

Безногих Ю.Д. и др.  
Б2-9-8999

+



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С 345 е

Б-399

2919/75

x

Б2-9-8999

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19

75

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

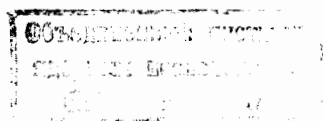
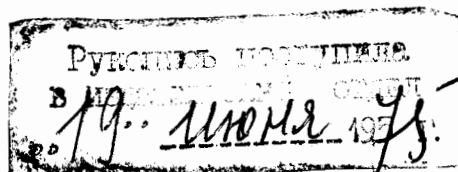
Лаборатория высоких энергий

Ю. Д. Безногих, Г. А. Боков, М. А. Воеводян, В. И. Волков, Е. Д. Донец,  
В. П. Заболотин, Л. П. Зиновьев, А. С. Исаев, И. Б. Иссинский,  
Г. С. Казанский, Н. А. Коруков, Л. Г. Макаров, А. И. Михайлов,  
В. А. Мончинский, С. А. Новиков, В. Н. Перфеев, В. А. Попов,  
И. Н. Семенюшкин, Ю. В. Смирнов, В. Л. Степанюк, С. В. Федуков,  
А. П. Царенков, О. Н. Цисляк, В. И. Черников, К. В. Чехлов, И. Н. Яловой.

Б2-9-8999

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

(I квартал 1975 г.)



Дубна, 1975 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение.....	I
2. Магнитные измерения.....	2
3. Геодезические измерения.....	3
4. РЗМИ-2 и корректирование $\kappa$ .....	5
5. Быстрый вывод ускоренного пучка.....	8.
6. Ускорение в режиме форсировки магнитного поля.....	8
7. Информация и контроль на ускорителе.....	10
8. Ионный источник "Крион" на инжекторе ЛУ-9М.....	II.



## I. ВВЕДЕНИЕ

В I квартале 1975 г. синхрофазотрон отработал на эксперимент 1273 часа. На исследования и совершенствование систем ускорителя было использовано 310 часов. Ускорялись протоны, дейтоны и ядра гелия. Средняя интенсивность составила:

протоны  $J = 2.4 \times 10^{11}$  прот/цикл

дейтроны  $J_d = 0.5 \times 10^{11}$  дейтр/цикл

ядра гелия  $J_{\alpha} = 1,0 \times 10^8$  ядер/цикл (выведенный пучок)

Работы по исследованиям и совершенствованию распределились следующим образом.

На IV квадранте электромагнита (ЭМ) ускорителя проводились магнитные измерения. Исследования связаны с искажением показателя поля  $n$  в этом квадранте, наступающем при увеличении скорости нарастания магнитного поля.

Геодезические измерения ставили своей целью проверку стабильности "куста" опорных глубинных реперов и контроль положения ЭМ ускорителя.

Были продолжены исследования возможностей корректирования с помощью системы РЗМИ-2 по азимуту и радиусу одновременно.

Изготовлен и установлен в камеру синхрофазотрона магнит-дефлектор системы быстрого вывода пучка на препановую пузырьковую камеру. Получены первые результаты измерения параметров системы.

Проведены исследования ускорения частиц в режиме форсировки магнитного поля ускорителя. Цель - уменьшение потерь при ускорении ядер.

Выведена на дисплей графическая информация о состоянии medianной плоскости ускорителя и положении радиальной орбиты ускорен-

мого пучка в дискретном виде.

Введена в работу система дискретной информации о значении магнитного поля ускорителя.

На ионном источнике "Крион" проделан ряд работ для уменьшения времени ионизации. Предполагается достигать полной ионизации ядер азота за время 10 мс.

## 2. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В феврале 1975 г. в течение 48 часов проводились работы на девяти полюсах IV квадранта ЭМ ускорителя по уточнению данных измерений аномального распределения показателя поля  $\mathcal{N}$  по радиусу при четырехкратной скорости нарастания магнитного поля, полученных при измерениях 1974 г. /1,2/ и выявлению причин этих искажений.

Измерения проводились по известной методике с помощью измерительных катушек, усредняющих поле по ширине полюса и баллистического гальванометра /1/. Скорость нарастания магнитного поля устанавливалась  $\dot{B} = 4 \times \dot{B}_{\text{раб.}}$ , где  $\dot{B}_{\text{раб.}} = 4000$  Гс/с. Поле измерений  $B = 163$  Гс. Для получения полной картины варьировались условия:

А. На полюсах №№ 3, 7, 12, 41, 45 измерения проводились в медианной плоскости  $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}_0$  в области радиусов  $R = R_0 \pm 30$  см. На полюсах №№ 18, 22, 30, 33 — также в медианной плоскости, но в области радиусов  $R = R_0 \pm 60$  см.

На полюсе № 33 в области радиусов  $R = R_0 \pm 20$  см. Шаг измерений был дополнительно уменьшен до 5 см для проверки наличия микроструктуры в магнитном поле.

Б. На полюсе № 33 в области радиусов  $R = R_0 \pm 30$  см были про-

ведены измерения в плоскостях, отличных от медианной

$$z = z_0 \pm 9 \text{ см}$$

В. Объектом измерений был оставлен полюс № 33, медианная плоскость  $z = z_0$ , область радиусов  $R = R_0 \pm 20$  см. В этом случае измерения повторялись при всех схемных изменениях проводников, проходящих в вакуумной камере. Была разобрана обмотка резонансного вывода пучка (РОМ) в том же варианте, как и в апрельских измерениях 1974 г., сняты были перемычки в соединении обмоток РОМ на торцах квадрантов, отключены перемычки на клеммниках камеры для шин РОМ, отключены перемычки на клеммниках камеры для шин ИВЗ, проводников РЗМИ и проводников нижней интеграторной катушки.

Г. Проведенная проверка изоляции (мегаомметр на 1000 В) проводников РЗМИ, шин РОМ и ИВЗ относительно "земли" и друг-друга с циклом и без цикла дала хорошие результаты: замыканий не обнаружено. Полученные в случаях А и Б данные измерений " $\mu$ " представлены в таблицах 1 и 2. В случае "В" форма показателя поля продолжала оставаться неизменной с точностью  $\pm 0,01$ .

Таким образом данные измерений с большей вероятностью показывают, что имеющиеся искажения показателя поля " $\mu$ " при четырехкратной скорости нарастания магнитного поля распространяются на весь квадрант и не вызваны токами контуров, образованных замыканиями шин ИВЗ, РОМ и проводников обмоток РЗМИ, т.е. причина искажения " $\mu$ " пока не определена (рис. 1) (Таблица 1,2) (рис.2).

### 3. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В первом квартале 1975 г. было проведено девять циклов геодезических измерений за "кустом" глубинных реперов, один цикл -

по реперам рабочей сети на колоннах I корпуса в зале синхрофазотрона и один цикл - по реперам осадочной сети магнита и фундамента синхрофазотрона. Наблюдения за "кустом" реперов показали, что он является достаточно стабильным. Абсолютная максимальная осадка, по отношению к первому циклу измерения составила:

I репер - 0,12 мм

II репер - 0,06 мм

III репер - 0,03 мм

IV репер + 0,07 мм

При доверительном интервале определения указанных величин 0,05 мм.

Абсолютная максимальная осадка реперов рабочей сети в зале синхрофазотрона в районе II, III и IV квадрантов составила - 0,5 мм. Доверительный интервал определения этой величины

$$0,2 \leq \Delta S \leq 0,4 \text{ мм}$$

Геодезические измерения по шкалкам осадочной сети на магните показали, что средняя абсолютная осадка магнита синхрофазотрона находится в пределах доверительного интервала точности измерений (Таблица 3 ).

Средняя абсолютная осадка кольцевого фундамента под магнит составляет + 0,3 - + 0,4 мм.

Вычисленная средняя квадратическая погрешность одного превышения, полученная по невязкам в полигонах не превышает 0,06 мм.

Таблица 3

Квадрант №	Радиус, равновесной орбиты $R_c$ мм $\pm$	Средняя абсолютная осадка	Доверительный интервал $\Delta S$
I	- 800	- 0,5	0,2 $\leq \Delta S \leq$ 0,5
	- 800	- 0,3	
II	- 800	- 0,5	
	- 800	от -0,2 до -0,2	
III	- 800	от -0,2 до -0,2	
	+ 800	+ 0,2	
IV	- 800	- 0,3	
	+ 800	+ 0,2	

#### 4. РЗМИ-2 И КОРРЕКТИРОВАНИЕ $n$

С целью увеличения интенсивности ускоряемого пучка протонов была продолжена работа по определению величины и закона нарастания токов в обмотках системы корректирования  $n$  РЗМИ-2. В январском и февральском сеансах исследований при ускорении до 100 мсек была получена максимальная интенсивность:

$$J_{100} = (1,0 - 1,1) \times 10^{12} \text{ прот/цикл}$$

При этом был включен в работу разработанный в группе ВЧСУ отдела синхрофазотрона и налаженный в 1974 году разгруппирователь-модулятор (дебанчер инжектора ЛУ-20 с модуляцией энергии) со следующими параметрами.

- 1) Напряжение на щели резонатора  $U_p = 450$  кВ
- 2) Рабочая частота  $f_p = 145$  МГц  
(соответствует частоте резонатора ЛУ-20)
- 3) База дрейфа  $l = 10$  м  
(расстояние от последней дрейфовой трубки резонатора)



ЛУ-20 до ускоряющей щели разгруппирователя)

4) Максимальное выравнивание энергетического спектра пучка протонов ЛУ-20 на выходе разгруппирователя ~ в 4 раза (согласно расчетам энергетический спектр уменьшается с  $\pm 0,6\%$  до  $\pm 0,15\%$ ).

5) Глубина модуляции пучка протонов с энергией 20 МэВ ~ 3%.

6) Закон модуляции энергии линейно связан с ростом магнитного поля ЭМ в момент инжекции.

7) Изменению энергии пучка протонов на 3% соответствует модуляция фазы ВЧ напряжения на резонаторе разгруппирователя в пределах от  $-45^\circ$  до  $+45^\circ$  при амплитуде напряжения 450 кВ.

Длительность инжектируемого пучка была увеличена с 250 мкс до 600 мкс и число частиц, инжектируемых в камеру ускорителя доведено до  $N = 3,0 \times 10^{13}$  прот/цикл. В квазибетатронном режиме максимальное число частиц составляло

$$N_{\beta} = 1,5 \times 10^{13} \text{ прот/цикл}$$

Регулировка  $n$  проводилась по радиусу и по азимуту. В процессе исследований был найден оптимальный вариант изменения  $n$  по радиусу и азимуту (при существующей коррекции медианной плоскости), рис.3. Анализ показал, что в этом варианте, кроме основной большее влияние оказывают вторая и третья гармоники  $n$ , с помощью которых производится компенсирование искажений ведущего магнитного поля ускорителя. Измерения  $n$  проводились на основе информации о поведении пучка с помощью аппаратуры, разработанной в радиотехническом отделе.

В результате работ в январском и февральском сеансах была получена максимальная интенсивность на 100 мс ускорения

$$J_{100} = (1,0 - 1,1) \times 10^{12} \text{ прот/цикл}$$

При этом в корректировании  $n$  принимало участие 15 обмоток

системы РЗМИ-2 и 6 обмоток системы РЗМИ-1. Темп потерь получился следующий:

$$J_{3мс} = (2,7 - 2,9) \times 10^{12} \text{ прот/цикл}$$

$$J_{20мс} = (1,7 - 1,9) \times 10^{12} \text{ прот/цикл}$$

$$J_{100мс} = (1,0 - 1,1) \times 10^{12} \text{ прот/цикл}$$

Интересно отметить, что минимальный темп потерь получается в случае, когда зависимость  $n = f(\Delta z)$  имеет "керытообразный" характер, рис. 3.

При отключении разгруппирователя-модулятора интенсивность на 100 мс ускорения снижалась до  $J_{100} = (6,9 - 7,0) \times 10^{11}$  прот/цикл. Максимальная интенсивность без разгруппирователя при работе с системами коррекций РЗМИ 1+РЗМИ-2 была получена в декабре 1974 г. и равнялась

$$J_{100мс} = 8,8 \times 10^{11} \text{ прот/цикл} \quad /2/$$

В марте 1975 г. была сделана попытка получить аналогичную максимальную интенсивность при работе в системе корректирования с одной системой РЗМИ-2. За критерий был взят закон распределения  $n$  от 15 февраля 1975 г., при котором интенсивность ускоренного пучка:  $J_{100мс} = 1,0 \times 10^{12}$  прот/цикл.

Это потребовало проведения большого количества измерений " $n$ " по информации о пучке. Измерения  $n$  проводились на пучке после 10 мс ускорения. В области радиусов  $R_0 - 600 \text{ мм} \div R_0 + 400 \text{ мм}$  было проведено пять последовательных операций по измерению и корректированию  $n$  для получения достаточно близкого совпадения закона распределения  $n$  с оптимальным.

Была получена интенсивность  $J_{100мс} = (0,8 - 0,9) \times 10^{12}$  прот/цикл. В камеру ускорителя инжескировалось

$$N = 3,4 \times 10^{13} \text{ прот/цикл}$$

В квазибетатронном режиме число протонов

$$N_p = 1,2 \times 10^{13} \text{ прот/цикл}$$

## 5. БЫСТРЫЙ ВЫВОД УСКОРЕННОГО ПУЧКА

Итогом большого объема работ в отделе синхрофазотрона и производственно-техническом явилось изготовление магнита-дефлектора для канала быстрого вывода пучка из камеры ускорителя. Проведены стендовые испытания и измерения магнитного поля. После этого магнит-дефлектор устанавливается в камеру ускорителя на участке ввода. Одновременно производится монтаж механизма медленного перемещения магнита, монтаж системы питания и ряда устройств индикации пучка по трассе вывода в I квадранте ускорителя.

В марте были проведены первые эксперименты по забросу пучка и отклонению его в магните-дефлекторе при положении магнита на радиусах  $R_a - 500$  мм и  $R_b - 550$  мм. Проведены измерения глубины заброса пучка в зазор магнита-дефлектора на этих радиусах. Облучение рентгеновской пленки на азимуте окон 9 и 10 позволило определить координаты пучка по радиусу и высоте, а значит и траекторию его при прохождении через стенку вакуумной камеры ускорителя.

Уточняющие работы по трассированию будут продолжены во II квартале.

## 6. УСКОРЕНИЕ В РЕЖИМЕ ФОРСИРОВКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При ускорении ядер возникают потери их в результате перезарядки на остаточном газе. В свете решения задачи уменьшения этих потерь за счет сокращения времени ускорения на начальном этапе в январском и февральском сеансе проведены исследования ускорения в режиме форсировки магнитного поля синхрофазотрона.

Сначала предполагалось осуществить ускорение в режиме двухкратного увеличения скорости нарастания магнитного поля, и аппаратура задающей электроники была подготовлена к ускорению на второй гармонике. Инжекция частиц осуществлялась в обычном режиме, при номинальной скорости магнитного поля. Начало форсировки магнитного поля было синхронизовано с началом синхротронного режима. Переходный процесс от номинальной скорости магнитного поля к двухкратной занимал  $\sim 1$  мс.

Переход от номинальной скорости к двухкратной вызывал переходный процесс в задающем генераторе, что могло приводить к радиальному отклонению пучка, по предварительным оценкам,  $\sim$  на 20 см. Ускорение осуществлялось в режиме второй кратности при амплитуде ускоряющего напряжения 12 кВ.

Получить ускорение в режиме двухкратной форсировки магнитного поля не удалось, так как пучок терялся полностью через  $\sim 2$  мс после начала ускорения.

При втором сеансе исследований 20 февраля были учтены результаты, полученные в сеансе 24 января. Импульс начала форсировки был не синхронизован с инъекцией частиц и мог генерироваться раньше инъекции в интервале  $(0 \div 30)$  мс. В этом эксперименте скорость нарастания магнитного поля  $\dot{B}$  изменялась малыми "шагами", так что ускорение проходило в обычном режиме на первой кратности. Квазибетатронный режим настраивался также при форсированной скорости нарастания магнитного поля, и число частиц в бетатронном импульсе колебалось в пределах от  $4,0 \times 10^{12}$  до  $8,0 \times 10^{12}$  в одном цикле. Было замечено, что при включении форсировки магнитного поля в бетатронном импульсе резко падает число частиц с малыми колебаниями.

Некоторые результаты измерений интенсивности в трех точках 3 мс, 20 мс и 50 мс после начала ускорения при различных скоростях магнитного поля показывают влияние форсировки

$\dot{B}/B_{рас}$	$J_3 \times 10^{10}$	$J_{20} \times 10^{10}$	$J_{100} \times 10^{10}$
1	-	-	1,2
1,1	30,0	10,0	7,0
1,22	4,5	1,5	1,1
1,4	1,0	0,25	0,2

В последнем случае при  $\dot{B}/B_{рас} = 1,4$  наблюдалась большая нестабильность интенсивности вплоть до полного пропадания пучка. Корректирование поля с помощью системы РЗМИ-1 не меняют этого положения. Работа продолжается.

## 7. ИНФОРМАЦИЯ И КОНТРОЛЬ НА УСКОРИТЕЛЕ

В свете реализации задач создания на синхрофазотроне информационных и управляющих систем с использованием ЭВМ в секторе электроники РТО ведутся работы по нескольким направлениям.

В конце 1974 г. были закончены работы по созданию системы сопряжения датчиков параметров пучка в режиме регистрации орбиты и состояния медианной плоскости на синхрофазотроне. Закончена отладка электроники обработки информации (ОИИР). В результате в I квартале 1975 г. осуществлены вывод информации и ее обработка на ЭВМ-1010. Информация в графическом и табличном виде выводится на дисплей. Это открывает большие перспективы для оператора осуществлять корректирование орбиты и медианной плоскости на основе рекомендации ЭВМ, что позволит значительно сократить вре-



мя настройки оптимального режима ускорения.

В марте начала работать система выдачи информации о значении магнитного поля ускорителя. Система вырабатывает серию импульсов, следующих друг за другом с шагом 10 Гс. Значение магнитного поля определяется по формуле

$$B = B_0 + \Delta B \cdot N$$

где  $B$  - значение м. поля в килогауссах,

$B_0 = 0,16$  кГс - начальное магнитное поле,

$\Delta B = 0,01$  кГс - шаг дискретности

$N$  - число регистрируемых импульсов.

Информация позволяет физику-экспериментатору контролировать энергетическую привязку начала режима вывода частиц и стабильность ее от цикла к циклу. Стабильность системы  $\pm 0,05\%$ . Система может одновременно обслуживать 4 адреса, введена в опытную эксплуатацию в режиме физического эксперимента.

## 8. ИОННЫЙ ИСТОЧНИК "КРИОН" НА ИНЖЕКТОРЕ ЛУ-9М

Целью работ на этом этапе явилось создание необходимых условий для уменьшения времени ионизации в источнике "Крион"  $\sim$  в 5 раз. Для этого необходимо было увеличить плотность тока электронного пучка в такое же количество раз, т.е. с  $30 \text{ А/см}^2$  до  $\sim 150 \text{ А/см}^2$ .

Задача была решена путем миниатюризации катода до размеров  $\sim 1$  мм и применения магнитной компрессии электронного пучка. В настоящее время получена максимальная плотность тока электронного пучка  $\sim 310 \text{ А/см}^2$  при длительности импульса 1,5 мс и устойчивая рабочая плотность  $\sim 170 \text{ А/см}^2$  при длительности импульса  $\sim 40$  мс.

Использование столь высокой плотности электронного пучка по-

зволит достигать ядерного состояния для ионов азота за времена  $\sim 10$  мс, что существенно снижает требования к вакуумным системам форинжектора линейного ускорителя ЛУ-9М.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Б1-9-8460.
2. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Б2-9-8775.

Таблица I

Распределение показателя поля по полюсам  
 квадранта IV в медианной плоскости  $z = z_0$ .

№ полюса $\Delta z_{cm}$	3	7	12	18	22	30	33	41	46
+ 65							0.79		
+ 60				0.76	0.78	0.79	0.76		
+ 50				0.76	0.77	0.75	0.745		
+ 40				0.73	0.72	0.73	0.695		
+ 30	0.71	0.71	0.72	0.72	0.74	0.76	0.71	0.73	0.79
+ 20	0.71	0.72	0.72	0.70	0.75	0.76	0.715	0.74	0.79
+ 15							0.70		
+ 10	0.73	0.75	0.78	0.81	0.82	0.83	0.76	0.78	0.89
+ 5							0.82		
$R_0$	0.82	0.81	0.77	0.83	0.82	0.82	0.82	0.86	0.88
- 5							0.79		
- 10	0.68	0.69	0.70	0.71	0.69	0.72	0.715	0.72	0.76
- 15							0.67		
- 20	0.65	0.63	0.66	0.66	0.65	0.66	0.645	0.66	0.70
- 30	0.59	0.58	0.59	0.58	0.59	0.61	0.575	0.60	0.65
- 40				0.55	0.52	0.54	0.52		
- 50				0.58	0.55	0.55	0.53		
- 60				0.58	0.56	0.57	0.55		
- 65							0.53		

Примечание: скорость нарастания магнитного поля  $\dot{B} = 4x\dot{B}_{\text{раб}}$ .

Таблица 2

Характер показателя поля  $\Pi$ , полученный  
 в плоскостях, отличных от  $z_0$ .  
 Полюс 33, квадрант IV.

$\Delta z_{\text{см}}$	$z_0 - 9\text{см}$	$z_0$	$z_0 + 9\text{см}$
+30	0.72	0.71	0.71
+20	0.69	0.715	0.71
+10	0.76	0.73	0.76
$R_0$	0.85	0.82	0.86
-10	0.65	0.715	0.65
-20	0.63	0.645	0.63
-30	0.55	0.575	0.56

Примечание: скорость нарастания магнитного поля

$$\dot{B} = 4 \times \dot{B}_{\text{р.с.}}$$



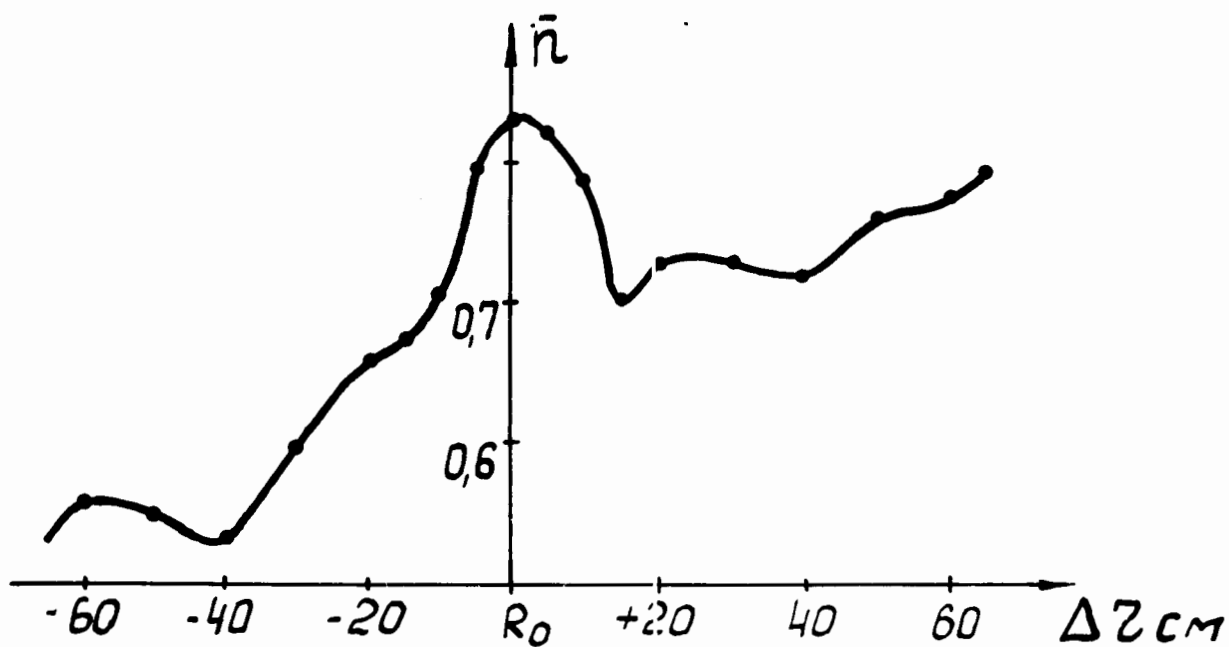


Рис. I Зависимость усреднённого показателя поля  $\bar{n}$  от радиуса в IV квадранте при четырёх - кратной скорости нарастания магнитного поля.

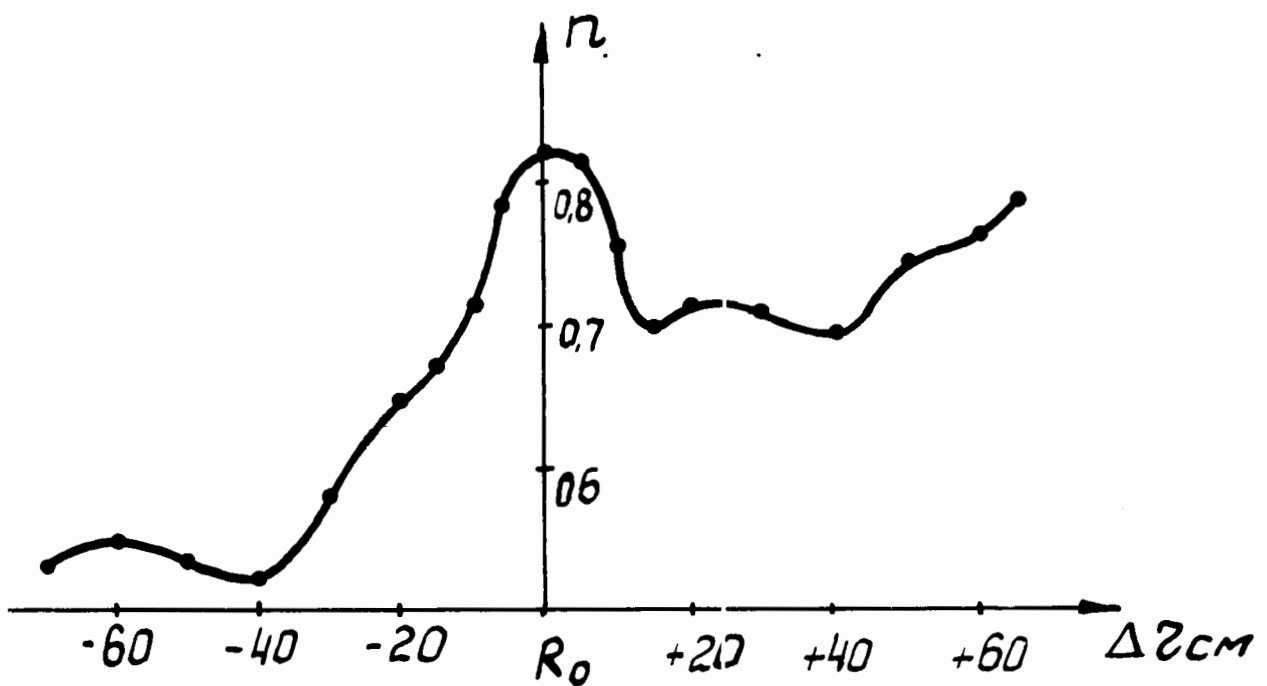


Рис. 2. Зависимость показателя поля  $n$  от радиуса при четырёхкратной скорости нарастания магнитного поля, полюс 33, квадрант IV.

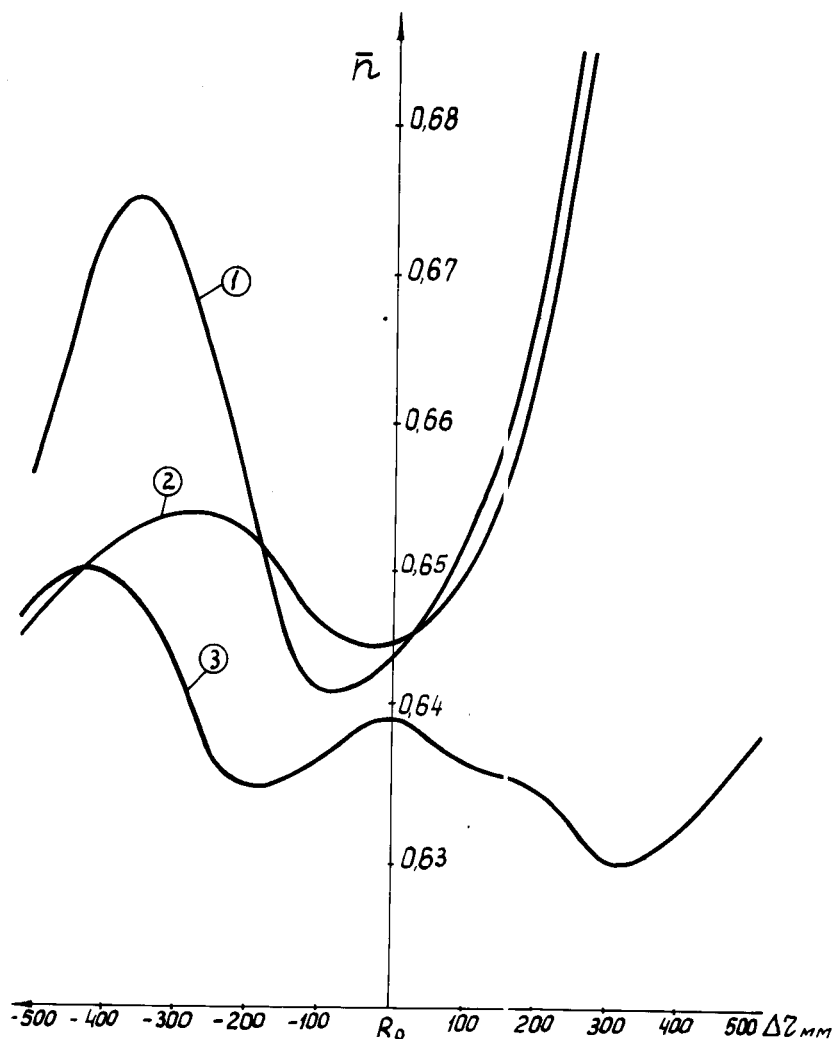


Рис. 3. 1,2 - кривые усреднённых значений показателя поля  $\bar{n}$  в ускорителе, при которых получена максимальная интенсивность  $J_{100 \text{ мс}} = (1,0 \div 1,1) \times 10^{12}$  прот/цикл.  
 а) работает 6 обмоток системы РЗМИ-1 и 15 - системы РЗМИ-2  
 б) данные  $\bar{n}$  получены на основе информации о поведении пучка.  
 3 - показатель поля  $\bar{n}$  при работе только системы РЗМИ-1.