

СЗУСе2

Д - 183

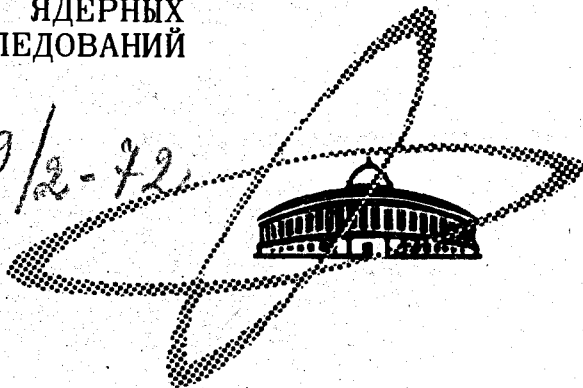
СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1379/2-72

24/4-72

P9 - 6272



В.И. Данилов, П.А. Полубоярова, А.Н. Сафонов,
Б.В. Феоктистов

ОТНОСИТЕЛЬНО ЗАХВАТА
ИЗ КОЛЬЦЕВОГО ПУЧКА $R \approx 30$ СМ
И УСКОРЕНИЯ ДО КОНЕЧНОГО РАДИУСА
ПРЕДЕЛЬНОГО ТОКА В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ
ОИЯИ

1972

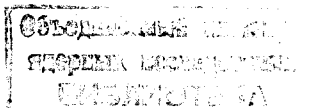
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И АВТОМАТИЗАЦИИ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P9 - 6272

В.И. Данилов, П.А. Полубоярова, А.Н. Сафонов,
Б.В. Феоктистов

ОТНОСИТЕЛЬНО ЗАХВАТА
ИЗ КОЛЬЦЕВОГО ПУЧКА $R \approx 30$ CM
И УСКОРЕНИЯ ДО КОНЕЧНОГО РАДИУСА
ПРЕДЕЛЬНОГО ТОКА В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ
ОИЯИ



На радиусах, больших 30 см, в синхроциклотроне ОИЯИ магнитными фокусирующими силами могут быть удержаны заряды, при частоте модуляции $f_m \approx 100$ гц соответствующие токам десять - двадцать микроампер /1/. Поэтому представляет интерес рассмотреть механизм захвата частиц в ускорение из пучка, вращающегося на $r = 30$ см, т.е. из кольцевого источника, равномерно заполненного частицами, так как это может послужить способом увеличения интенсивности в синхроциклотроне, если окажется возможным создать на начальном этапе ускорения (или инжектировать) достаточно интенсивный кольцевой пучок с энергией частиц около 15 Мэв ^{x/}.

Для выяснения механизма захвата из кольцевого сгустка проведем расчет радиально-фазового движения со следующими начальными условиями: $r_{нач} = 30$ см; $\dot{r}_{нач} = 0$; $\dot{\phi}_{нач} = 0,438 \cdot 10^{-2}$ рад/см (дифференцирование по ct); диапазон изменения $\phi_{нач}$ от $-\pi/2$ до $3\pi/2$; $\dot{\phi}_{нач}$ взято как конечное значение при $r = 30$ см для одной из частиц, начинающей ускорение с $r_{нач} = 1$ см. Начальный момент времени $\omega_0 t_{нач}$ связан с начальным относительным отклонением частоты обращения от частоты генератора $\Delta_{нач} = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0}$ следующим соотношением /2/:

^{x/} Вопросы, связанные с созданием кольцевого сгустка частиц, не рассматриваются в данной работе и будут проанализированы в последующем.

$$\omega_0 t_{\text{нач}} = - \frac{\Delta_{\text{нач}}}{2\gamma},$$

где

$$\gamma = - \frac{1}{2} \frac{1}{\omega_0^2} \frac{d\omega}{dt}.$$

Расчет радиально-фазового движения частиц при захвате из такого кольцевого источника проведен для $\gamma = 0,5 \cdot 10^{-6}$ и параметров магнитного и электрического полей, близких к рабочим параметрам для синхротрона ОИЯИ.

На рис. 1 показаны радиальные и фазовые траектории, получающиеся при захвате из кольцевого сгустка частиц с максимальным радиусом 30 см. Траектории построены для значений фаз вблизи границ фазового диапазона в течение времени захвата. Радиальный размер пучка обусловлен бета-тронными колебаниями вследствие отличия синхронного радиуса от $r_{\text{нач}} = 30$ см и радиально-фазовыми колебаниями вследствие отличия частоты обращения от синхронной. На рис. 1 построены максимальные и минимальные значения радиуса на одном обороте частицы в зависимости от времени для нескольких частиц, начинающих движение в течение времени захвата. Время захвата в этом случае составляет 60 мксек, что примерно в два раза больше времени захвата из центра, так как отсутствуют потери частиц из-за возвращения к центру и рассеяния на атомах остаточного газа. В начале времени захвата частицы замедляются, но остаются внутри области фазовой устойчивости. Частицы, начинающие движение примерно в середине времени захвата и в середине фазового диапазона, имеют небольшую амплитуду фазовых колебаний, так как ускоряются вблизи равновесной фазы.

Если построить достаточно большое число фазовых траекторий с одинаковым интервалом по начальным фазам и по времени в течение времени захвата, то из полученного рисунка можно оценить примерный закон распределения плотности частиц в пучке по азимуту. Обработка результатов расчета показывает, что плотность частиц максимальна вблизи равновесной фазы и уменьшается к концам сгустка. Изменение фазового диапазона в течение времени захвата показано на рис. 2. Захват начинается

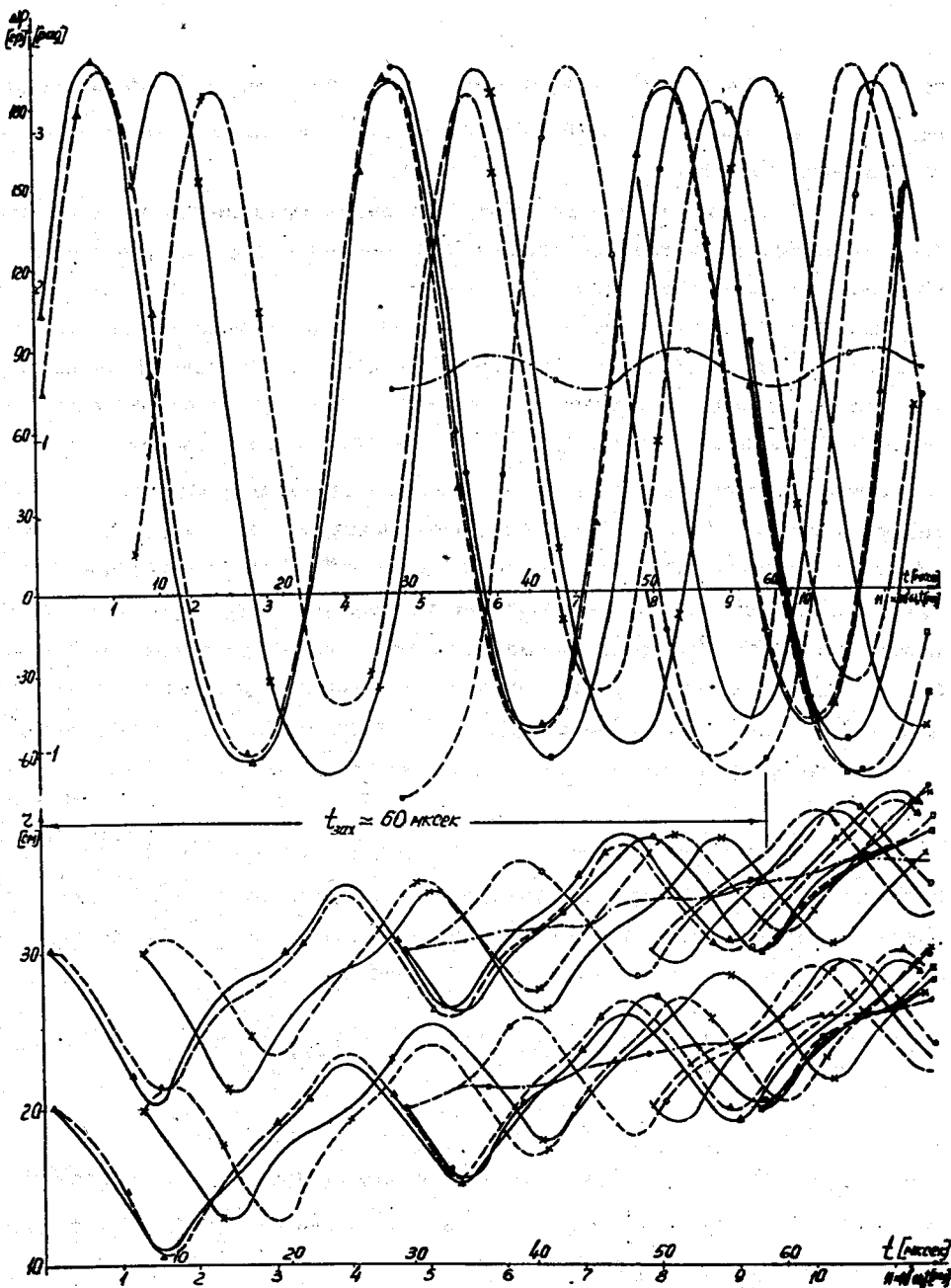


Рис. 1. Процесс формирования пучка при захвате частиц из кольцевого сгустка с $r_{max} = 30$ см для $U_{yc} = 18$ кв, $\gamma = 0,5 \cdot 10^{-8}$.

$t_{зах} \approx 60$ мксек.

при $\Delta \phi_{\text{нач}}$ вблизи 90° , к середине времени захвата фазовый диапазон расширяется примерно до 290° (от -85 до 205°) и затем к концу захвата сужается до нуля.

Представляет интерес рассмотреть, какие предельные токи могут быть ускорены в синхроциклотроне ОИЯИ до конечного радиуса при существующем магнитном поле.

Оценим предельную объемную плотность и предельное число частиц в сгустке на радиусах, где имеется уменьшение магнитных фокусирующих сил или уменьшение объема пучка вследствие затухания фазовых колебаний, а также на радиусе $r_{\text{ср}} = 35$ см. На рис. 3 приведена зависимость от радиуса магнитного поля B и показателя неоднородности n для синхроциклотрона ОИЯИ. Наиболее узкими местами (кроме района вблизи $r = 30$ см) являются $r_{\text{ср}} = 75$ и 89 см, где есть уменьшение n до $0,01$, а объем пучка еще недостаточно большой, и $r_{\text{ср}} = 205$ см, где n падает до $0,006$. При этом предполагается, что на радиусах до 60 см магнитная фокусировка может быть увеличена для удержания величин зарядов, приведенных в работе Данилова В.И. и др. ^{/1/}, путем установки в центр стальных цилиндров, кольцевых шимм или катушек с током ^{/2/}.

При оценке дефокусирующих сил пучка воспользуемся формулой для бесконечно длинного параллелепипеда ^{/3/}, так как на интересующих нас радиусах пучок можно считать бесконечным по длине (по азимуту) и пренебречь его кривизной. Расчетная формула имеет вид:

$$E_{z \text{ макс}}^{\text{кул.}} = \frac{\sigma_{vz}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ 4h \operatorname{arctg} \frac{\Delta r}{2h} + \Delta r \ln \left[1 + \left(\frac{2h}{\Delta r} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума, σ_{vz} - объемная плотность пространственного заряда $\left[\frac{\text{кул}}{\text{м}^3} \right]$, h - высота пучка [м], Δr - ширина пучка [м].

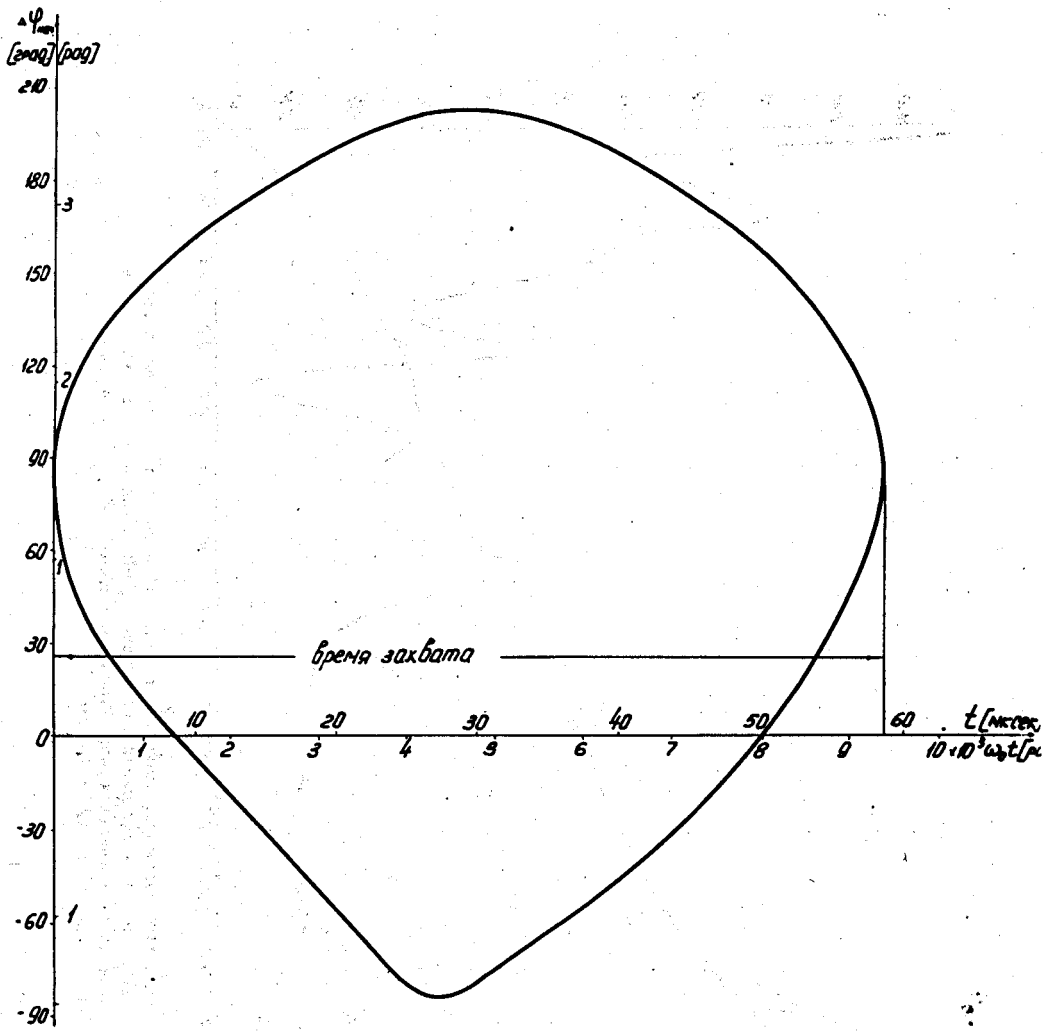


Рис. 2. Изменение фазового диапазона в течение времени захвата из кольцевого сгустка.

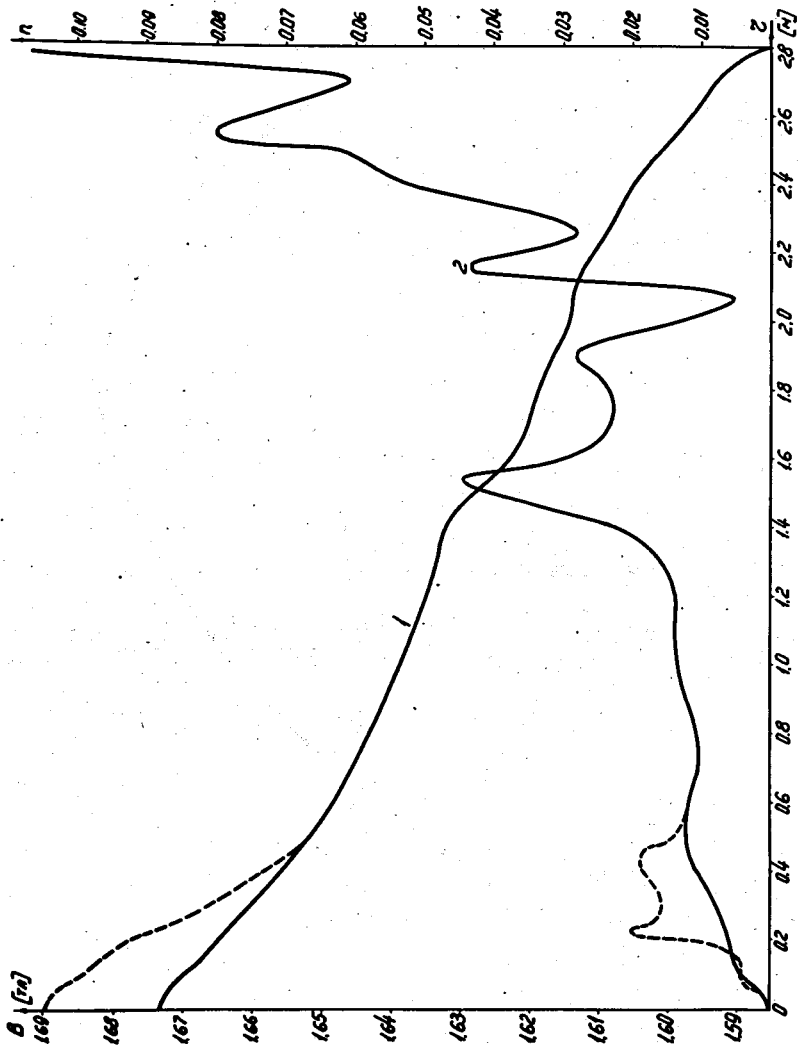


Рис. 3. Зависимость магнитного поля (1) и показателя неоднородности (2) от радиуса для синхроциклотрона ОИЯИ. Пунктирные кривые - при наличии на крышках камеры кольцевых шимм $R_{\text{ср}} = 17,4$ см, $\Delta R = 3,7$ см и $\Delta Z = 1,9$ см.

В формуле (1) $E_{z \max}^{\text{кул}} \left[\frac{B}{M} \right]$ - напряженность электрического поля пространственного заряда в верхней средней точке поперечного сечения пучка. В той же точке для предельной объемной плотности должна равняться нулю сумма дефокусирующей силы пространственного заряда $e E_{z \max}^{\text{кул}}$ и магнитной фокусирующей силы $F_M = e \omega r z \frac{dB}{dr}$, усредненной по радиальной ширине пучка для $z = h/2$.

Отсюда:

$$\sigma_{rz} = - \frac{2\pi\epsilon_0 h \int_{r - \frac{\Delta r}{2}}^{r + \frac{\Delta r}{2}} \omega(r) r \frac{dB}{dr} dr}{\Delta r \left\{ 4h \operatorname{arctg} \frac{\Delta r}{2h} + \Delta r \ln \left[1 + \left(\frac{2h}{\Delta r} \right)^2 \right] \right\}} \quad (2)$$

Расчет проведен для размера пучка по вертикали $h = 4$ см и радиальной ширины Δr , равной ширине пучка на $r_{\min} = 30$ см (из работ Данилова В.И. и др. /4,5/ $\Delta r = 10$ и 13 см), а уменьшение протяженности пучка по азимуту находилось по формуле, учитывающей адиабатическое затухание фазовых колебаний /6/:

$$2\Delta\theta = \operatorname{const} \left(\frac{\omega_s^2 K}{E_s U_{\text{ус}} \sin \phi_s} \right)^{1/4}, \quad (3)$$

где $K = 1 + \frac{n}{1-n} \frac{1}{\beta^2}$, $U_{\text{ус}}$ - ускоряющее напряжение [кв],

ω_s - круговая частота обращения равновесного иона $\left[\frac{\text{рад}}{\text{сек}} \right]$, E_s - полная энергия равновесного иона [Мэв], ϕ_s - равновесная фаза.

Первый вариант рассчитан для параметров магнитного поля, близких к рабочим, а второй вариант - для магнитного поля, приблизительно соответствующего полю синхроциклотрона ОИЯИ с кольцами $R_{\text{ср}} = 17,4$ см, $\Delta R = 3,7$ см и $\Delta z = 1,9$ см, установленными на крышках камеры.

В таблице 1 приведены размеры пучков и результаты расчета по формуле (2) предельных зарядов и токов, которые могут быть удержаны магнитным полем синхроциклотрона ОИЯИ на радиусах 35, 75, 89 и 205 см, где наблюдается уменьшение фокусирующих сил. При существующей форме магнитного поля в пучке высотой 4 см от $r_{min} = 30$ см до конечного радиуса без колец (вар. №1) может устойчиво ускоряться заряд $0,12 \cdot 10^{-6}$ кул/имп (ограничение на $r_{cp} = 30 + 40$ см) /1/ и при наличии колец (вар. №2) - заряд $0,23 \cdot 10^{-6}$ кул/имп (ограничение на $r_{cp} = 35$ и 89 см). При частоте модуляции $f_m = 113$ гц это дает токи 14 и 26 мка, соответственно. Предельный удерживаемый заряд на $r = 200 + 210$ см намного больше заряда, удерживаемого на $r_{cp} = 35, 75$ и 89 см, так как пучок занимает больший объем.

В заключение авторы приносят благодарность Б.И. Замолодчикову за внимание к работе и ценные критические замечания.

Литература

1. В.И. Данилов, И.В. Пузынин, А.Н. Сафонов, Б.В. Феоктистов. Препринт ОИЯИ Р-2912, Дубна 1966.
2. В.И. Данилов, В.Б. Мухина, А.Н. Сафонов. Препринт ОИЯИ Р9-3181, Дубна 1967.
3. В.И. Данилов. Препринт ОИЯИ Р-1984, Дубна 1965.
4. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Э.А. Полферов, Е.И. Розанов, А.Н. Сафонов. Препринт ОИЯИ Р9-3968, Дубна 1968.
5. В.И. Данилов, П.А. Полубоярова, А.Н. Сафонов, Б.В. Феоктистов. Сообщение ОИЯИ Р9-5945, Дубна. 1971.
6. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей, Ф.М., Москва, 1962, стр. 159.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 февраля 1972 года.

Таблица I

$N N$ вар.	z_{cp} [м]	Δz [м]	$2\Delta\theta$ [град]	h [м]	V [м ³]	$\bar{v}_{вз} \cdot 10^6$ [$\frac{куА}{м^3}$]	$Q \cdot 10^6$ [$\frac{куА}{имп}$]	i при $f_m = 11304$ [мкс]	i при $f_m = 17004$ [мкс]
I	0,365	0,13	2,5	0,04	0,00476	25,8	0,123	14	21
	0,75	0,13	2,29	0,04	0,00894	26,7	0,239	27	41
	2,042	0,13	1,8	0,04	0,0191	22,7	0,433	49	74
2	0,35	0,10	2,7	0,04	0,00378	61,7	0,233	26	40
	0,89	0,10	2,4	0,04	0,00855	27,4	0,234	26	40
	2,051	0,10	1,93	0,04	0,0158	19,6	0,31	35	53