

Безногих Ю.Ф. и др.
Б2-9-8775

+

С 345е
Б-399



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1980/75

Б2-9-8775

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 75

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

Б2-9-8775

Ю.Д.Безногих, М.А. Воеводин, А.И. Говоров, Е.Д. Донец,
В.П. Заболотин, М.П. Зиновьев, А.С. Исаев, И.Б. Иссинский,
Г.С. Казанский, И.И. Карпов, Н.А. Горюков, Б.Н. Кузичин,
Е.М. Кулакова, Л.Г. Макаров, А.И. Михайлов, В.А. Мончинский,
В.Н. Перфеев, Р.В. Полкова("), Г.П. Пучков, Ю.И. Романов,
И.Н. Семенюшкин, Ю.В. Смирнов, С.В. Федуков, В.И. Черников,
К.В. Чехлов, И.Н. Яловой.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИХРОТРОНА ОИЯИ

(IY квартал 1974 г.)

8 апреля 75

(") - ЛВТА

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна, 1975 г.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
1. Введение.....	2
2. Магнитные измерения.....	4
3. Геодезические измерения.....	7
4. Эмитанс протонного пучка инжектора ЛУ-20.....	II
5. Работа по корректированию показателя поля "r".....	I2
6. ЛУ-20 - инжектор ядер.....	I3
7. Влияние пространственного заряда.....	I4
8. Ионный источник "Крион" на инжекторе ЛУ-9М.....	I5
9. Одноэтапный режим ускорения ядер.....	I5
10. Расчётное распределение ускоряющего электрического поля в синхрофазотроне.....	22

I. Введение.

В IV квартале 1974 г. на синхрофазотроне ускорялись протоны, дейтоны и α -частицы. Средняя интенсивность ускоренных протонов составила 2.3×10^{11} частиц в цикле, дейтонов - 0.7×10^{11} , а количество α -частиц достигало уровня $\sim 1.5 \times 10^8$ в цикле ускорения.

Было запланировано 1404 часа работы ускорителя. Из них на эксперимент было использовано 1311 часов. На дальнейшее изучение и совершенствование ускорителя - 498 часов.

Очередной цикл магнитных измерений ставил своей целью получение данных о положении медианной магнитной плоскости ускорителя. Измерения показали большие локальные искажения её на ряде полюсов электромагнита и значительный уход во втором квадранте по сравнению с измерениями 1959 года.

Годовой итог геодезических измерений позволяет сделать ряд выводов о факторах, влияющих на положение медианной плоскости ускорителя. Получены данные углового раствора полюсов электромагнита (ЭМ).

Проведены измерения эмитанса протонного пучка инжектора ЛУ-20. Величина эффективного эмитанса оказалась лучше, чем линейного ускорителя ИТЭФ И-2.

Продолжалась работа с системой корректирования показателя поля "n" РЗМИ-2. Корректирование впервые проводилось по всей ширине рабочей камеры ускорителя и по азимуту кольца одновременно. В результате, после 100 мсек ускорения была получена интенсивность протонов 8.5×10^{11} .

Использование ЛУ-20 в качестве инжектора ядер позволило существенно увеличить интенсивность пучка ускоренных дейтонов и α -частиц. Это открывает в дальнейшем новые возможности более эффективного ускорения в кольце ядер высокой зарядности.

Проведённые исследования влияния пространственного заряда и анализ показали, что существующий предел ограничения интенсивности

ности ускоренного пучка на уровне $\sim 1.3 \times 10^{11}$ прот/цикл удаётся отодвинуть в сторону больших значений за счёт применения дополнительного корректирования показателя поля "n".

Продолжающиеся работы на ионном источнике "Крион" направлены на решение основной задачи, однако возникает ряд новых задач, которые требуют больших усилий для их решения, в частности, продолжает оставаться серьёзной задачей "стыковки" вакуумной системы источника и форинжектора.

В октябре 1974 г. впервые на синхрофазотроне ОИЯИ был осуществлён одноэтапный режим синхротронного ускорения дейтронов и α -частиц. Осуществление этого режима стало возможным после проведения работ на линейном ускорителе по применению его для ускорения ядер, что несколько сузило динамический диапазон модуляции частоты ускоряющего напряжения вследствие повышения энергии инжектируемых частиц. Одновременно решались задачи по расширению частотного диапазона задающего генератора, настройки закона связи между частотой ускоряющего напряжения и магнитным полем в режиме одноэтапного ускорения и использовались возможности мощного широкополосного усилителя с целью получения необходимой амплитуды ускоряющего напряжения в заданном диапазоне частот. Внедрение одноэтапного режима значительно облегчило настройку ускорения и поддержание устойчивого режима, позволило увеличить интенсивность ускоряемых ядер практически на порядок, повысилась надёжность, стабильность, упростился режим ускорения.

Анализ и расчёт, проведённый применительно к существующей конструкции ускоряющего электрода синхрофазотрона, показали, что существует возможность дополнительных потерь ускоряемых частиц из-за погрешности в распределении составляющих ускоряющего высокочастотного поля в зазоре электрода. Показана возможность увеличения на 10 % продольной компоненты ускоряющего электрического поля.

2. Магнитные измерения.

В ноябре 1974 г. были проведены измерения положения магнитной плоскости синхрофазотрона. На каждом полюсе электромагнита ускорителя магнитная плоскость измерялась в пяти точках: R_0 , $R_0 \pm 30$ см и $R_0 \pm 63$ см, за исключением двух крайних полюсов каждого квадранта и двух полюсов с сигнальными электродами внутри каждого квадранта, на которых измерения не были сделаны по техническим причинам. Магнитная плоскость измерялась при поле $\dot{B} = 230$ гс. Использовалась система, состоящая из специальных измерительных катушек и баллистического гальванометра. Измерительные катушки, точечные в вертикальном направлении, вмонтированы в общую обойму одна над другой на расстоянии 60 мм. Обойма с катушками подвешена к каретке на двух нитях из кручёного шёлка, что обеспечивает неизменное положение осей катушек относительно горизонтальной составляющей магнитного поля B_T . Каретка с катушками устанавливается в зазоре электромагнита с помощью специального приспособления так, чтобы катушки находились на расстоянии ± 30 мм относительно средней геометрической плоскости. Постоянные катушек (250.000 витков \times см^2) одинаковы с точностью 5×10^{-3} , э.д.с., наводимая в них составляющей B_z , компенсируется специальными компенсационными катушками, некоторая нескомпенсированность исключается при измерениях поворотом катушек на 180° вокруг вертикальной оси.

Точность измерения положения магнитной плоскости не хуже, чем ± 0.75 мм. Она складывается из погрешностей: несовпадения электрических и механических осей катушек -- $\delta z_{c,k} = \pm 0.25$ мм, неточной подгонки катушек -- $\delta z_k = \pm 0.03$ мм, неточности снятия показаний гальванометра -- $\delta z_a = \pm 0.40$ мм.

Положение магнитной плоскости измерялось в 1954г. и в 1959г., но при $B = 160$ гс. Сравнительные измерения показали, что с точностью ± 0.2 мм положение магнитной плоскости одинаково при 160 и 230 гс.

В результате измерений получены данные положения магнитной плоскости относительно средней геометрической плоскости каждого квадранта ускорителя на пяти радиусах при поле $B = 230$ гс. (Рис. I, 2, 3, 4), откуда ясно видно, что имеются сильные локальные искажения положения магнитной плоскости на полюсах: №6 и 13 квадранта I, 43 квадранта IV и, особенно, на полюсах 2 и 3 квадранта III. Эти искажения вероятнее всего можно объяснить наличием контуров токов, создаваемых замыканием элементов камеры и элементов магнитопровода.

Данные измерений показывают значительные изменения в положении магнитной плоскости на квадранте II по сравнению с данными измерений 1959 года (Таблица I). Характер этих изменений (наблюдается некоторая закономерность по радиусу и азимуту) позволяет заключить, что основной причиной изменения является наличие перекоса по радиусу фундамента под этим квадрантом.

Сравнительно небольшие изменения в положении магнитной плоскости квадрантов I и IV нельзя объяснить только деформациями фундамента, т.к. отсутствует необходимая закономерность изменений по радиусу и азимуту. Более вероятно, что причиной являются контура токов, образовавшиеся в результате замыканий элементов камеры и магнитопровода.

Аналогичная причина, вызывающая локальные искажения магнитной плоскости полюсов 2 и 3 III -го квадранта, приводит к значительному изменению положения всей магнитной плоскости этого квадранта.

В таблице 2 приводятся значения амплитуд первой гармоники искажения магнитной плоскости и искажения орбиты пучка по вертикали. Приводятся также данные амплитуд этих гармоник с учётом изменения положения магнитной плоскости только на одном II квадранте для сравнения с данными измерений 1959 года. Обнаруживается, что локальные искажения на вышеуказанных 5 -ти полюсах кольца изменяют амплитуду первой гармоники искажения орбиты пучка по вертикали на радиусах: $R_0 + 63$ см на $+ 19$ мм, $R_0 + 30$ см на $+ 7$ мм,

R_0 - без изменения, $R_0 - 30$ см на - 4 мм, $R_0 + 63$ см на - 9мм.

Из-за возросших отклонений в положении магнитной плоскости на квадранте II амплитуда первой гармоники искажения орбиты пучка по вертикали по сравнению с 1959 г. увеличилась на радиусах:

$R_0 + 63$ см на 39 мм, R_0 на 26 мм, $R_0 - 63$ см на 32 мм.

Если такое искажение магнитной плоскости считать целиком зависящим от перекоса фундамента по радиусу квадранта II, что связано с возрастанием нагрузки на грунт из-за построенного корпуса IB, то величина перекоса фундамента на базе 140 см ($R_0 \pm 70$ см) не превышает 0.55 мм.

Искажение магнитной плоскости во всех четырёх квадрантах, происшедшее по различным причинам, привело к увеличению первой гармоники искажения орбиты пучка по вертикали сравнительно с данными 1959 г:

$R_0 + 63$ см на 35 мм, $R_0 -$ на 19 мм, $R_0 - 63$ см на 17 мм и сейчас амплитуды её на различных радиусах составляют:

- $R_0 + 63$ см - 65 мм,
- $R_0 - 30$ см - 51 мм,
- $R_0 + 30$ см - 55 мм,
- $R_0 - 63$ см - 42 мм.
- R_0 - 50 мм,

Искажения орбиты пучка могут быть скорректированы имеющимися корректирующими токами в проводниках системы коррекций. Показания системы измерительных электродов в камере подтверждают это.

Однако необходимость работы с четырёхкратной скоростью роста магнитного поля при ускорении ядер требует более серьёзного отношения к влиянию всех факторов на магнитные характеристики поля. Как пример можно привести результат магнитных измерений на двух полюсах квадранта IV /I/. Форма кривых показателя поля n'' (Рис.5,6) до сих пор плохо объясняется, но одинаковая величина вклада, (Рис.7,8) при четырёхкратной скорости роста поля вводит на мысль об одной и той же причине искажения поля на обоих полюсах. Магнитные измерения будут продолжены.

3. Геодезические измерения.

В процессе строительства и в первые годы эксплуатации синхрофазотрона произошли значительные неравномерные осадки фундамента, на котором смонтирован электромагнит ускорителя. Основной причиной деформаций явилась перегрузка пород, слагающих основание./2/. Это, в свою очередь, привело к искажению медианной плоскости ускорителя по двум координатам: по азимуту кольца и в радиальном направлении - так называемый "перекос". Контроль за осадкой электромагнита в 1955 году показал максимальную величину прогиба фундамента порядка 23 мм. В 1956 году эта величина уменьшилась до 18 мм и был сделан вывод, что по окончании перераспределения и выравнивания нагрузок деформации фундамента прекратились и установилось равновесие. В дальнейшем контроль за осадкой электромагнита проводился несистематически, в основном, по причине отсутствия постоянной геодезической службы. Статистика этих измерений показала, что процесс не только не прекратился, но продолжает прогрессировать. Рис. 9, 10, 11, 12. Особенно ценными измерениями оказались выполненные в 1972 г. внутри камеры синхрофазотрона /3/ в свете развёртывания работ по повышению интенсивности ускорителя: была сделана попытка провести более подробную съёмку относительных высот различных точек дна камеры. Точность измерений оказалась не хуже ± 1 мм. Именно поэтому в конце 1973 года перед группой геодезистов был поставлен ряд задач, решение которых включало и подробную исполнительную съёмку положения медианной плоскости электромагнита (ЭМ) по высоте геодезическими методами, и организацию систематических наблюдений за динамикой высотных деформаций её. Средняя квадратическая погрешность измерений положения медианной плоскости не должна быть хуже 0.2 мм. В течение 1974 г. была создана высотная геодезическая основа, состоящая из опорной, рабочей и осадочной сетей, и начали вестись сезонные геодезические измерения высотного положения ЭМ синхрофазотрона.

Опорная сеть представляет собой "куст" из четырёх глубинных инварных реперов, длиной $L = 12$ м, расположенных по окружности радиусом $R = 6$ м. "Куст" удалён от района нового строительства на 200 - 300 м и расположен между корпусами линейного ускорителя и экспериментального зала (ИБ), примерно в 60 м от корпуса синхрофазотрона.

Рабочая сеть представлена системой нивелирных ходов, проложенных по высотным шкалкам-реперам, которые закреплены на несущих строительных колоннах и вспомогательном оборудовании, и образует несколько замкнутых полигонов с узловыми точками. Эта сеть опирается на "куст" глубинных реперов и состоит из двух сетей: сеть в зале синхрофазотрона закреплена 52 шкалками и сеть в корпусе ИБ и измерительном павильоне - 32 шкалками.

Осадочная сеть располагается в подвале синхрофазотрона и закреплена 23 реперами непосредственно на фундаменте ЭМ. Ходы осадочной сети опираются на шкалки рабочей сети в зале синхрофазотрона.

Наблюдения за стабильностью положения блоков ЭМ проводились посредством контроля положения шкалок/реперов (около 400 штук), закрепляющих проекцию медианной плоскости на стойках ЭМ. Положение этих реперов относительно реперов рабочей сети определялось методом геометрического нивелирования.

Положение ЭМ синхрофазотрона по высоте определялось посредством измерений высотного положения характерных точек полюсов, образующих зазор ЭМ. Измерения проводились через открытые окна вакуумной камеры. На тех участках, где отсутствовала возможность нивелирования характерных точек камеры и реперов рабочей сети, внутри камеры прокладывались заполняющие микронивелирные ходы по нижним полюсам. Положение съёмочных точек верхнего полюса определялось двумя методами: геометрического нивелирования и измерения зазора специальным "нутромером". Положение точек,

принадлежащих медианной плоскости, вычислялось по формуле:

$$H_{МП} = H_{НП} + \frac{l}{2} \quad /4/,$$

где: $H_{НП}$ - отметка характерной точки нижнего полюса,
 l - зазор между полюсами /4/.

Ниже приводится количество циклов измерений геодезических сетей и наблюдаемых объектов и средние квадратические погрешности этих измерений.

Объект измерений	N	δ мм
1) Опорная сеть: "куст" реперов	14	0.06
2) Рабочая сеть: а) зал синхрофазотрона	7	0.06
б) экспериментальный зал - к. IБ	3	0.06
в) измерительный павильон	3	0.06
3) Осадочная сеть: подвал синхрофазотрона	2	0.06
4) Зал синхрофазотрона:		
а) зазор между полюсами	7	0.03 - 0.08
б) "перекос" полюсов электромагнита	7	0.18 - 0.19 (")
в) положение медианной плоскости	4	0.06

(") максимальная квадратическая погрешность определения "перекоса" полюса по радиусу в одном квадранте только методом геометрического нивелирования составила 0.180 мм, максимальная средняя квадратическая погрешность определения взаимного положения двух наиболее удалённых друг от друга точек, расположенных в противоположных квадрантах составила 0.190 мм; максимальная

средняя квадратическая погрешность определения "перекоса" полюса по радиусу в одном квадранте сочетанием метода геометрического нивелирования и микро nivelирования оказалась 0.210 мм.

Здесь N - число циклов измерений,

δ - средняя квадратическая погрешность:

Анализ данных, полученных в результате наблюдений за стабильностью высотного положения ЭМ синхрофазотрона, показал, что ЭМ периодически деформируется в зависимости от времени года. Во время подъёма грунтовых вод (апрель) наружные радиусы всех квадрантов магнита поднялись относительно межени (февраль), а внутренние - опустились. Наибольший подъём наружных стоек ЭМ составил 0.7 - 1.2 мм, а наибольшее опускание внутренних - 0.2 - 0.3 мм. "Перекос" полюсов ЭМ на базе $R_0 \pm 800$ мм составил около 0.4 мм. К моменту наступления летнего периода (июнь) I и IV квадранты на внешнем радиусе опустились относительно апреля на 0.8 - 1.4 мм, а на внутреннем радиусе поднялись на 0.5 мм. Рис.13. Это привело к наклону I и IV квадрантов на угол 1.2×10^{-3} рад. Наличие деформаций ЭМ приводит к "перекосу" по радиусу медианной плоскости. Величину "перекоса" можно вычислить, исходя из утверждения, что угол между полюсами, равный 9.3×10^{-3} рад. выдерживается идеально. (Рис.13,14).

По измеренным зазорам был определён угол раствора полюсов ЭМ синхрофазотрона и отклонения величин углов между полюсами от теоретического значения. (Рис.15.)

При появлении дополнительных нагрузок происходят и аперриодические осадки. Эти процессы привели к дополнительной осадке третьего квадранта ЭМ в результате строительства нового экспериментального зала (корп. 205) на величину 1 - 1.2 мм.

Влияние деформаций ЭМ на нормальную работу ускорителя /3/ подтверждают необходимость дальнейшего систематического наблюдения за динамикой процесса.

4. Эмитанс протонного пучка инжектора ЛУ - 20.

Измерение угловых характеристик пучка протонов было проведено в двух участках ионопровода, транспортирующего пучок в кольцо синхрофазотрона, а именно: в начале ионопровода - на выходе из резонатора ЛУ-20 и в конце его - на выходе из инфлекторных пластин. В обоих случаях использовался известный метод двух щелей /5/, с дистанционным управлением.

При измерении эмитанса на выходе из инфлекторных пластин в качестве токоприёмника использовался люминесцентный экран с нанесённой масштабной сеткой. Изображение коллимированного пучка наблюдалось на экране видеоконтрольного устройства ПТУ-102. Точность измерения в этом случае составляет ~15 - 20%.

При измерении угловых характеристик пучка на выходе из ЛУ-20 в качестве токоприёмника использовалось секционированное устройство, состоящее из 20 изолированных друг от друга коллекторов. Разрешающая способность по углам такого устройства равна 0.1 mrad . Для усиления сигналов, выборки, записи, хранения и считывания информации на осциллограф типа С8-11 использовалась электронная аппаратура, разработанная и изготовленная в группе электрорадиоавтоматики отдела синхрофазотрона. Точность измерения эмитанса оказалась лучше, чем в предыдущем случае (5-10%)

Ниже приведена величина эффективного эмитанса ЛУ-20, в котором находится 90% частиц, при токе протонного пучка $=10 \text{ mA}$.

Вертикальная пл. $\eta - \dot{\eta}$	Горизонтальная пл. $\zeta - \dot{\zeta}$	Тип токоприёмника
2.4 $\text{mrad}\cdot\text{cm}$	1.7 $\text{mrad}\cdot\text{cm}$	Люминесцентный экран
2.47 — " —	1.5 — " —	Секционированная мишень

Хорошее совпадение данных двух способов подтверждает результаты измерений. (Рис. 16, 17)

При сравнении оказалось, что величина эффективного эмитанса ЛУ-20 лучше, чем линейного ускорителя ИТЭФ И-2 /6/.

5. Работа по корректированию показателя поля „ n ” .

На этом этапе была поставлена задача корректировать показатель поля „ n ” по всей ширине рабочей области камеры ускорителя и по азимуту одновременно. Для решения её оказалось необходимым предварительно проделать большой объём монтажных работ.

В зале центрального пульта управления (корпус 2) было смонтировано 20 вновь изготовленных источников питания обмоток системы РЗМИ-2./1/. Там же, на щите управления (ЩУ-21) произведён монтаж двух новых панелей №42 и №43.

В первом корпусе переоборудована панель переключений, что увеличило оперативность при переходе к различным схемам питания системы РЗМИ-2.

В конце декабря в результате корректирования показателя поля „ n ” в радиальном и азимутальном направлениях одновременно была достигнута интенсивность ускоренного до 100 мсек пучка протонов $I_{100} = 8.5 \times 10^{11}$ прот/цикл. Система коррекции РЗМИ-2 работала одновременно с системой РЗМИ-1. Длительность инжекции составляла $\tau = 250 - 300$ мксек.

Анализ работы в данном режиме позволил сделать следующие выводы.

1). Наибольшее влияние на повышение интенсивности оказывают центральные проводники /1/, расположенные на радиусе $R_0 \pm 125$ мм. Положительное действие проводников П2 П3 и П1 П2 усиливается при введении в показатель поля „ n ” азимутальных гармоник (первой и второй).

2). Аналогичное влияние на интенсивность оказывает и первая гармоника азимутальной коррекции показателя поля „ n ”, создаваемая на радиусе $R_0 - 225$ мм проводником П5.

3). Проводники на внешнем радиусе П6 ($R_0 \pm 335$ мм) и - вну-

треннем П6 ($R_0 - 335$ мм) вводят в поле постоянную составляющую, что повышает значение " n " в момент инъекции и на протяжении первых 10 - 15 мсек ускорения.

4). Увеличение " n " на наружном радиусе до величины 0.7 - 0.75 в момент инъекции и в первые миллисекунды ускорения должно стать предметом дальнейших исследований.

5). Ускорение пучка с наименьшими потерями происходит в центральной области камеры ускорителя, как показывает система информации о радиальном положении.

В дальнейшем планируется, по аналогии с системой РЗМИ-2, ввести пространственно-временную коррекцию медианной плоскости магнитного поля "В" и азимутальной асимметрии её, что позволит осуществить более гибкую коррекцию магнитного поля в динамическом режиме.

6. ЛУ - 20 - инжектор ядер.

В результате работ, проведённых в секторе инъекции, удалось осуществить режим ускорения ядер в инжекторе ЛУ-20 с энергией инъекции 5 Мэв/нуклон, что позволило существенно увеличить интенсивность пучка ускоренных ядер в кольце синхрофазотрона. При ускорении дейтронов до максимальной энергии интенсивность ускоренного пучка составила $(4 \div 5) \times 10^{10}$ дейт./цикл, что на половину порядка выше, чем при использовании инжектора ЛУ-9М. При ускорении α -частиц в конце первого этапа ускорения получена интенсивность $\sim 1.0 \times 10^9$ зар/цикл, что на два порядка выше, чем при использовании инжектора ЛУ-9М. В конце цикла ускорения интенсивность пучка α -частиц достигала 3.0×10^8 зар/цикл - конец второго этапа /7/. Повысилась и стабильность работы ускорительного комплекса в целом.

Реализация одноэтапного режима ускорения ядер в кольце синхрофазотрона оказалась возможной при использовании ЛУ-20 в качестве инжектора. Это позволило поднять интенсивность ускоренного пучка дейтронов в конце цикла ускорения до 5×10^{10} дейт./цикл

Эффективность работы ускорительного комплекса повысилась за счёт существенного сокращения потерь времени при переходе к ускорению частиц различного сорта. Запуск инжектора ЛУ-20 на ядрах в дальнейшем позволит эффективнее ускорять в кольце ядра более высокой зарядности, чем ядра дейтерия и гелия.

Инжектор ЛУ-9М полностью освобождён для экспериментальной работы с источником "Крион".

7. Влияние пространственного заряда.

Удачным инструментом для изучения этого явления оказались кварцевые полупрозрачные мишени, установленные на участке транспортировки пучка от инжектора ЛУ-20 в кольцо синхрофазотрона. Основное назначение их — наблюдение за пучком в наиболее характерных точках транспортирующего ионопровода. Установлено, что каждая из этих мишеней (их всего 4) при наведении на пучок уменьшает интенсивность его примерно в два раза без изменения других характеристик. Иллюстрацией такого действия может служить величина заряда циркулирующего пучка в квазибетатронном режиме (Рис. 18). Измерение заряда производится после сворачивания пучка на бетатронную мишень, расположенную в камере ускорителя на внутреннем радиусе.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Инжектор и электроника, управляющая процессами ускорения, настраивались таким образом, чтобы получить в кольце синхрофазотрона максимальную интенсивность ускоренного пучка, при хорошей стабильности. Затем проводились измерения количества частиц в квазибетатронном режиме (N_{β}), числа частиц, захваченных в синхротронный ($J_{3\text{мсек}}$) и — ускоренных до 100 мсек ($J_{100\text{мсек}}$). После этого на участке транспортировки последовательно вводились кварцевые мишени и вновь измерялись эти же параметры.

Такого рода измерения проводились в двух режимах:

- а) включена система коррекции "n" РЗМИ-1,
- б) включена система коррекции "n" РЗМИ-1 + РЗМИ-2.

Анализ показывает, что в синхрофазотроне ОИЯИ с включённой системой коррекции показателя поля "n" РЗМИ-1 ограничение интенсивности ускоренного пучка наступает при количестве частиц $\sim 1.3 \times 10^{11}$ прот./цикл./Рис.19/. Дальнейший рост числа частиц в квазибетатронном режиме приводит к очень медленному росту интенсивности ускоренного пучка, хотя захват в режим ускорения остаётся, практически, в линейном соотношении.

При включении дополнительно системы коррекции РЗМИ-2, которая позволяет более гибко осуществить пространственно-временную коррекцию показателя поля "n" на первых 100 мсек ускорения, оказывается что уровень ограничения интенсивности в синхротронном режиме сдвигается в область больших значений./Рис.20/. Это и позволяет получить рост интенсивности ускоренного пучка. Как показали исследования радикальное действие на повышение интенсивности оказывает введение на различных радиусах азимутальных гармоник в показатель поля "n" для компенсации существующих азимутальных искажений его.

8. Ионный источник "Крион" на инжекторе ЛУ-9М.

Выяснено, что "стыковка" вакуумной системы источника "Крион" и форинжектора ЛУ-9М представляет сложную задачу. Водородный фон достаточно высок и не позволяет стабильно реализовать длительность ионизации более 15 мсек. Для диагностики режима работы источника разработан и введён в действие анализатор зарядового состава ионного тока по времени пролёта на базе форинжектора ЛУ-9М. Результаты исследований показали необходимость \sim пятикратного увеличения плотности электронного пучка в источнике "Крион" с целью существенного уменьшения времени ионизации.

9. Одноэтапный режим ускорения ядер.

Работа по осуществлению одноэтапного режима ускорения дейтронов и α -частиц на синхрофазотроне ОИЯИ потребовала

серьезного анализа и соответствующего вмешательства в работу большинства узлов задающей и управляющей электроники.

Закон связи между частотой ускоряющего напряжения f и индукцией магнитного поля в зазоре B в процессе синхротронного ускорения выражается известным соотношением:

$$f = \frac{qc}{\pi} \cdot \frac{B}{\sqrt{\left(\frac{E_{ор}}{300R_0}\right)^2 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 - B^2}}$$

где f - частота ускоряющего напряжения (гц),

B - индукция магнитного поля в зазоре (гс),

$E_{ор}$ - энергия покоя протона (эв),

R_0 - радиус центральной орбиты ускорителя (см),

A - массовое число ядра,

Z - заряд ядра в единицах элементарного заряда,

c - скорость света (см/сек),

π - периметр орбиты (см),

q - кратность ускорения.

Диапазон модуляции частоты определяется значениями магнитного поля при инжекции $B_{и}$ и максимальным полем синхрофазотрона $B_{мах}$. В свою очередь величина поля $B_{и}$ зависит от сорта ускоряемых частиц и их энергии при инжекции:

$$B_{и} \approx \frac{A}{Z} \cdot \frac{\sqrt{2W_{иb} E_{ор}}}{300R_0}$$

где $W_{иb}$ - кинетическая энергия инжектируемых в синхрофазотрон ядер, приходящаяся на один нуклон (эв).

Учитывая, что ускорение дейтонов и α - частиц в линейном ускорителе ЛУ-20 также как и в ЛУ-9М осуществляется в режиме второй кратности, и энергия частиц на выходе из ЛУ уменьшается с 20 Мев для протонов до 5 Мев/нуклон для ядер, нетрудно заметить, что переход от ускорения протонов ($\frac{A}{Z} = 1$) к ускорению

ядер ($\frac{A}{Z} = 2$) не сопровождается изменением значения магнитного поля при инжекции, а при использовании ЛУ-20 в качестве инжектора величина магнитного поля при инжекции составит $B_{и} \sim 230$ гс.

Подставив в формулу связи f и B численные значения, характерные для синхрофазотрона ОИЯИ, и выражая индукцию магнитного поля в килогауссах, а частоту ускоряющего поля в мегагерцах будем иметь:

$$f_{\text{МГц}} = \frac{1.44 q \sqrt{B_{\text{кГс}}}}{\sqrt{1.25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + B_{\text{кГс}}^2}}$$

Отсюда следует, что с учётом значений магнитного поля при инжекции - 230 гс и $B_{\text{max}} = 12.5$ кГс аппаратура высокочастотного питания синхрофазотрона в режиме одноэтапного ускорения дейтронов и α -частиц при $q = 1$ должна перекрывать диапазон от 150 КГц до 1.42 МГц, что в ~ 1.3 раза больше по сравнению с диапазоном частот при ускорении протонов с инжектором ЛУ-9М (0.2 ÷ 1.44 МГц).

Задающий частотно-модулированный генератор, являющийся одним из основных звеньев в системе связи f и B , имеет диапазон модуляции частоты (0.15 ÷ 1.5) МГц /9/. Часть диапазона генератора (0.12 ÷ 0.2) МГц отводится на "успокоение" переходного процесса в модуляции частоты, вызванного началом модуляции.

Длительность переходного процесса, обусловленная параметрами задающего генератора, линейно зависит от скорости модуляции частоты:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial B} \cdot \dot{B} = \frac{1.8 q \cdot \dot{B}}{\left[1.25 \left(\frac{A}{Z}\right)^2 + B_{\text{кГс}}^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

где $\dot{B} \sim 4000$ гс/сек - скорость нарастания магнитного поля.

Отсюда нетрудно видеть, что максимальная скорость модуля-

ции частоты имеет место в начале синхротронного режима ускорения и при переходе от ускорения протонов к ускорению ядер уменьшается с 5.0 МГц/сек до 2.5 МГц/сек. Время на успокоение переходного процесса генератора уменьшается с 10 мсек до 5 мсек. Тогда "запас" по частоте на переходный процесс при ускорении ядер должен быть не меньше:

$$\Delta f_{\text{я}} \geq \left(\frac{df}{dt} \right)_{\text{я}} \cdot \Delta t_{\text{я}} = 2.5 \text{ МГц/сек} \cdot 5.0 \text{ мсек} = 12.5 \text{ КГц.},$$

а начальная частота генератора не больше 137.5 КГц.

Для увеличения перекрытия по частоте с 10 до 14 раз в колебательном контуре генератора был применён феррит с магнитной проницаемостью $\mu = 2000$.

Непостоянство крутизны модуляционной характеристики задающего генератора предъявило дополнительные требования к функциональному преобразователю, который в совокупности с задающим генератором должен обеспечивать необходимую связь f и V во всём цикле одноэтапного режима ускорения. Для уменьшения влияния нелинейности модуляционной характеристики на точность настройки закона связи, в особенности на начальном участке ускорения, была разработана и введена в действие схема коррекции. При переходе от ускорения протонов к ускорению дейтронов и α -частиц с помощью специального делителя на входе интегратора уменьшается в два раза напряжение с интеграторной катушки и перестраивается "привязка" импульса начала работы интегратора с поля 97 гс (для протонов) на поле 194 гс. Закон связи f и V , настроенный для ускорения протонов при начальной частоте генератора $f_0 = 150 \text{ КГц}$, при переходе к ускорению ядер и уменьшению начальной частоты генератора до $f_0 = 125 \text{ КГц}$, требует некоторой перестройки функционального преобразователя, хотя нелинейная зависимость выходного напряжения его от входного остаётся неизменной. Всё это позволяет обеспечить настройку закона связи f и V в режиме одноэтапного ускорения дей -

тонов и α -частиц в пределах $\pm 0.2\%$, что соответствует отклонению пучка по радиусу не более ± 10 см.

Модулируемый по частоте сигнал с задающего генератора подаётся на восьмикаскадный широкополосный усилитель. Выходной каскад этого усилителя содержит резонансный колебательный контур, состоящий из ёмкости ускоряющего электрода и контурной линии, заполненной ферритом, индуктивность которого изменяется подмагничивающим током. Этот контур обеспечивает необходимую амплитуду ускоряющего напряжения в диапазоне модуляции частот (0.2 ÷ 1.44) МГц.

Вариант расширения частотного диапазона ускоряющей системы посредством замены феррита с более высокой магнитной проницаемостью требует определённых материальных затрат и времени на реконструкцию, именно поэтому он был отложен на будущее. Были проведены исследования возможности получения необходимого ускоряющего напряжения на расстроенном контуре ускоряющей системы, при существующей конструкции её. Гармонический анализ кривой высокочастотного напряжения на контуре, настроенном на 200 КГц, при подаче на вход широкополосного усилителя сигнала с частотой 150 КГц показал:

(Рис 21)

$$u = U_{0I} [\sin \varphi + 0.415 \sin 2(\varphi - 62^\circ) + 0.075 \sin 3(\varphi - 29^\circ)]$$

где $U_{0I} = 12$ Кв - амплитуда I гармоники,

φ - фаза напряжения на ускоряющем электроде.

Эффективное ускоряющее напряжение при этом: (Рис 21).

$$v = V_{0I} [\cos \varphi + 0.83 \cos 2(\varphi - 62^\circ) + 0.225 \cos 3(\varphi - 29^\circ)]$$

где $V_{0I} = 2.2$ Кв - амплитуда I гармоники эффективного ускоряющего напряжения.

Энергия, приобретаемая частицей за один оборот:

$$e V_0 \cos \varphi_0 = \frac{300 R_0 \Pi}{c} \cdot \dot{V}$$

где c - скорость света, учитывая:

$$\Pi = 208 \text{ м,}$$

$$R_0 = 28 \text{ м}$$

$$\dot{V} = 3560 \text{ гс/сек - скорость нарастания поля}$$

при инжекции, имеем:

$$e V_0 \cos \varphi = 2.07 \text{ кэВ.}$$

Таким образом, если бы в ускоряющем напряжении отсутствовали вторая и третья гармоники, то, при наличии лишь одной первой с амплитудой $V_{0I} = 2.2 \text{ Кв}$, ускорение оказалось бы, практически, невозможным, т.к. при таком напряжении почти исчезает область фазовой устойчивости. Наличие второй (в особенности) и третьей гармоник помимо первой при "удачном" фазовом соотношении между ними приводит к тому, что эффективное ускоряющее напряжение в ~ 1.5 раза превышает величину, при которой исчезает область фазовой устойчивости, что и создаёт условия для ускорения ядер в одноэтапном режиме.

Фазовое движение ускоряемых частиц при существовании трёх гармоник в ускоряющем напряжении описывается первым интегралом фазового уравнения:

$$\frac{\dot{\varphi}}{\omega_0} = \sqrt{\frac{e V_{0I} K F}{E_H} \cdot \frac{1}{A} \left[\sin \varphi + \frac{1}{2} \frac{V_{0II}}{V_{0I}} \sin 2(\varphi + \alpha_2) + \frac{1}{3} \frac{V_{0III}}{V_{0I}} \sin 3(\varphi + \alpha_3) - \frac{\Delta E_0}{e V_{0I}} \varphi + C \right]}$$

где ω_0 - круговая частота ускоряющего напряжения,

E_H - полная энергия, приходящаяся на один нуклон,

ΔE_0 - энергия, приобретаемая равновесной частицей за один оборот,

$$K = 1 + \frac{n}{1-n} \frac{1}{\beta^2}, \quad F = 1 - \frac{L}{(2\pi R_0 + L)[n + \beta^2(1-n)]},$$

R_0 - радиус центральной орбиты ускорителя,

L - суммарная длина прямолинейных промежутков,

n - показатель магнитного поля,

$V_{0I}, V_{0II}, V_{0III}$ - соответственно амплитуды ускоряющего напряжения первой, второй и третьей гармоник,

α_2, α_3 - фазовые сдвиги второй и третьей гармоник относительно первой,

C - постоянная интегрирования,

Область фазовой устойчивости имеет протяжённость $\sim 100^\circ$ и по радиусу перекрывает около половины апертуры (Рис.21).

При узком спектре инжектируемого пучка захват в синхротронный режим может составить не более $\sim 25\%$. При формировании банчей наблюдается, что при захвате в синхротронный режим частицы, оказавшиеся в области фаз $240^\circ \div 360^\circ$, задерживаются в своём фазовом движении на первом периоде фазовых колебаний и попадают за пределы рабочей области гораздо позднее, частиц, занимающих область фаз $120^\circ \div 200^\circ$.

Это подтверждается на практике наблюдением двух пучков на первом периоде синхротронных колебаний. Один из них занимает область фаз устойчивого ускорения ($10^\circ \div 110^\circ$), а другой - область фаз неустойчивого ускорения ($240^\circ \div 360^\circ$) (Рис.22).

Расчёты показали, что только увеличивая амплитуду ускоряющего напряжения не удаётся получить существенного выигрыша в интенсивности, поскольку не удаётся использовать вторую область неустойчивого ускорения. Это связано с тем, что с приближением частоты задающего генератора к резонансной частоте контура вторая область исчезает.

Однако существует и другой путь, и заключается он в том, что, помимо увеличения амплитуды напряжения на ускоряющем электроде, необходимо привести в соответствие и фазы второй (в основном) и третьей гармоник так, чтобы образовалась область фазовой устойчивости с максимальной фазовой протяжённостью.

Проведённые расчёты подтвердили, что при некоторой подобранной форме эффективного ускоряющего напряжения (это определяет и соотношение фаз второй и третьей гармоник) можно получить область устойчивости при захвате в синхротронный режим с протяжённостью фаз $\sim 260^\circ$, что и предопределяет существенный выигрыш в интенсивности.

Внедрение одноэтапного режима ускорения дейтронов и α -частиц сняло многие сложности, которые были присущи настройке и получению двухэтапного режима. Отпала необходимость в "столе" магнитного поля и сравнительно сложной программе амплитуды ускоряющего напряжения.

Вместе с тем, одноэтапный режим ускорения дейтронов и α -частиц оказался простым в настройке, надёжным в работе и практически ничем не отличается от режима ускорения протонов. Переход от ускорения протонов к ускорению дейтронов и α -частиц занимает около 1 часа времени. Одноэтапный режим ускорения дейтронов и α -частиц позволил увеличить интенсивность пучка практически на порядок, повысил надёжность и стабильность работы всего ускорительного комплекса, т.е. увеличил эффективность ускорителя.

10. Расчётное распределение ускоряющего электрического поля в синхрофазотроне.

Погрешности распределения ускоряющего высокочастотного поля ускорителя могут привести к дополнительным потерям частиц в процессе ускорения. С целью выяснения причин повышенных потерь в синхрофазотроне ОИЯИ указанный вопрос был рассмотрен применительно к данному ускорителю. Ускоряющая система синхрофазотрона

представляет собой дрейфовую трубку длиной 610 см, расположенную в прямолинейном промежутке, между третьим и четвёртым квадрантами ускорителя, вне его магнитного поля. У концов дрейфовой трубки расположены заземлённые рамки, соединённые с вакуумной камерой ускорителя (Рис.23). Изменение конфигурации рамок приводит к изменению распределения компонент ускоряющего электрического поля E_x , E_y , E_z , в частности это влияет на величину поперечных компонент E_y , E_z , которые могут вызвать увеличение размеров ускоряемого пучка. Здесь координата X направлена по движению пучка, Z - в вертикальном направлении, Y - в радиальном. Точка $X = 0$, соответствует центру ускоряющего зазора, $Z = 0$, $Y = 0$ - центру камеры в вертикальном и радиальном направлении, соответственно.

В настоящей работе описывается методика численного расчёта компонент поля E_x , E_y , E_z и предлагаются результаты расчёта для двух конфигураций рамок. Данная методика позволяет также оценить влияние неточности установки дрейфовой трубки на конфигурацию ускоряющего поля. Расчёты выполнены путём численного интегрирования уравнения Лапласа:

$$\Delta U = 0,$$

$$\text{где } E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

В случае, когда заземлённые рамки имеют поперечный размер, равный поперечному размеру дрейфовой трубки и продольный - 50см,

$$E_y \approx 10^{-6} E_x, \quad E_z \Big|_{z=4\text{см}} \approx 0.23 E_x,$$

здесь величина компоненты E_x взята в точке $Z = 0$, $Y = 0$, где она имеет максимальное значение. Нужно отметить, что действие компоненты E_z на частицу компенсируется, т.к. E_z имеет противоположные знаки по разным сторонам от центра зазора. Для

данной конфигурации E_x не зависит от радиальной координаты в пределах апертуры дрейфовой трубки и увеличивается на $\sim 10\%$ при изменении вертикальной от 0 до 6 см. (Рис.24).

Для конфигурации ускоряющей системы (и рамки), приведённой на Рис.23, компоненты поля находятся в следующем соотношении:

$$E_y \approx 6 \cdot 10^{-3} E_x, \quad E_z \approx 0.23 E_x.$$

(Рис.24, кривая 2)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, Б1-9-8460
- 2.А.Н.Комаровский. "Строительные конструкции ускорителей".
Высшая школа, Москва, 1961 г.
- 3.Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, Б2-9-7208.
- 4.В.И.Волков и др. ОИЯИ, Б2-9-8513.
- 5.В.А.Баталин и В.И.Могучев. "Прибор для измерения фазовой
плотности тока импульсного пучка протонов".
Препринт ИТЭФ, 331, Москва, 1965г.
- 6.В.А.Баталин и др. "Измерение эмитанса пучка на выходе
линейного ускорителя И-2,"
Препринт ИТЭФ, 29, Москва, 1973 г.
- 7.Г.С.Казанский, А.И.Михайлов. ОИЯИ, 2795, Дубна, 1966 г.
- 8.Г.С.Казанский и др. ОИЯИ, 9-5821, Дубна, 1971 г.
- 9.А.Л.Минц и др, "Радиотехника и электроника"
т.1, вып.7, 928, 1956 г.

Таблица I

Усреднённое положение магнитной плоскости по квадрантам
электромагнита ускорителя.

	+ 63	+ 30	R_0	- 30	- 63	(см)
I кв. 1959 г.	18.3	-	17.5	-	21.8	(мм)
1974 г.	14.3	19.5	21.9	20.7	23.8	
")	15.9	19.5	21.9	21.5	23.8	
II кв. 1959 г.	18.2	-	22.0	-	26.4	
1974 г.	34.4	32.7	33.0	36.9	39.8	
")	34.4	33.7	33.0	36.9	39.8	
III кв. 1959 г.	6.5	-	7.4	-	13.2	
1974 г.	-6.0	3.5	9.2	13.0	17.0	
")	+9.7	9.6	9.4	10.1	13.6	
IV кв. 1959 г.	13.7	-	13.3	-	20.6	
1974 г.	14.6	16.0	15.0	16.8	23.6	
")	14.6	16.0	15.0	16.8	21.0	

") - данные измерений 1974 года без учёта
сильных локальных искажений.

Таблица 2

Величины амплитуд первой гармоники искажения магнитной плоскости - A_I и орбиты пучка в вертикальной плоскости - A_I орб.

		+ 63	+ 30	R_0	- 30	- 63	(см)
1959 г.	A_I	5.7	-	5.9	-	4.7	(мм)
	A_I орб	30.0	-	31.0	-	25.0	
	П	13.0	-	23.0	-	20.0	
1974 г.	A_I	12.3	10.4	9.9	9.7	7.9	
	A_I орб	65.0	55.0	52.0	51.0	42.0	
	П	13.0	19.0	23.0	26.0	28.0	
"	A_I	8.7	9.1	9.9	10.4	9.6	
	A_I орб	46.0	48.0	52.0	55.0	51.0	
"	A_I орб	39.0	-	26.0	-	32.0	
	A_I	7.3	-	5.0	-	6.0	

" - данные измерений 1974 года без учёта сильных локальных искажений.

" - данные получены с учётом искажения магнитной плоскости во втором квадранте в 1974 году (относительно измерений 1959 года).

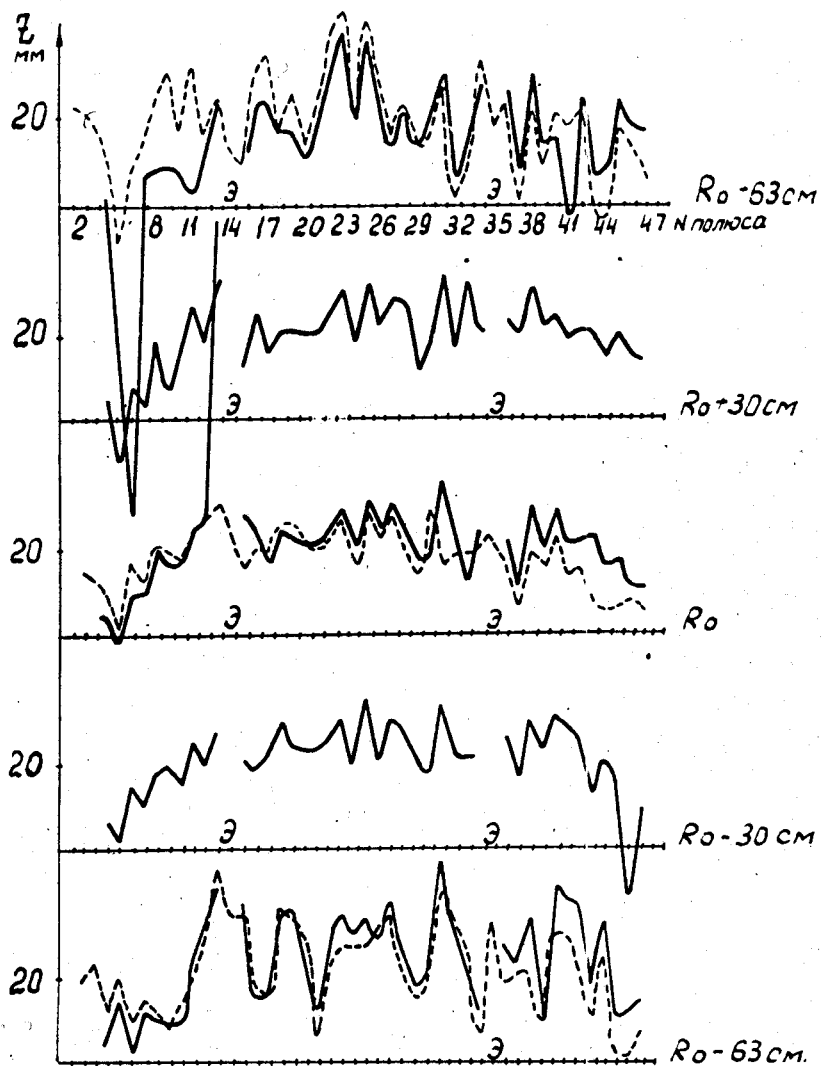


Рис. I. Медианная магнитная плоскость
 в I квадранте ускорителя.
 (--- измерения 1959 года).

Примечание: а) нумерация полюсов ЭМ по пучку,
 б) "э" - область сигнальных электродов.

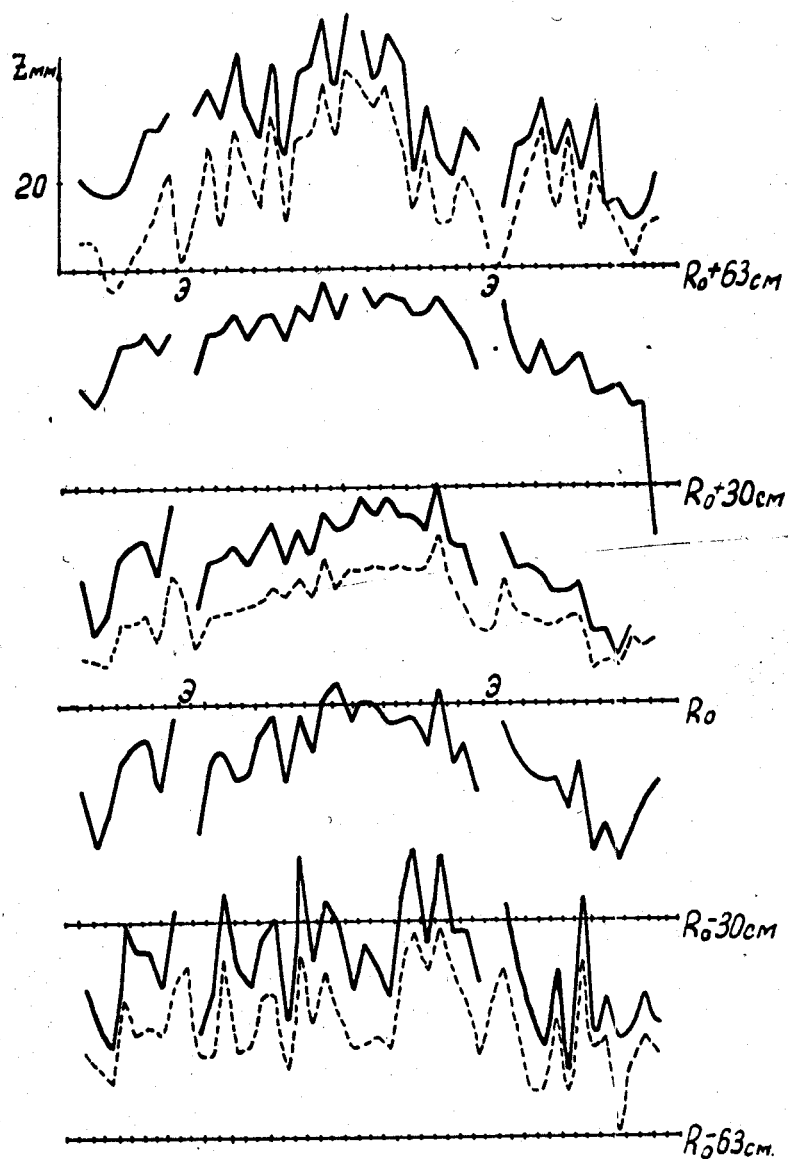


Рис. 2. Медианная магнитная плоскость
во II квадранте ускорителя.

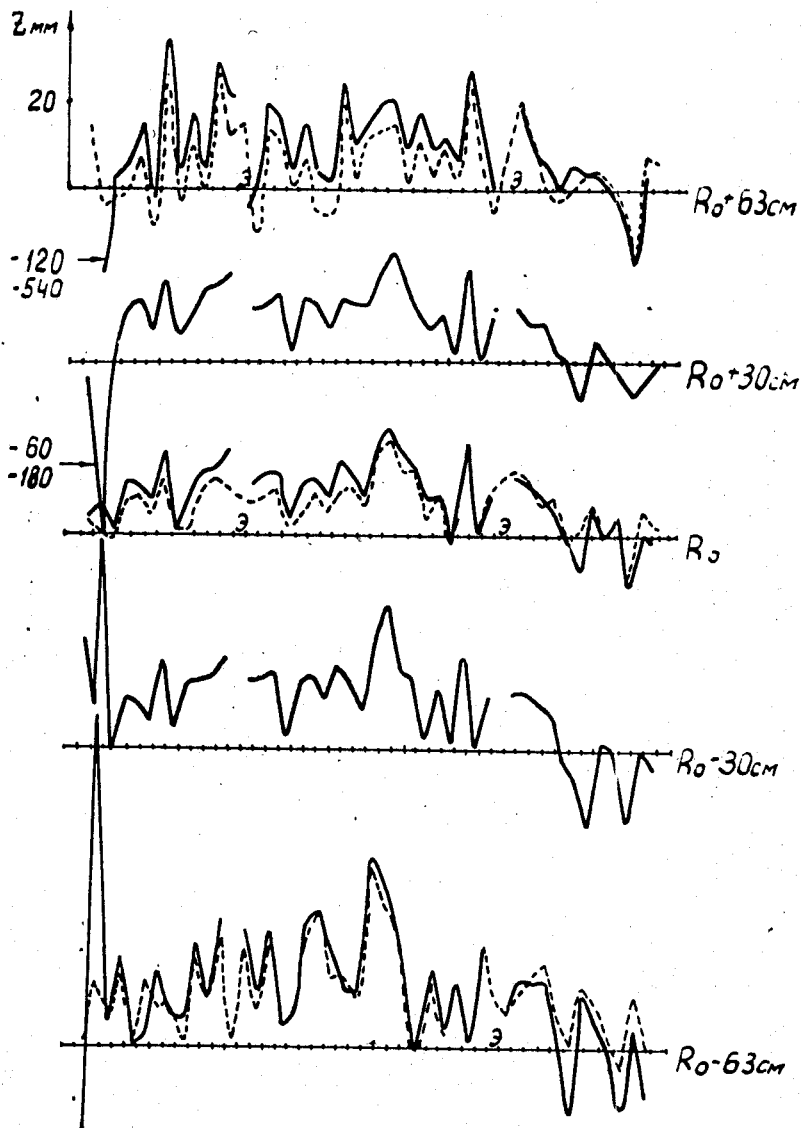


Рис. 3. Медианная магнитная плоскость
в III квадранте ускорителя.

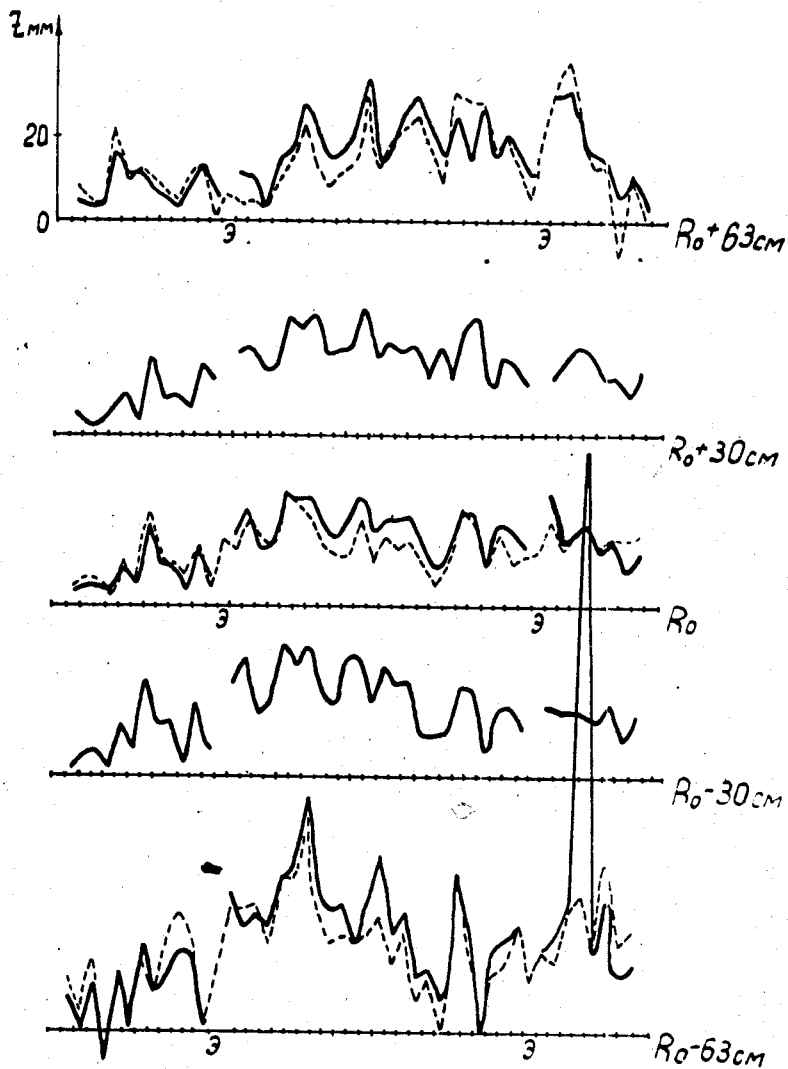


Рис. 4. Медианная магнитная плоскость
в IV квадранте ускорителя.

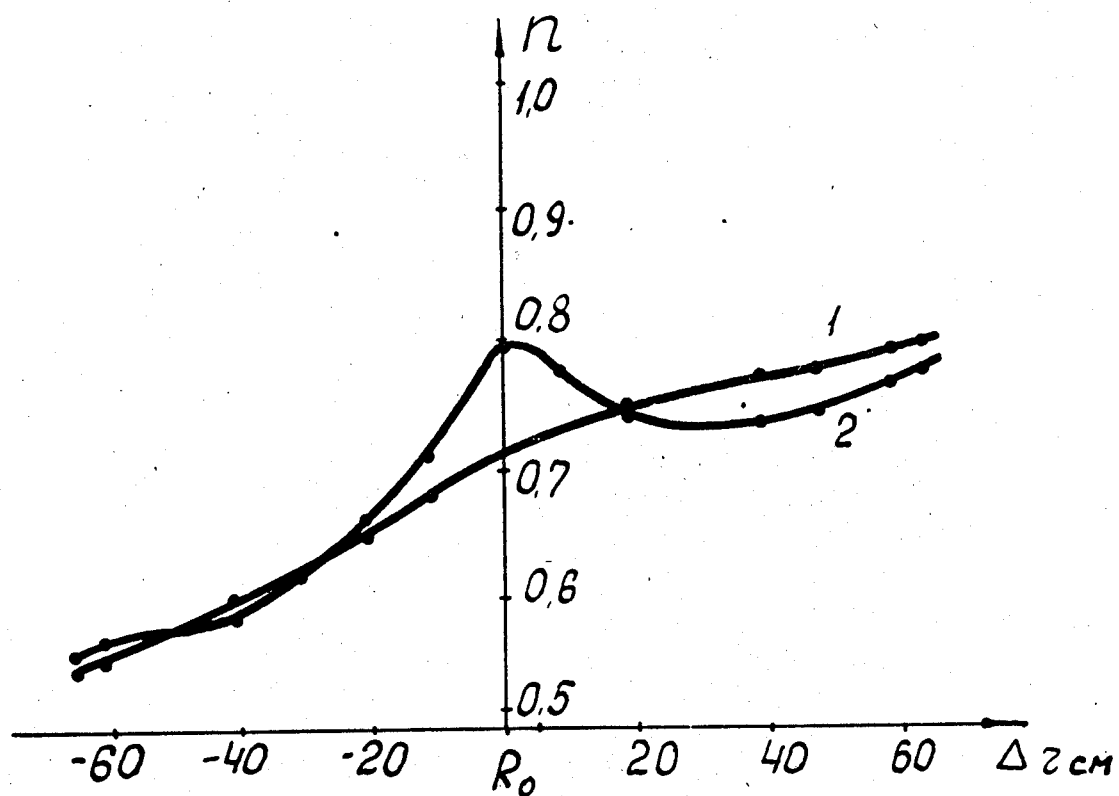


Рис. 5. Показатель магнитного поля "n",

полюс 26, квадрант IV.

1 - "n" при скорости роста магнитного поля \dot{B} .

2 - "n" при скорости роста магнитного поля $4\dot{B}$,

где $\dot{B} = 4000$ гс/сек.

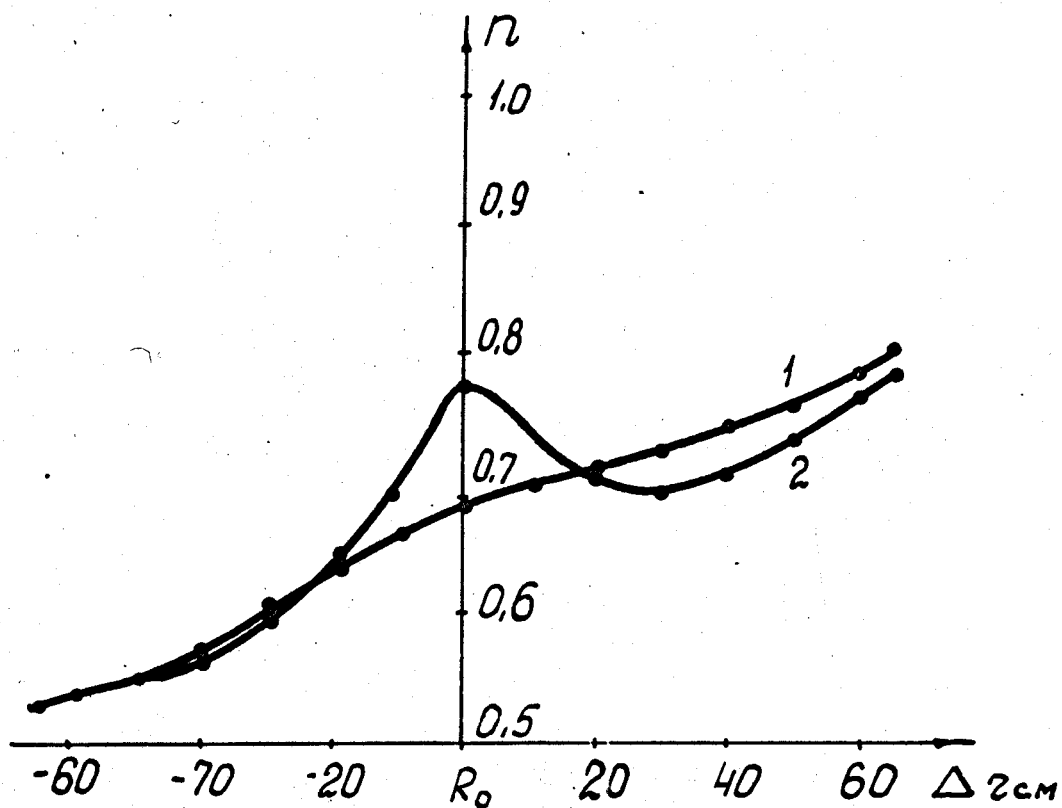


Рис.6. Показатель магнитного поля "n",
 полюс 33, квадрант IV.

I, 2 - то же, что на Рис.5.

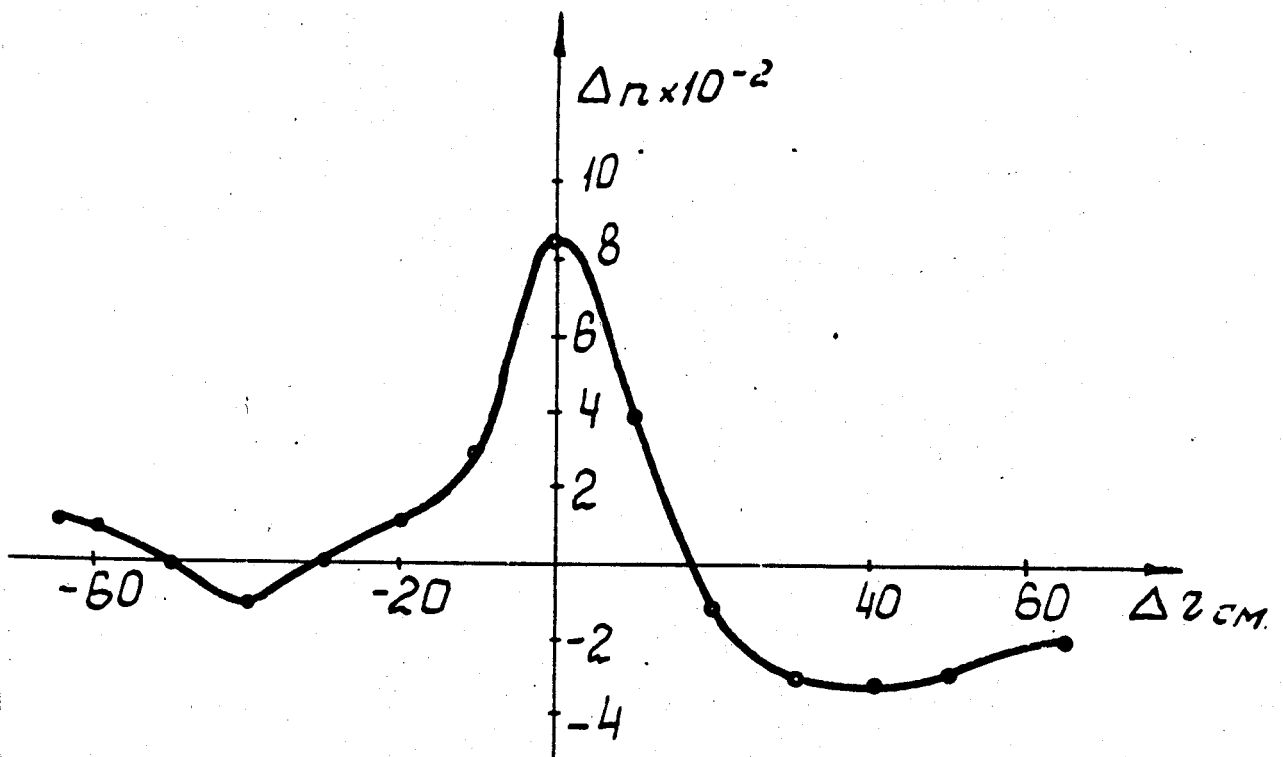


Рис.7. Вклад в искажение показателя магнитного поля "n" при увеличении скорости роста магнитного поля до $4 \times \dot{B}$. Полус 26.

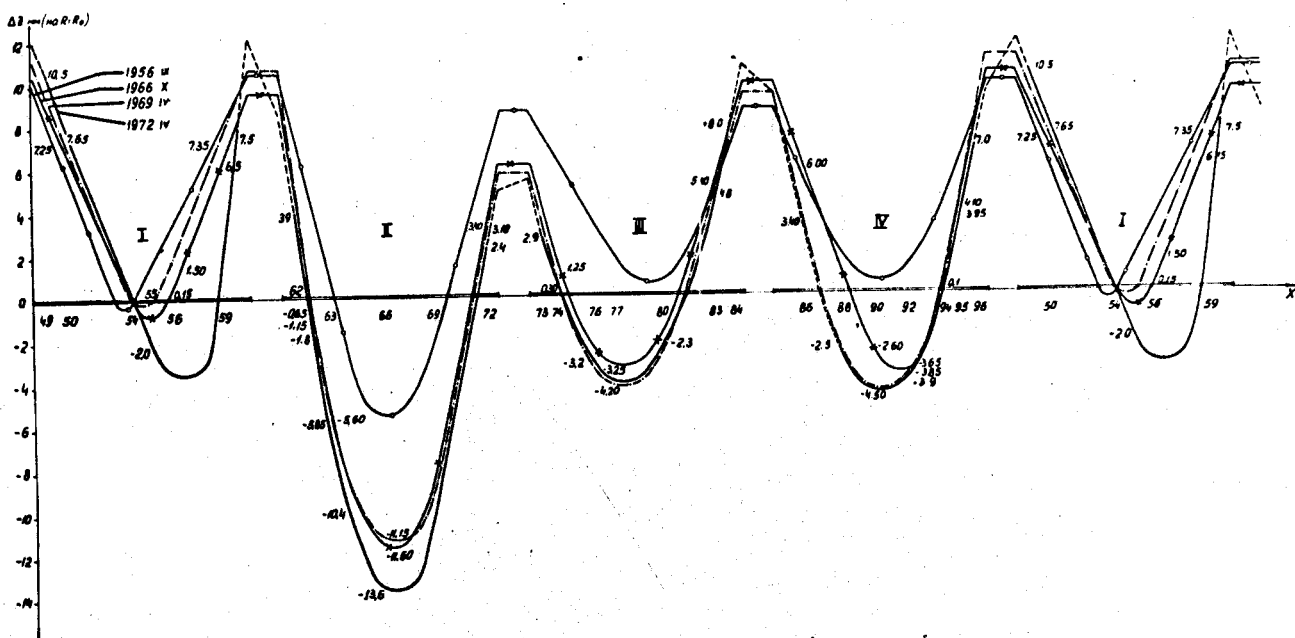


Рис.9. Геометрия нижних полюсов ЭМ синхрофазотрона

на равновесном радиусе по данным нивелирования

1956 ÷ 1972 гг.

Примечание: построение выполнено относительно нижнего полюса
окна 54.

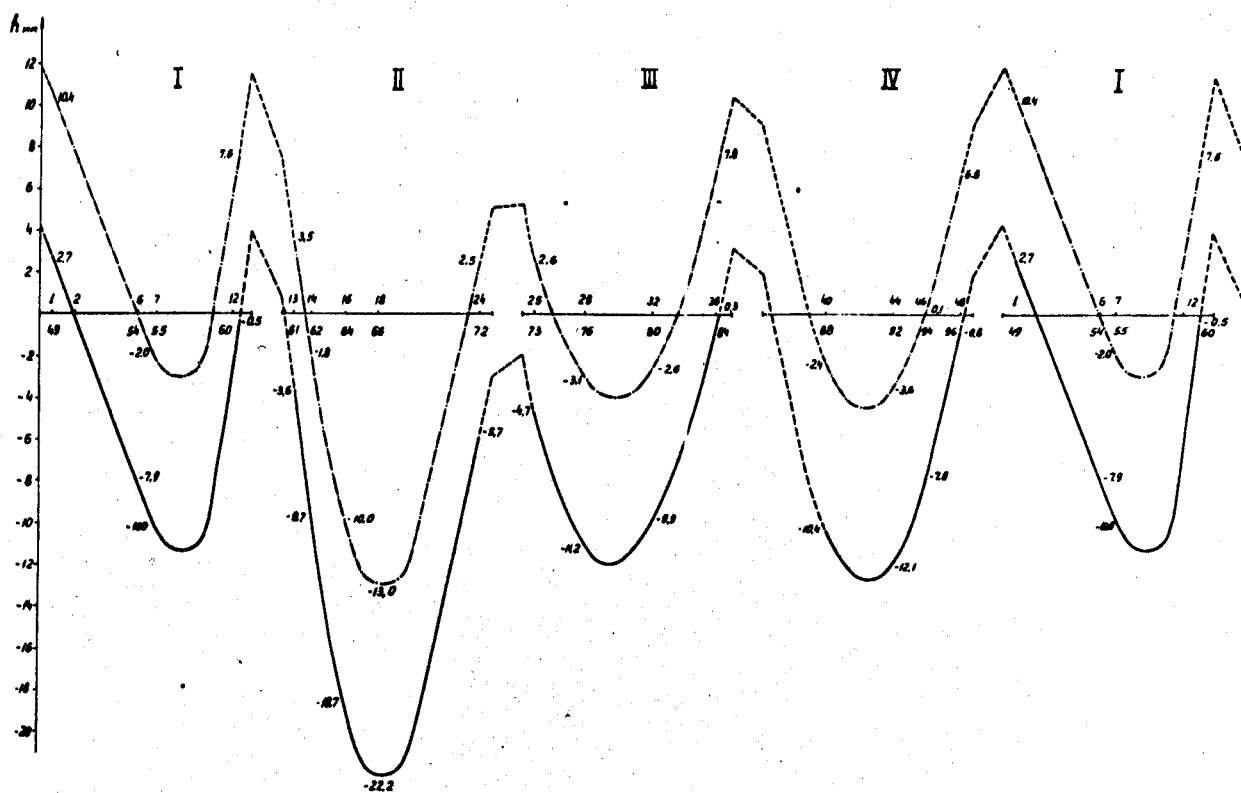


Рис. 10. Геометрия нижних полюсов ЭМ синхрофазотрона на радиусах $R_0 \pm 80$ см по данным нивелирования Апрель 1972 г.

Примечание: построение выполнено относительно нижнего полюса окна 54.

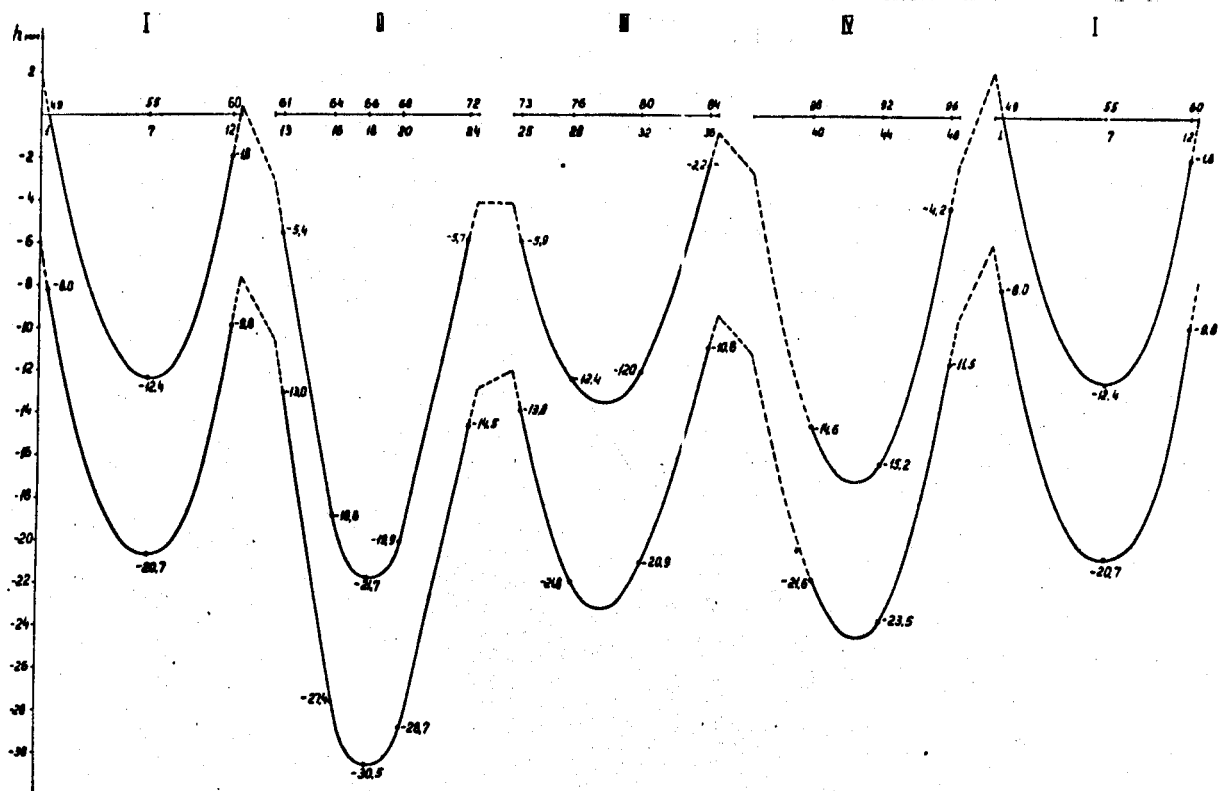


Рис. II. Геометрия нижних полюсов ЭМ синхрофазотрона
на радиусах $R_0 \pm 80$ см по данным нивелирования
Октябрь 1972 г.

Примечание: построение выполнено относительно нижнего,
полюса окна 49.

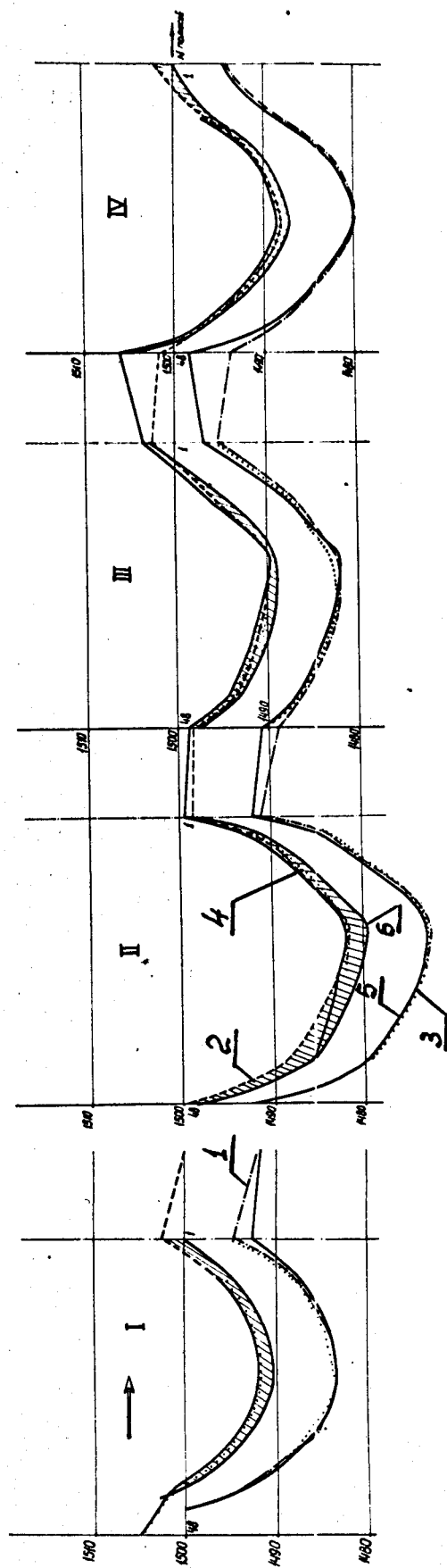


Рис. 13. График деформаций электромагнита синхрофазотрона

в циклах измерений 1974 года.

1, 2 - апрель - май; 3, 4 - июнь; 5, 6 - сентябрь. 1, 3, 5 - деформации ЭМ на радиусе $R_0 + 800\text{мм}$
 2, 4, 6 - на радиусе $R_0 - 800\text{мм}$. Штриховкой показан перекосяк медианной плоскости.

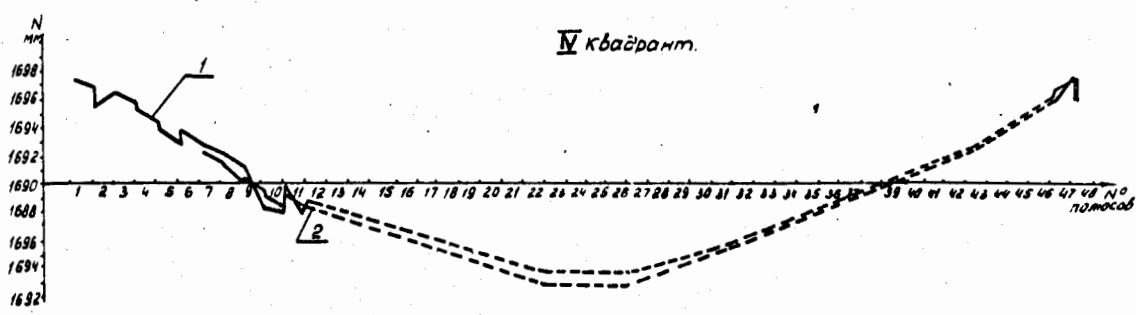
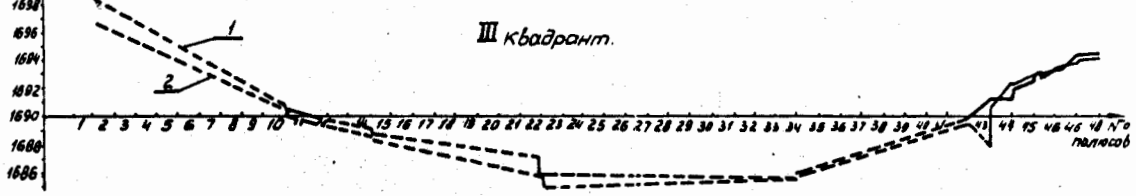
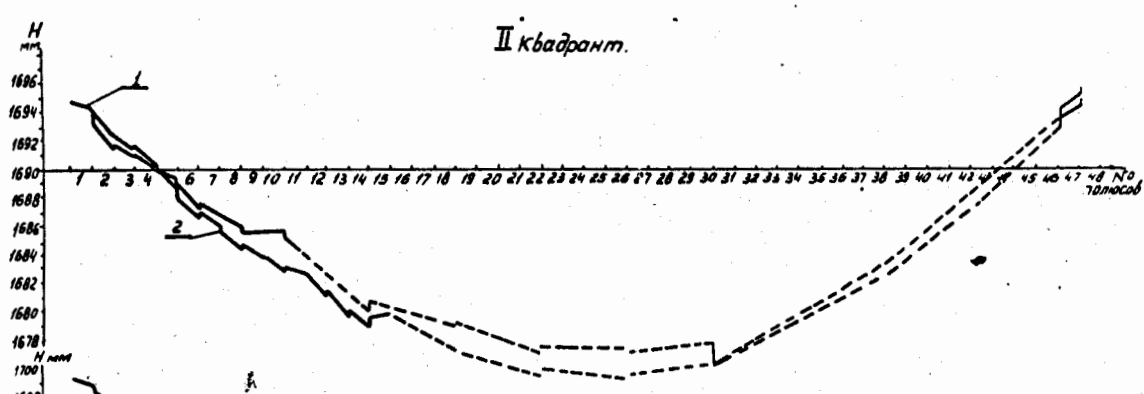


Рис. 14. Деформации медианной глоскости на наружном и внутреннем радиусах: 1 - $R_0 - 800\text{мм}$, 2 - $R_0 + 800\text{мм}$.

I - 48 - номера полюсов электромагнита по монтажной схеме (против хода пучка).

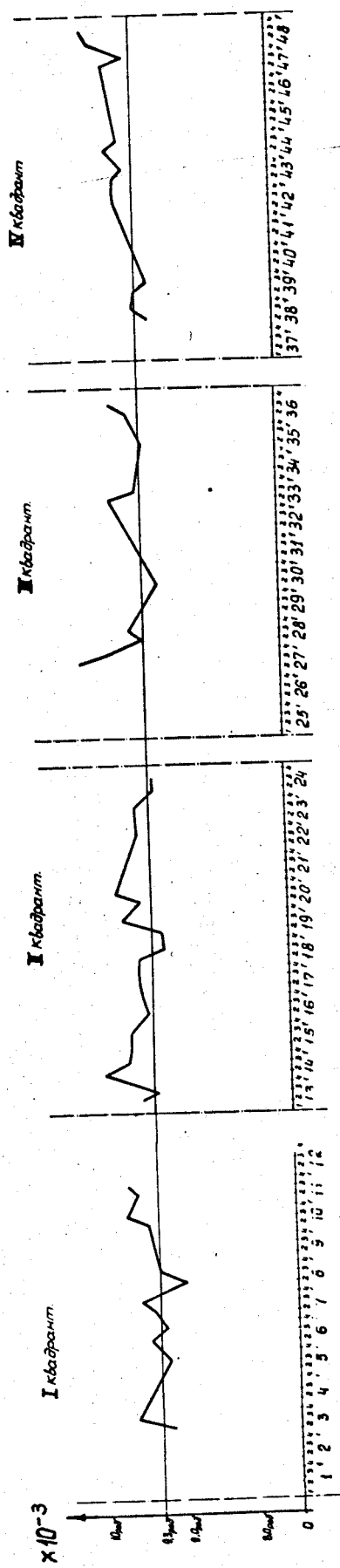


Рис. 15. График отклонений величин углов между полюсами
электромагнита от теоретического.

I - 48 - номера окон по ходу пучка, через которые проводились замеры.
I - 4 - точки измерений на полюсе (1, 2 - внутренний радиус, 3, 4 - наружный).

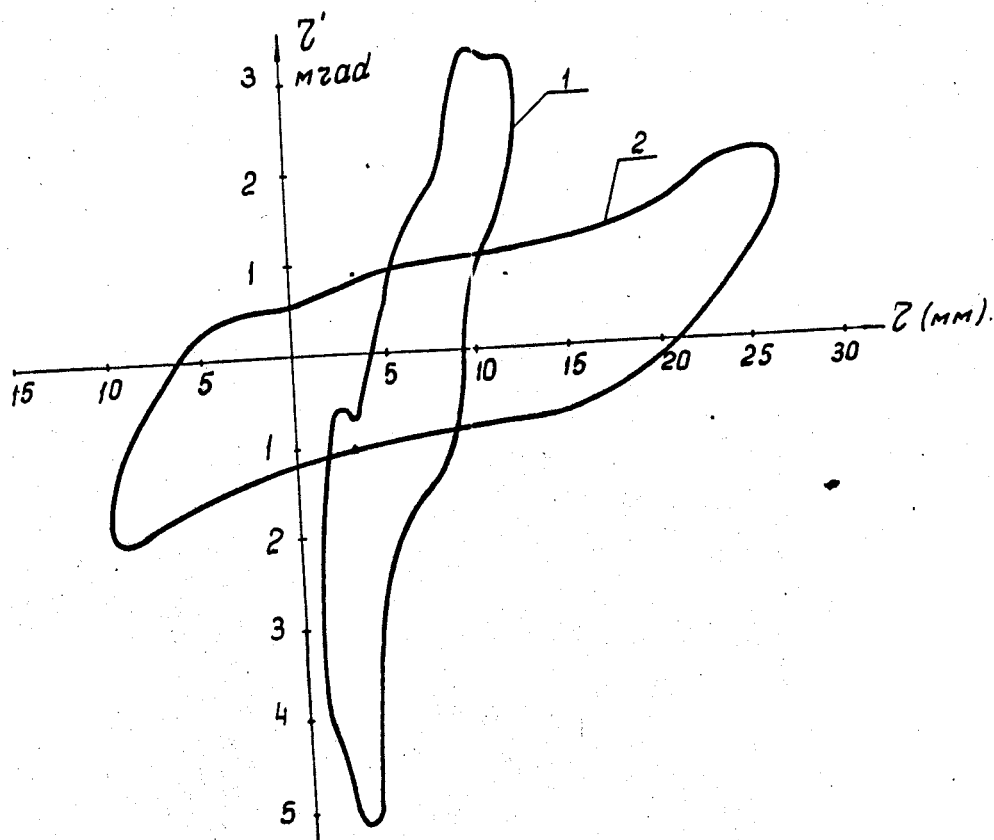


Рис.16. Эмитанс пучка в горизонтальных осях координат:
 1 - на выходе резонатора ЛУ-20,
 2 - на выходе инфлекторных пластин.

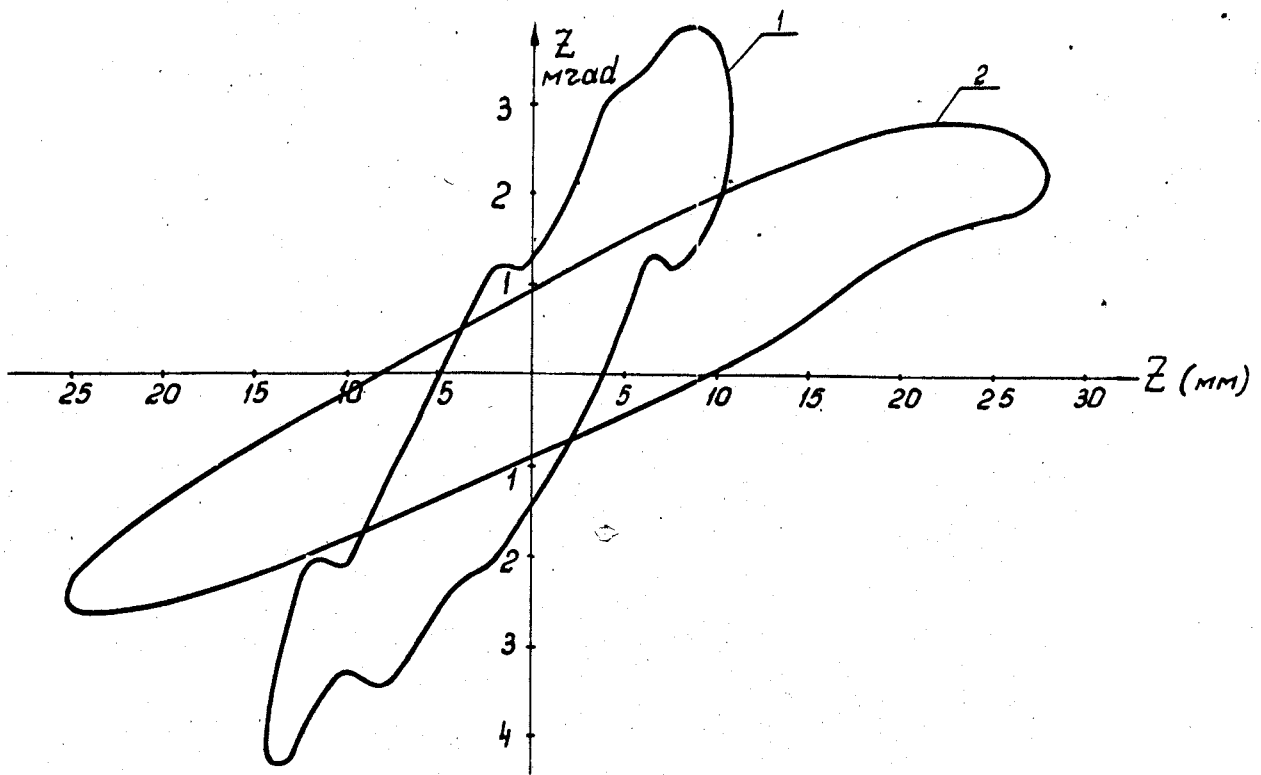
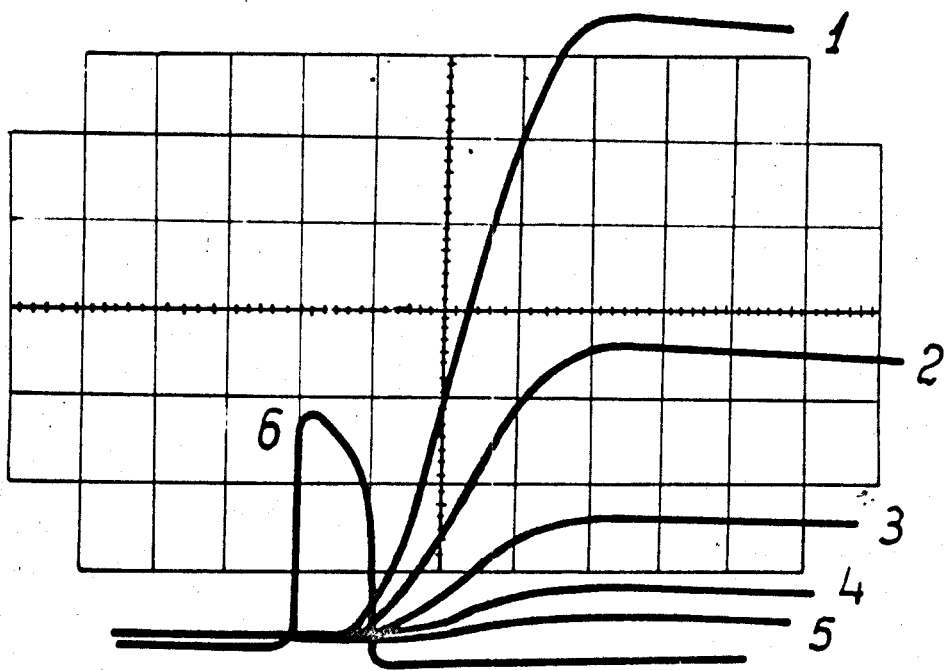


Рис.17. Эмитанс пучка в вертикальных осях координат:

1 - на выходе резонатора ЛУ-20,

2 - на выходе инфлекторных пластин.



Масштаб:

по горизонтали - 1 кл. = 250 мксек

по вертикали - 1 кл. = 1.0×10^{12} протонов.

Рис. 18. Заряд циркулирующего пучка в квазибетатронном режиме.

1 - $N_{\beta} = 7.5 \times 10^{12}$ прот/имп. без кварцевых мишеней;

6 - импульс тока, инжектируемый в кольцо;

2 - $N_{\beta} = 3.5 \times 10^{12}$ прот/имп. - введена одна кварцевая мишень;

3 - $N_{\beta} = 1.5 \times 10^{12}$ прот/имп. - введены две мишени;

4 - $N_{\beta} = 0.7 \times 10^{12}$ прот/имп. - введены три мишени;

5 - $N_{\beta} = 0.3 \times 10^{12}$ прот/имп. - введены четыре мишени.

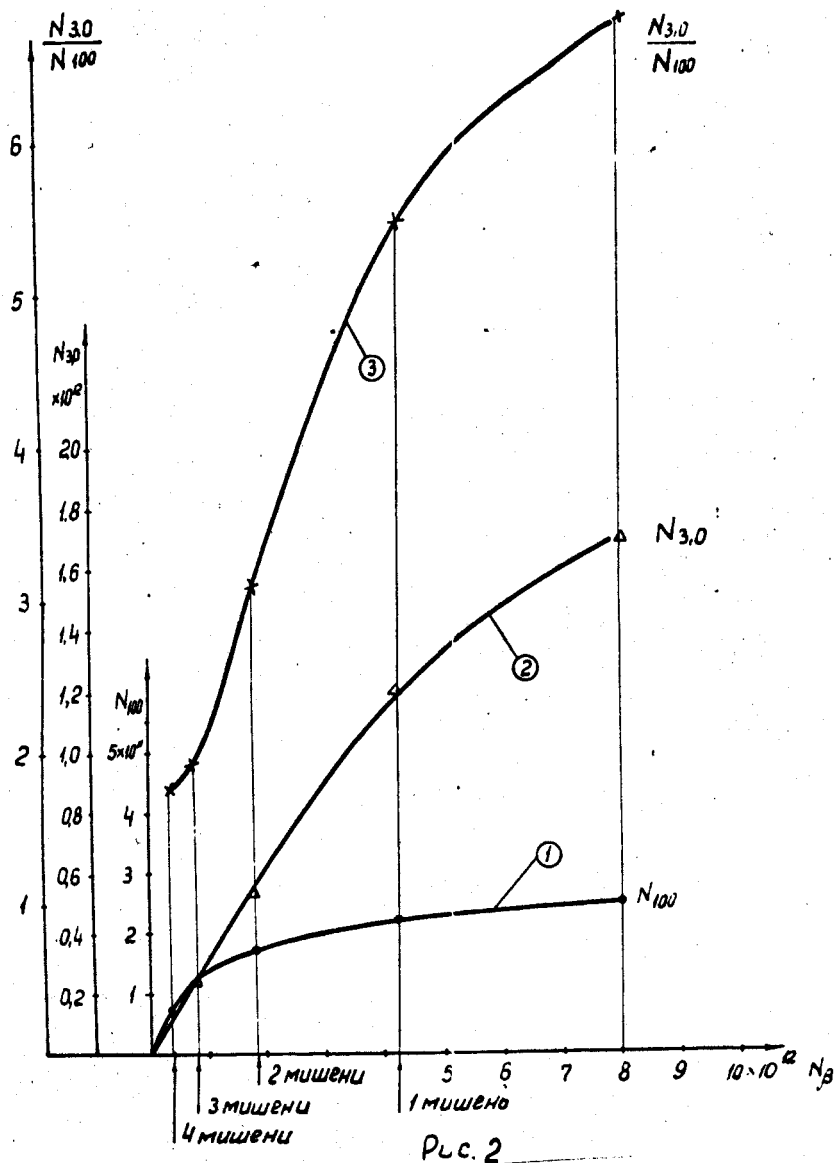


Рис. 19. Включена система коррекции "n" РЗМИ-1.

- 1 - интенсивность пучка протонов в конце 100 мсек ускорения,
- 2 - интенсивность пучка протонов, захваченного в синхротронный режим,
- 3 - темп потерь, -
- в зависимости от числа частиц в квазибетатронном режиме.

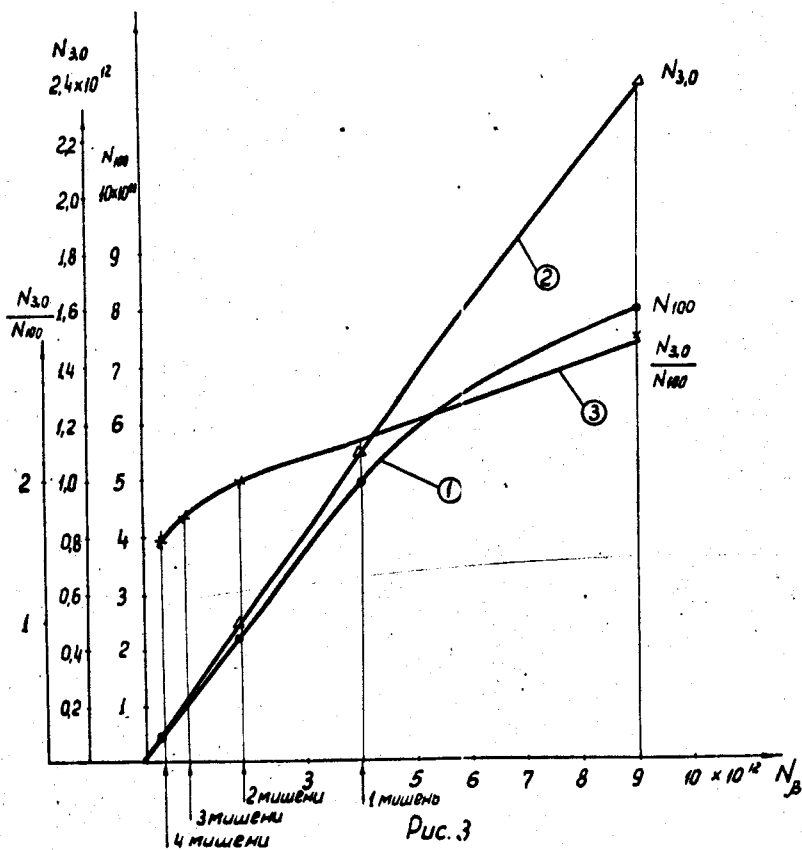


Рис. 20. Включены системы коррекции "n" РЗМИ-1 + РЗМИ-2.

- 1 - интенсивность пучка протонов в конце 100 мсек ускорения,
- 2 - интенсивность пучка протонов, захваченного в синхротронный режим,
- 3 - темп потерь -
- в зависимости от числа частиц в квазибетатронном режиме.

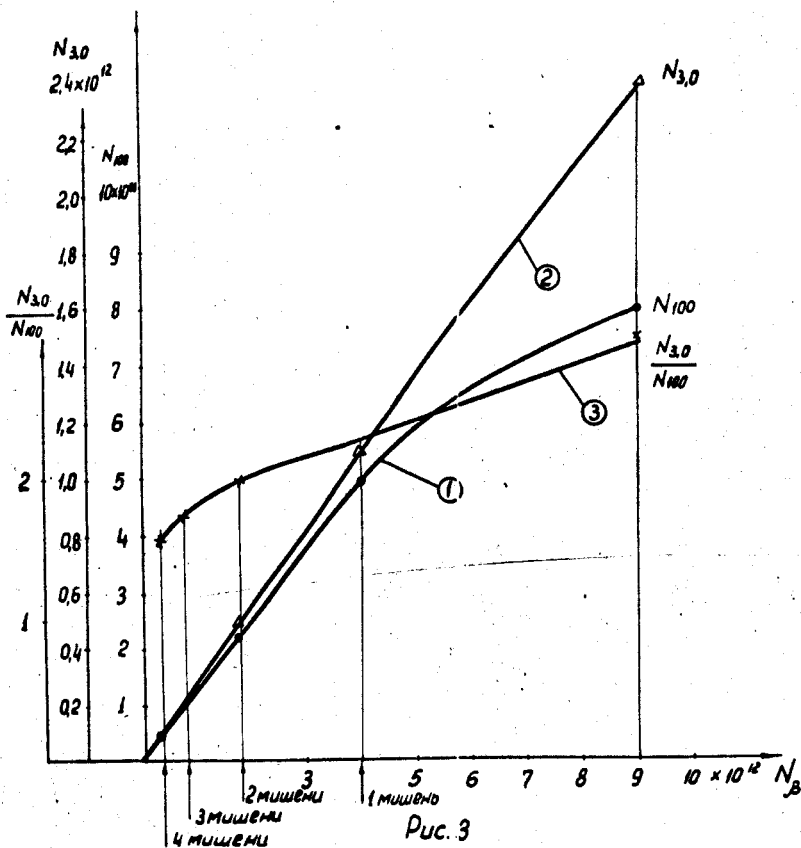


Рис. 20. Включены системы коррекции "н" РЗМИ-1 + РЗМИ-2.

- 1 - интенсивность пучка протонов в конце 100 мсек. ускорения,
- 2 - интенсивность пучка протонов, захваченного в синхротронный режим,
- 3 - темп потерь -
- в зависимости от числа частиц в квазибетатронном режиме.

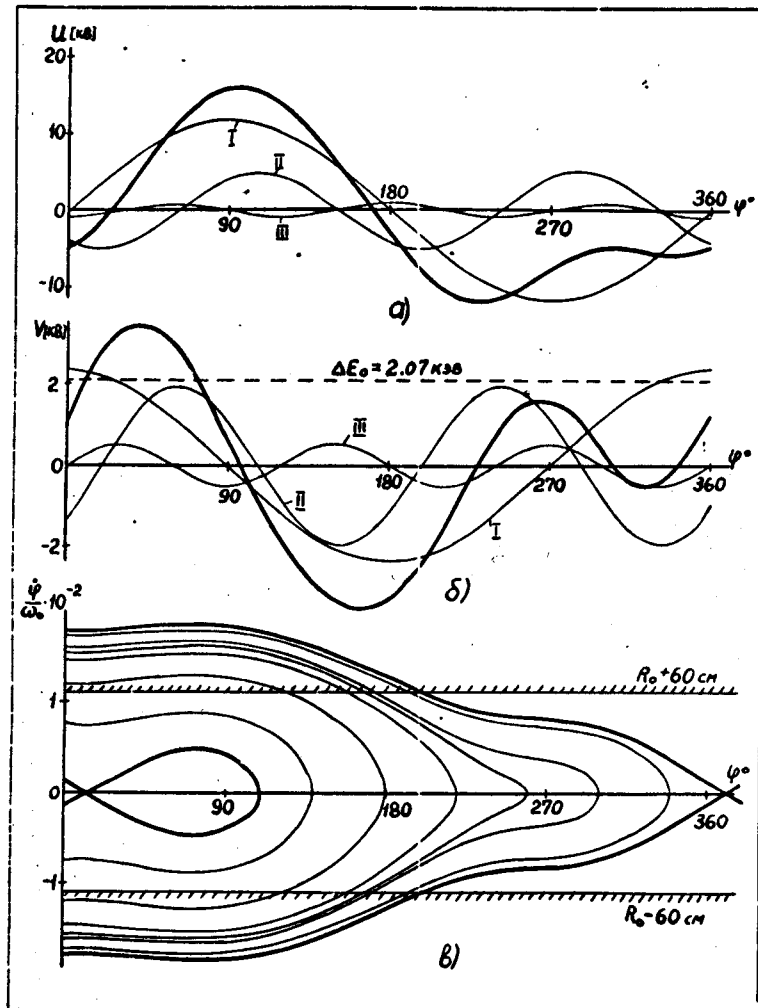


Рис. 21. а) Ускоряющее напряжение на расстроенном контуре и его гармоники.

б) Эффективное ускоряющее напряжение и его гармоники.

в) Фазовая диаграмма.

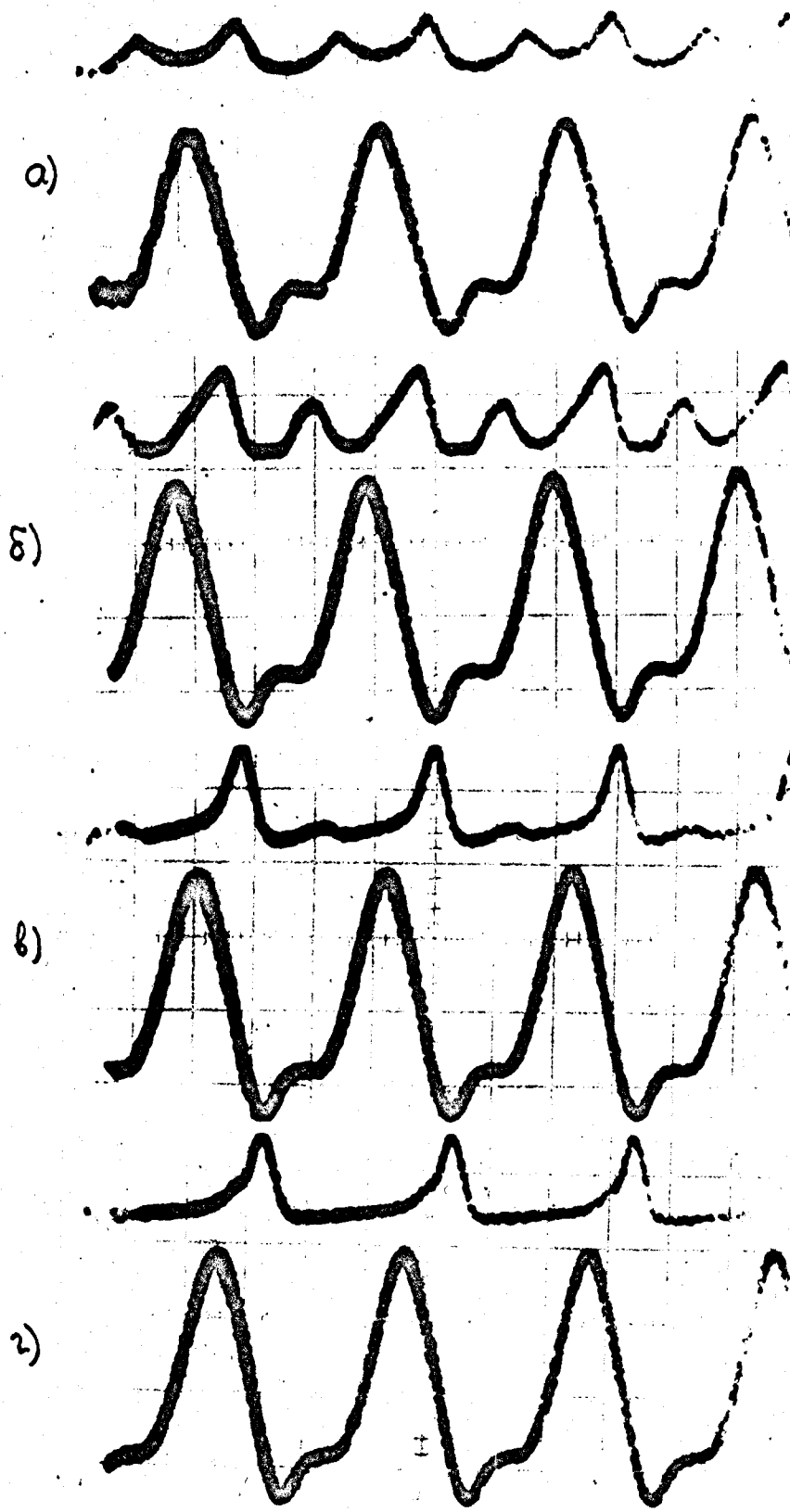


Рис. 22. Информация с сигнальных электродов и форма напряжения на ускоряющем электроде на протяжении формирования области устойчивости:

- а) ускорение 100 мксек, б) ускорение 400 мксек,
 в) ускорение 750 мксек, г) ускорение 1.2 мсек.

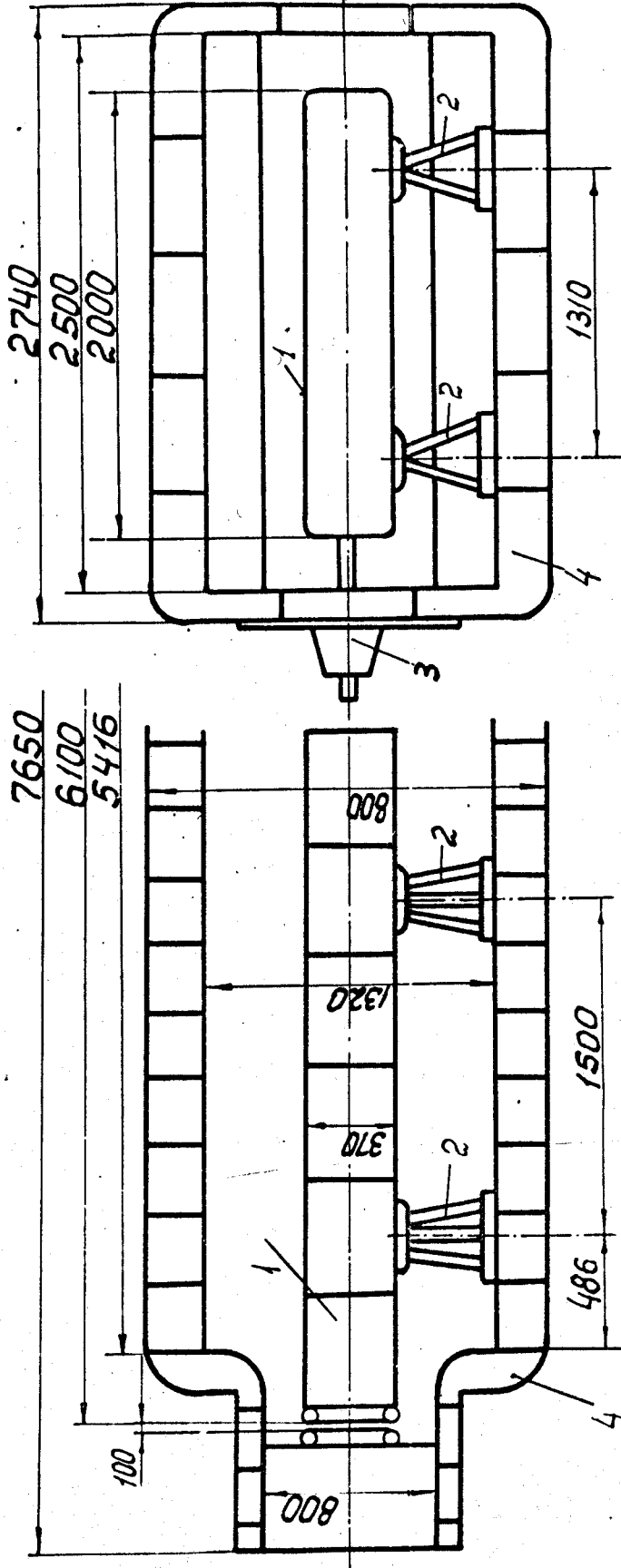


Рис. 23. Ускоряющий электрод синхрофазотрона.

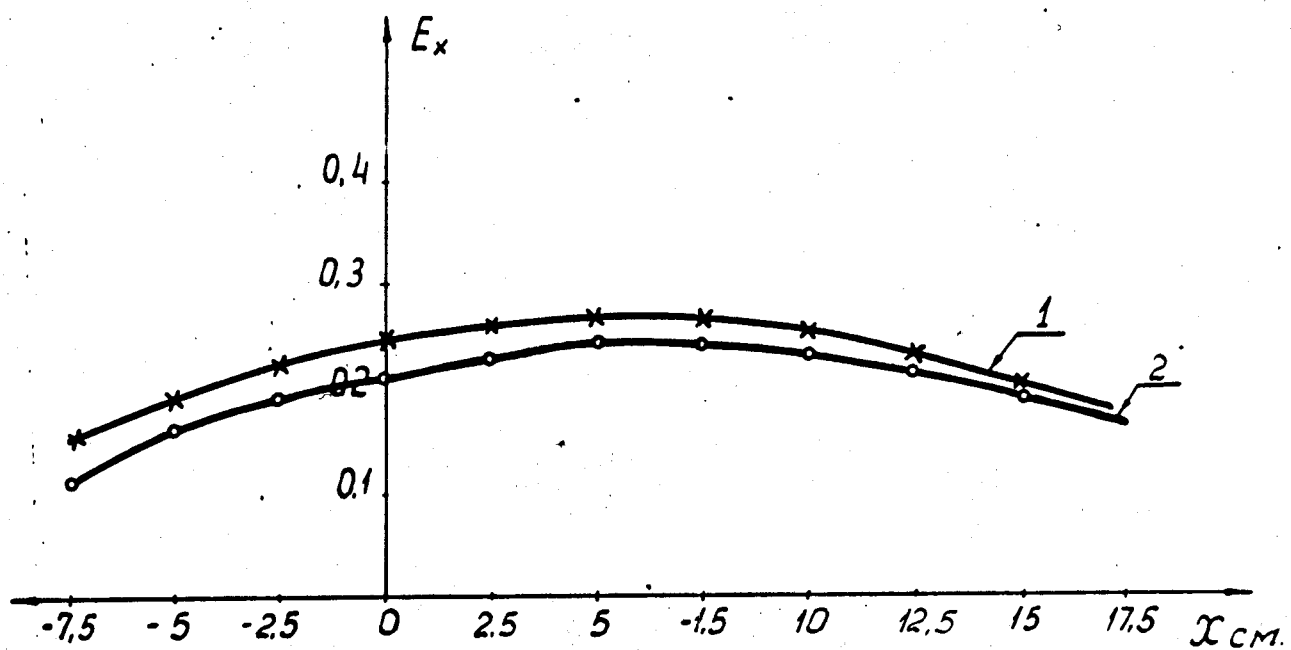


Рис. 24. Распределение продольной составляющей ускоряющего электрического поля в зазоре ускоряющего электрода.

1 - в случае заземлённой рамки с размером по пучку 50 см,
 2 - для существующей конструкции заземлённой рамки.