_{mD} показано на рис. 4.

ВЫВОДЫ

По результатам расчета различных режимов растяжки пучка были определены технические параметры Си-электрода, которые представлены в табл. 4. Путем численного моделирования процесса перехода пучка из дуанта в Си-электрод было показано, что при указанных параметрах имеет место 100%-ная эффективность этого процесса во всех режимах растяжки.

Авторы благодарят Л.М.Онищенко, А.А.Глазова, П.Т.Шишлянникова, Е.Н.Заплатина за обсуждение отдельных вопросов.

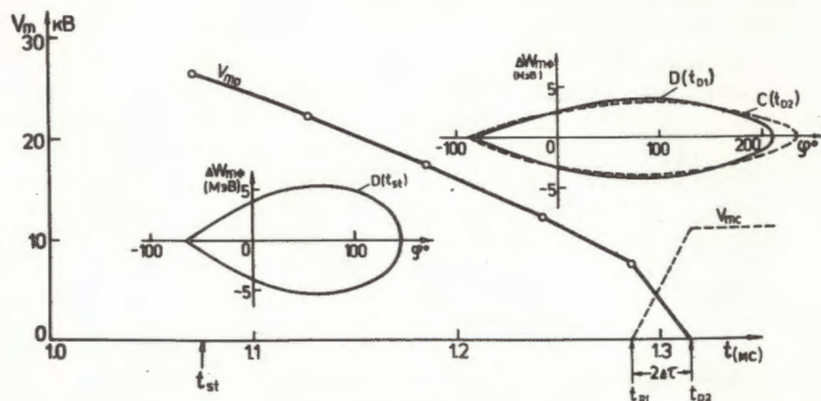


Рис. 12. Режим растяжки ПСДП при $f_D \rightarrow 0$.

Таблица 4
Параметры Си-электрода

Параметр	Значение параметра
Полоса частот, Δf_c	60-70 кГц
Радиальный размер, ΔR_c	17,6 см
Азимутальный размер, $\Delta \theta_c$	60°
Вертикальная апертура, $2h_c$	6,6 см
Максимальное напряжение, V_{mc}	11±24 кВ
Радиальное положение	2,569-2,745 м
Частота перезахвата, f_n	14,467 МГц -40 кГц +120 кГц
Стабильность частоты перезахвата от цикла к циклу	1.10 ⁻⁴

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А.А. и др. АЭ, 1969, т.21, вып. 1, с.16-22.
2. Глазов А.А., Онищенко Л.М. ОИЯИ, Б-9-7286, Дубна, 1973.
3. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-12577, Дубна, 1979.
4. Vogt-Nilsen N. MSC New Projects Group Programmes, CERN, 1968.
5. Алексеев В.А. и др. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, т.1, с.340, Дубна, 1979.
6. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Р9-7954, Дубна, 1974.
7. Заплатин Н.Л. и др. ОИЯИ, Р9-9023, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 октября 1979 года.