

С345e

С-217

Б1-9-10978.

4786/77

Сафронов А.Н.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-10978

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1977

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Сафонов А.Н.

Б1-9-10978

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОГО РОСТА  $\cos\varphi_s$  И ОЦЕНКА ФАЗОВЫХ ПОТЕРЬ

В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ

РУКОВОДСТВО ПО РАБОТЕ  
В ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
...29... IX 1977

Дубна, 1977

## АННОТАЦИЯ

В работе приводится метод расчета допустимого роста косинуса равновесной фазы, не приводящего к фазовым потерям из-за сужения области устойчивости. Сравнивая фактический  $\cos \varphi_s$  с допустимым из условия затухания фазовых колебаний ( $\cos \varphi_{s \text{ доп}}$ ), можно определить существуют ли фазовые потери в процессе ускорения и оценить их величину. Для расчета  $\cos \varphi_s$ ,  $\cos \varphi_{s \text{ доп}}$  и других параметров синхроциклотрона ОИЯИ составлена программа на ФОРТРАНЕ.

Еще в работе Б.И.Замолодчикова и др.<sup>/1/</sup>, а также в работе<sup>/2/</sup> на основе анализа фазовых колебаний в синхроциклотроне<sup>3/</sup> сделан вывод о том, что косинус равновесной фазы ( $\cos \varphi_s$ ) в процессе ускорения ионов может несколько возрасть без фазовых потерь (т.е. потерь частиц из-за сужения области фазовой устойчивости). Этот факт объясняется тем, что с увеличением энергии ионов плотность частиц в фазовом пространстве ( $\varphi, \dot{\varphi}$ ) увеличивается. Допустимый рост  $\cos \varphi_s$  можно рассчитать из условия постоянства интеграла действия

$$J = \oint I \dot{\varphi} d\varphi = \text{const} \quad (1)$$

причем  $I = \frac{E}{\omega^2 K}$ , где  $E$  - полная энергия,  $\omega$  - круговая частота обращения,  $K = 1 - \frac{n}{1+n} \cdot \frac{1}{\beta^2}$  - коэффициент автофазировки,  $n = \frac{z}{H} \cdot \frac{dH}{dz}$  - показатель неоднородности магнитного поля,  $\beta = \frac{v}{c}$  - относительная скорость,  $H_u \frac{dH}{dz}$  - напряженность и градиент магнитного поля,  $z$  - радиус орбиты для равновесного иона.

Преобразуя уравнение (1), чтобы учесть максимально-возможный набор энергии ионом за оборот  $eV_{max}$ , входящий в  $\dot{\varphi}$ , получим

$$J = \oint \sqrt{\frac{eV_{max} \cdot E}{\omega^2 K}} \cdot F(\varphi, \varphi_s) d\varphi = \text{const}, \quad (2)$$

где  $F(\varphi, \varphi_s)$  - некоторая функция, определяемая только фазовым движением:  $F(\varphi, \varphi_s) = C + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi_s$ , а  $C$  - константа для движения по сепаратрисе равная  $\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s$ <sup>/4/</sup>. При адиабатических (т.е. медленных по сравнению с периодом фазовых колебаний) изменениях параметров ускорителя их можно вынести

из-под знака интеграла:

$$J = \sqrt{\frac{eV_{max}E}{\omega^2 K}} \oint F(\varphi, \varphi_s)^{1/2} d\varphi = const. \quad (3)$$

После численного интегрирования для границы области фазовой устойчивости, поделив на интеграл для  $\varphi_s = \frac{\pi}{2}$  (что соответствует максимальной величине области фазовой устойчивости), получим изображенный на рис. 1 график зависимости нормированной площади устойчивых фазовых колебаний от  $\cos \varphi_s$  /5/:

$$a(\cos \varphi_s) = \frac{\oint F(\varphi, \varphi_s)^{1/2} d\varphi}{\oint F(\varphi, \frac{\pi}{2})^{1/2} d\varphi}. \quad (4)$$

В крупных синхроциклотронах с открытым типом ионного источника  $eV_{max}$  зависит не только от амплитудно-частотной характеристики  $U_g = U_g(f)$  ( $f$  - частота ускоряющего напряжения), но и от величины  $\beta(z)$  - относительного набора энергии за оборот, который определяется геометрией центральной области и является растущей функцией радиуса, стремящейся к единице /1,2/. Таким образом

$$eV_{max} = 2eU_g(f) \cdot \beta(z) \quad (5)$$

На рис. 2 показана зависимость максимально-возможного относительного набора энергии за оборот от радиуса орбиты для синхроциклотрона ОИЯИ, полученная из измерений квазипотенциального ускоряющего поля дуанта на электролитической ванне /6/. Из рисунка видно, что адиабатическим изменением  $\beta(z)$  можно считать с  $z \approx 20$  см\*<sup>ж</sup>). Это примерно соответствует максимальному радиусу сгустка в конце времени захвата /7/.

Следует заметить, что выражение (5) справедливо только для  $180^\circ$  дуанта без срезов. При наличии одного или нескольких срезов максимальный набор энергии за оборот запишется в виде /5/:

$$eV_{max} = 2eU_g(f) \cdot \beta(z) \cdot d(z), \quad (6)$$

\*<sup>ж</sup>) Этот вопрос уточнен в частной беседе с Р. Джаннини (ЦЕРН) во время его визита в ОИЯИ в октябре 1973 г.

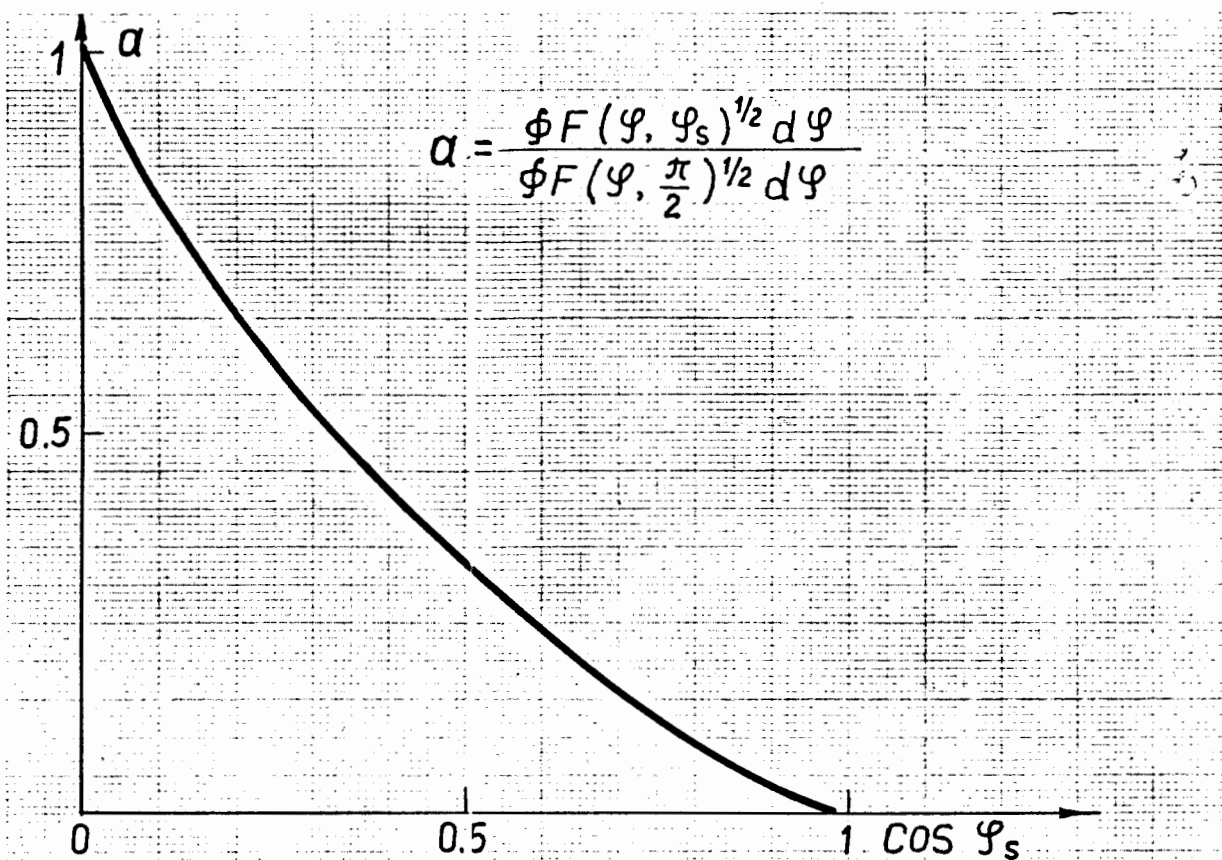


Рис. 1. Зависимость нормированной площади области устойчивых фазовых колебаний от  $\cos \varphi_s$ .

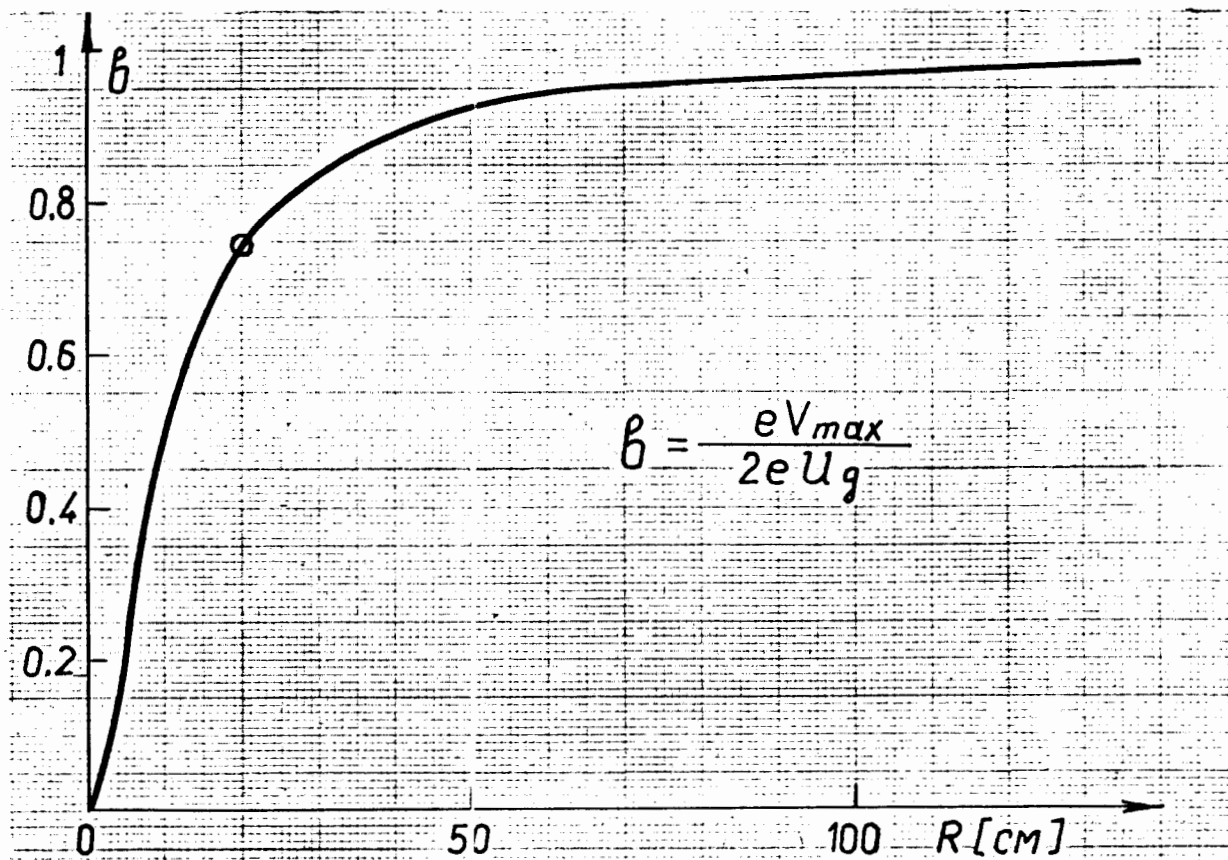


Рис. 2. Зависимость относительного набора энергии за оборот от радиуса орбиты для с/ц ОИЯИ.

причем

$$d(z) = \cos \beta_i \sqrt{1 - \left(\frac{z_{si}}{z}\right)^2 \sin^2 \beta_i} + \frac{z_{si}}{z} \sin^2 \beta_i, \quad (7)$$

где  $z$  - радиус орбиты,  $\beta_i$  - угол среза дуанта на этом радиусе,  $z_{si}$  - радиус, где продолжение  $i$ -ого среза кромки дуанта под углом  $\beta_i$  пересекает продолжение центральной, не срезанной кромки дуанта.

В синхротронной ОИЯИ есть по одному  $15^\circ$  срезу с обеих сторон дуанта, которые начинаются с  $z = 100$  см. В дальнейших выкладках величина  $d$  не учитывалась, т.е.  $d = 1$ .

Комбинируя уравнения (3), (4) и (5) и учитывая, что  $\omega = \frac{e c H}{E}$  получим следующее выражение для определения допустимого роста  $\cos \varphi_s$  в течение ускорения:

$$\alpha(\cos \varphi_s) = \alpha_1(\cos \varphi_{s1}) \cdot \frac{E_1}{E} \cdot \frac{H}{H_1} \cdot \sqrt{\frac{U_{g1}}{U_g} \cdot \frac{B_1}{B} \cdot \frac{E_1}{E} \cdot \frac{K}{K_1}}, \quad (8)$$

где параметры с индексом 1 соответствуют радиусу  $z = 20$  см.

Значение  $\cos \varphi_s$  можно выразить в виде:

$$\cos \varphi_s = - \frac{E}{2e U_g B K f^2} \cdot \frac{df}{dt}, \quad (9)$$

где  $\frac{df}{dt}$  - производная от частотной программы ускоряющего напряжения. Методика расчета допустимого значения косинуса равновесной фазы  $\cos \varphi_{s_{гон}}$  следующая:

- 1) вычисляется  $\cos \varphi_{s1}$  для  $z = 20$  см;
- 2) по графику на рис. 1 для этого  $\cos \varphi_{s1}$  находится  $\alpha_1$ , которое потом не меняется (на  $z = 20$  см  $\cos \varphi_{s_{гон}} = \cos \varphi_{s1}$ );
- 3) далее с шагом в 5-10 см по  $z$  вычисляются параметры  $E$ ,  $H$ ,  $K$ , из графика на рис. 2 берутся величины  $B$ , а из амплитудной характеристики величины  $U_g$  (и рассчитывается, если нужно, величина  $d$ );

4) с тем же шагом по  $\zeta$  вычисляется правая часть уравнения (8);

5) по графику на рис. I, откладывая полученные значения  $\alpha(\cos \varphi_s)$  по оси ординат, находим на оси абсцисс соответствующие значения  $\cos \varphi_{sgon}$ ;

6) с тем же шагом по  $\zeta$  по формуле (9) вычисляются значения  $\cos \varphi_s$ .

Сравнивая полученные значения  $\cos \varphi_s$  и  $\cos \varphi_{sgon}$  на одних и тех же радиусах, делаем заключение о наличии или отсутствии фазовых потерь на этих радиусах. Ускорение происходит без фазовых потерь, если  $\cos \varphi_s < \cos \varphi_{sgon}$ . Если  $\cos \varphi_s > \cos \varphi_{sgon}$ , то возможны фазовые потери, которые тем больше, чем больше превышение  $\cos \varphi_s$  над  $\cos \varphi_{sgon}$ . Вышеописанная методика оценки фазовых потерь получила экспериментальное подтверждение в работе Енчевича И.Б. и Томилиной Т.Н. /8/.

Для вычисления в зависимости от  $\zeta$  параметров  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $K$ ,  $E$ ,  $f$ ,  $\cos \varphi_s$  и  $\cos \varphi_{sgon}$  составлена программа *SCJINR (FAZOTRON)* на ФОРТРАНе. Расчет можно проводить на ЭВМ БЭСМ-6, СДС-6500 или ЕС-1040 (см. листинг программы *SCJINR* для БЭСМ-6). Для расчета в память ЭВМ вводятся в 40 точках по  $\zeta$  величины  $H$ ,  $\frac{dH}{dz}$ ,  $V$ ,  $U_g$ ,  $\frac{df}{dt}$  и в 100 точках - абсциссы графика рис. I -  $\cos \varphi_{sgon}$  с шагом в 0,01 по оси ординат, т.е. по  $\alpha(\cos \varphi_s)$ . Далее последовательность расчетов такая же, как описано выше.

За помощь при составлении программы *SCJINR* автор благодарит Полферова Э.А.

*В.А. Полферов*



Литература

1. Б.И.Замолодчиков, Д.Л.Новиков, Э.А.Полферов. Об оптимальных условиях захвата в шестиметровом синхроциклотроне. Препринт ОИЯИ Р-720, Дубна, 1967.
2. В.И.Данилов, И.Б.Енчевич, Б.И.Замолодчиков, Б.Н.Марченко, Д.Л.Новиков, Э.А.Полферов, Е.И.Розанов, А.Л.Савенков и А.Н.Сафонов. Повышение интенсивности пучка протонов в шестиметровом фазотроне ОИЯИ. Атомная энергия, т.16 (1964) 9.
3. *L.R.Henrich, D.C.Sewell and J.Vale. Rev.Sci.Inst. 20 (1949) 887.*  
Работа 184-дюймового фазотрона. Перевод в сборнике ПСФ, II (1952)7.
4. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей. Ф.-М., Москва (1962)157.
5. *MSC Staff. Proposal for the Improvement of the 600 MeV Synchrocyclotron. CERN, MSC Internal Report 67-5, Aug.1, 1967*  
(Частное сообщение, есть перевод в отделе синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ, стр.42 и III4).
6. И.Б.Енчевич, Г.Й.Пенчев, А.Н.Сафонов. Расчет ускоряющего электрического поля синхроциклотрона. Препринт ОИЯИ 1854, Дубна, 1964. Опубликовано в журнале "Известия на физический институт с АНББ" (Болгария), т.ХIII, кн.1 (1965)III.
7. В.И.Данилов, П.А.Полубоярова, А.Н.Сафонов, Б.В.Феоктистов. Зависимость формы пучка в центральной области синхроциклотрона от ускоряющего напряжения и спада магнитного поля. Сообщение ОИЯИ Р9-5945, Дубна, 1971.
8. И.Б.Енчевич, Т.Н.Томлина. Уменьшение фазовых потерь в синхроциклотроне на 680 МэВ при помощи коррекции амплитуды ускоряющего напряжения. Препринт ОИЯИ Р9-3805, Дубна, 1968.

