

СЗ45еЗ

В-19

Василишин Б.В.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-9-4693

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

г. Дубна 19 69г

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Лаборатория высоких энергий

Б. В. Василишин, Л. П. Зинovieв, И. Б. Исенинский,  
Е. М. Кулакова, Н. И. Павлов.

Б2-9-4693

Расчет СХЕМА МЕЛЕННОГО ВЯВОЛА ПУЧКА  
ИЗ СИHXPOFA3OTPOHA ( OЛHO-  
МАГНИТНОГО ВАРИАНТ).

с.ф. 2602

5 сентября 69

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

г. Дубна, 1969 г.

## I. ВВЕДЕНИЕ

При быстром (порядка ста оборотов) выводе протонов из синхрофазотрона ОИЯИ применяется радиальный резонанс бетатронных колебаний  $\nu_R = 1/2$  [1]. В работах [2,3] предложена схема медленного вывода (от нескольких десятков до сотен миллисекунд), основанная на данном резонансе. В этом случае при выводе должна быть выполнена следующая последовательность операций:

1) смещение ускоренного пучка во внутреннюю часть вакуумной камеры ускорителя на радиус  $R_H$ ; 2) создание резонансных условий в наружной части камеры (рис. 1, 1) путем изменения показателя поля  $n(R)$  в двух квадрантах на величину  $\Delta n(R)$ ; 3) выключение ускоряющей частоты в начале "стола тока" в системе питания основного магнита (при этом происходит дебанчировка ускоренного пучка  $X$ ); 4) введение в рабочую область камеры и включение септум-магнита (рис. 1, 2); 5) медленное смещение пучка в резонансную область соответствующим наклоном "стола тока" и заброс пучка в зазор септум-магнита, после отклонения в котором пучок выходит из камеры ускорителя.

---

х) Возможно также управление пучком с помощью в.ч., но это менее желательно, поскольку выведенный пучок будет иметь высокочастотную структуру и дополнительный энергетический разброс.

Длительность вывода определяется величиной наклона стола тока  $(\frac{dB_z}{dt} = \dot{B})$ , т.е. скоростью смещения пучка в резонансной области и начальным радиальным размером пучка. Для частиц с разными начальными амплитудами свободных колебаний резонанс будет наступать в разное время, так как в нашем случае изменение  $n$  в направлении радиуса в I и II квадрантах имеет нелинейный характер (рис. 2, кривая 3).

В настоящей работе рассмотрена динамика процесса медленного вывода для двух положений проводников резонансного возбуждения и при расположении края септум-магнита на  $R_0 + 20$  см и  $R_0 + 30$  см на азимуте  $\varphi_s = \pi$ . Рассчитана трасса медленного вывода с выходом из ускорителя в конце III квадранта, как и при существующем быстром выводе [1].

Основные особенности поведения пучка при медленном выводе и характеристики элементов системы вывода получены при расчёте траекторий протонов на ЭИИ. При этом учитывалась картина магнитного поля, полученная в результате измерений показателя поля  $n(r)$ .

## 2. Постановка задачи и метод расчёта движения протонов в условиях резонанса.

Метод моделирования медленного резонансного вывода протонов на ЭИИ по описанной выше схеме приведен в работе [4]. Результаты настоящей работы получены на ЭИИ БЭИИ-6, программа для которой лишь в деталях отличается от предшущей.

### Основные особенности метода расчёта.

1) Интегрируется полное уравнение движения заряженной частицы в магнитном поле квадрантов в полярной системе координат  $(R, \varphi)$  (рис. 1).

2) Магнитное поле во всех 4-х квадрантах принято азимутально однородным. По радиусу поле описывается как функция  $n(R)$  в III и IV квадрантах и как функция  $n(R) + \Delta n(R)$  в I и II квадрантах. Поле, создаваемое проводниками резонансного возбуждения, от времени не зависит, основное поле во всем ускорителе является функцией времени, в нашем случае - номера оборота. Изменение поля во времени определялось величиной  $\gamma = \frac{dB_z}{dt} \cdot \frac{T}{B_{z0}}$ .

- безразмерной скоростью изменения поля за оборот. Здесь  $T$  - период оборота в конце цикла ускорения,  $B_{z0}$  - вертикальная составляющая магнитного поля на центральном радиусе  $R_0$ . Расчёт каждой траектории начинался с азимута  $\varphi = 0$ , соответствующего входу в I квадрант. Для каждой амплитуды свободных колебаний  $a$  для расчётов выбирался набор начальных условий с определённым шагом по фазе свободных колебаний. Расчёт траектории заканчивался после того, как отклонение протона достигало  $R_0 + \rho > R_2$  на азимуте  $\pi$ . При выборе начальных условий учитывалось распределение частиц в конце ускорения по амплитудам свободных радиальных колебаний. Условно протоны были разделены на 3 группы: с малыми амплитудами ( $a = 0+2$  см), со средними амплитудами (2+4 см) и большими (4,5+7 см). Каждая группа имела в соответствии с распределением свой статистический вес: большие - 0,12; средние - 0,41 и малые - 0,47.

Как указывалось в работе [А], была применена методика расчёта медленного вывода с двумя скоростями смещения равновесной орбиты  $\delta_1, \delta_2$ . Скорость  $\delta_1$  вводилась в начале смещения орбиты когда траектория еще не входила в возмущенную область

и поэтому могла быть взята достаточно большой. При подходе траектории частицы к резонансной области скорость смещения снижалась до  $\delta_2$  - величины, позволяющей, рассматривать достаточно медленный процесс развития резонанса. Это позволило существенно сократить время счёта. Как показали расчёты, характеристики пучка на входе в септум-магнит при длительности вывода от 0,7 до 14 мсек не зависят от  $\delta_1$  и слабо меняются от значения  $\delta_2$ .

Условно выбранная скорость  $\delta_0$  соответствует  $\dot{B} = 330$  гс/сек.

Парастание тока в резонансных обмотках в данном расчёте не учитывалось. Поэтому такой способ введения возмущения приводит к увеличению амплитуд радиальных колебаний и, следовательно, длительности вывода ( § 3 случаи а и в ).

На движение протонов в условиях резонанса существенно влияет наличие азимутальной асимметрии орбиты во внутренней части камеры, которая появляется, когда половина проводников резонансной обмотки в I и II квадрантах замкнута внутрь от  $R_0$ , а половина - наружу ( \* поле I<sup>ю</sup> рис. 3, кривая I ). Было оценено искажение радиальной орбиты во внутренней части камеры при расположении проводников на  $R_0 + 5$  и  $R_0 + 15$  см в случае, когда  $B_z(n + \Delta n)$  в I и II квадрантах на  $R_{II} = 2790$  см больше  $B_z(n)$  в III и IV квадрантах на 0,148% [5].

Искажённая орбита приведена на рис. 4(б). Она имеет вид 1-ой гармоники и амплитуда её достигает 5,2 см.

### 3. Характеристики пучка при выводе.

В настоящем разделе рассмотрено поведение пучка протонов в процессе медленного вывода в ряде характерных случаев. Имелась

возможность изменять положение проводников резонансной обмотки по радиусу, вводить или не вводить азимутальную асимметрию в области устойчивого движения пучка (поле 1 и 2), расширить рабочую область поля во внутренней части камеры с помощью существующей коррекции  $\mu$  на высокой индукции (НВЗ). Для траекторий во всех случаях было взято по шесть начальных азимутов от 6,2 см до 0,6 см с шагом по фазе свободных колебаний

Таблица II

Случай	Положение шин резонансной обмотки	Величина резонансной добавки $\Delta n$	Наличие или отсутствие азимутальной асимметрии (поле 1 или 2)	$R_s$ , см	$\Delta n_{\text{нвз}}$ во внутренней части камеры	$\gamma$
a)	$R_0$ и $R_0 + 10 \text{ см}$	0,3	поле 1	2820	0,2	100%
b)	$R_0$ и $R_0 + 10 \text{ см}$	0,3	поле 2	2820	0,2	100%
в)	$R_0 + 5$ и $R_0 + 15 \text{ см}$	0,3	поле 1	2820	0	20%
1r)	$R_0 + 5$ и $R_0 + 15 \text{ см}$	0,3	поле 2	2820	0	20%
2r)	$R_0 + 5$ и $R_0 + 15 \text{ см}$	0,3	поле 2	2830	0	20%

Случай а. Пучок смещен в начале вывода на  $R_n = 2780$  см. Распределение  $n$  по радиусу в этих условиях приведено на во внутренней части камеры  $n$  исправлено с помощью проводки (ток 340а).

На рисунке 6<sup>а</sup> показана гистограмма распределения плотности протонов по зазору септум-магнита в радиальном направлении на протяжении всего вывода. Глубина заброса составляет  $\sim 13$  см. Гистограмма построена с учётом статистических весов частиц. Распределение протонов в фазовой плоскости на 2-х последовательных оборотах до заброса в зазор магнита и после заброса - показывает наличие большой плотности в области септума. Это связано с тем, что вследствие сдвига орбиты наружу часть частиц попадает в область септума с малым шагом, ещё не успевая войти в резонанс. Угол траектории протонов на входе магнита  $\alpha(\omega)$  меняется во времени (от  $-3$  до  $-0,4$  мрад), что связано со смещением наружу несвязанной радиальной орбиты, амплитуда которой зависит от радиуса (рис. 8). Угловой разворот  $\Delta\alpha \approx 0,5 \pm 0,7$  мрад и от  $\omega$  не зависит. В данном случае начало и конец вывода определяются большими амплитудами колебаний, что связано также с наличием азимутальной асимметрии. Временная плотность протонов показана на рис. 9, длительность вывода  $\tau_a \approx 1300$  оборотов.

Случай б. Пучок на  $R_H = 2780$  см находится вне области азимутальной асимметрии и не получает увеличения радиального размера. Глубина заброса в зазор септум-магнита составляет 18 см (рис. 6<sup>б</sup>), протоны имеют шаг за оборот не менее 10 см, что сказывается на распределении их плотности в районе септума (рис. 6<sup>б</sup> и 10). Средний угол  $\alpha(\omega)$  растёт от 0 до 1,3 мрад,  $\Delta\alpha \approx 0,6$  мрад и от  $\omega$  практически не зависит (рис. 11). Длительность вывода составляет  $\tau_s = 700$  оборотов.



Распределение плотности протонов во времени (рис. 12) определено неизменным распределением по амплитудам свободных колебаний: вначале выпадают большие амплитуды в конце - малые.

Случай В. Приведены характеристики пучка при расположении проводников резонансной обмотки на  $R_0 + 5$  см и  $R_0 + 15$  см и наличии азимутальной асимметрии во внутренней части камеры ( $R_H = 2790$  см и ток во внутреннюю шину ИВЗ включен не был.). Расчёты показали, что теперь некоторые начальные фазы больших и средних амплитуд забрасываются на  $R > 2820$  см в течение нескольких первых оборотов. На рис. 13 показана искажённая орбита на  $R_H = 2790$  см (кривая 2) и траектория с начальной амплитудой 6 см (кривая 1). Видно, что частица попадает в зазор магнита на 6-ом обороте от начала движения. Те протоны, начальный угол траекторий которых близок к углу наклона искажённой орбиты, испытывают резонанс не сразу, а после смещения орбиты к резонансной области. Глубина заброса в зазор магнита 19 см (рис. 14). Однако большое число частиц в начале вывода попадает в область, близкую к септуму. Эти же частицы имеют большой угловой разброс в начале вывода  $\Delta\alpha \approx 2$  град (рис. 15). Как и для случая а) угол протонов на  $\psi = \pi$  отрицателен и уменьшается во времени по абсолютной величине. Временная гистограмма протонов приведена на рис. 16, вывод происходит в течение 1000 оборотов. В данном случае  $\sim 34\%$  пучка выводится в течение первых 100 оборотов. Нарастание тока в резонансных обмотках при расчёте не учитывалось. Нужно отметить, что в действительности ток в обмотках будет нарастать немедленно и что азимутальная асимметрия будет увеличиваться постепенно. Это приведёт к отличию поведения пучка от расчётного.

Случай Г 1. В этих условиях пучок в начальный момент времени находится также на радиусе  $R_n = 2790$  см. Даже если все витки резонансной обмотки замкнуты наружу от  $R_0$  на этом радиусе существует азимутальная асимметрия поля, что сказывается на пучке. Глубина заброса в зазор магнита, как и в случае в) составляет 19 см (рис. 17). Нужно отметить, что уменьшение  $\Delta n$  до 0,28 уменьшает глубину заброса до 14 см. При этом уменьшается также шаг за оборот и резонанс начинается позднее (т.е. при больших номерах оборотов). Зависимость  $\alpha(N)$  приведена на рис. 18. Для частиц с малыми амплитудами, которые определяют конец вывода, наблюдается большой угловой разброс  $\Delta\alpha$ . Эти частицы, кроме того, как правило, попадают на большие радиусы, глубина заброса в данном случае возрастает с номером оборота. Длительность вывода  $T_f = 1000$  оборотов (рис. 19), в конце вывода наблюдается большая плотность протонов, вызванная малыми начальными амплитудами.

Случай Г 2. Для случая в) была рассмотрена возможность уменьшения угла поворота, т.е. поля, в септум-магните при выводе пучка в конце III квадранта ускорителя. Это можно сделать, отодвинув магнит на большее расстояние от  $R_0$ , например,  $R_s = 2830$  см. Поэтому был выбран случай, в котором витки резонансной обмотки отстоят дальше от  $R_0$ . С этой целью были рассчитаны характеристики пучка на  $\varphi = \pi$  при забросе на радиусы, большие 2830 см. Особенности пучка в этом случае следующие: а) угловой разброс  $\Delta\alpha$  в начале и середине вывода увеличивается до 1 мрад, в конце вывода  $\sim 1,6$  мрад; б) средний угол  $\Delta\alpha$  растет от  $\sim 0,5$  до 2 мрад; в) глубина заброса в зазор магнита  $\sim 21$  см (рис. 20). Длительность вывода та же, что и в случае г).

Основные выводы:

1. Если рассматривать эффективность вывода, как отношение глубина заброса к толщине септума наименее выгоден случай а), случай б), в) и г) с этой точки зрения достаточно приемлемы.

2. Однако случаи в) и г) имеют большой угловой разворот пучка - один в начале (в), другой - в конце (г) вывода. Таким образом случай б) имеет кроме большой глубины заброса ещё наименьший угловой разворот на протяжении всего вывода. Тот факт, что угол  $\alpha(\omega)$  для случая б) положителен также благоприятен, т.к. при этом потребуется меньший угол отклонения протонов в септум-магните.

3. Длительность вывода в случае б) меньше, чем в любом другом, что накладывает более жесткие допуски на скорость изменения поля. Возможно некоторое увеличение длительности за счёт смещения пучка перед началом вывода ближе к  $R_0$  в область азимутальной асимметрии, т.е. за счёт увеличения ширины пучка. Длительность вывода, по-видимому, можно увеличить, уменьшая  $\Delta n$  в конце вывода, это приведёт также к уменьшению плотности протонов в этот момент. Для более равномерной временной плотности протонов в случае б) потребуется, кроме того, уменьшать величину  $B$ , начиная с середины вывода. Уменьшение длительности вывода в случае в) по сравнению с случаем а) связано с тем, что часть частиц с большими и средними амплитудами колебаний забрасывается на  $R > 2820$  см ещё до смещения орбиты наружу, т.е. пучок расположен слишком близко к возмущению. Увеличение  $\tau$  в случае г) по сравнению с б) (1000 и 700 оборотов) связано с искажением равновесной орбиты и увеличением размера пучка на  $R_H = 2790$  см, даже если витки

резонансной обмотки замкнуты наружу от  $R_0$ . Таким образом, из сравнения характеристик пучка для всех рассмотренных здесь случаев следует, что они наиболее благоприятны, кроме длительности, для случая б). Расчёт фокусировки пучка в септум-магните и рассеяном поле ускорителя подтверждает этот вывод.

В заключение рассмотрим влияние разброса по импульсу в конце ускорения  $\Delta p = \pm 1 \frac{\text{MeV}}{c}$  на характеристики пучка при данной схеме медленного вывода. Изменение импульса протонов учитывалось с помощью изменения  $p_0$  в правой части уравнения движения [4], а также изменением начального положения равновесной орбиты  $R_H$ . Так при  $p = p_0 + \frac{1}{8} \frac{\text{MeV}}{c}$  радиус  $R_H = 2790,83 \text{ см}$  вместо  $2790 \text{ см}$  при  $p_0$  и  $R_H = 2789,16 \text{ см}$  при  $p = p_0 - \frac{1}{8} \frac{\text{MeV}}{c}$ . Расчёты с измененными импульсами были произведены для случая г). При увеличенном импульсе вывод начинается при  $N = 150$  оборотов ( $\delta_1 = \delta_2 = 20\delta_0$ ), вместо  $N = 1200$  при  $p_0$ , при уменьшенном импульсе конец вывода соответствует 2200 обороту. Длительность вывода для всех значений импульса составляет  $\sim$

1600 оборотов. Сдвиг начала вывода во времени при изменении импульса зависит, как от изменения  $R_H$ , так и от связанного с этим изменения величины искажения радиальной орбиты (как уже указывалось амплитуда искаженной радиальной орбиты является функцией от радиуса).

В таблице II приведены основные характеристики выведенного пучка для  $p_0$ ,  $p_0 + \frac{1}{8} \frac{\text{MeV}}{c}$  и  $p_0 - \frac{1}{8} \frac{\text{MeV}}{c}$ , которые примерно одинаковы.

Таблица III

Импульс	$\alpha(N)$ [град]	$\Delta\alpha(N)$ [град] начало вывода	$\Delta\alpha(N)$ [град] конец вывода	шаг амплитуды на $\varphi = \sqrt{t}$
$P_0 + 3 \frac{\text{MeV}}{c}$	-0,4 ± 2,5	~ 0,4	~ 1,4	от 3 до 21 см
$P_0$	-0,3 ± 2,6	~ 0,2	~ 1,5	от 3 до 21 см
$P_0 - 3 \frac{\text{MeV}}{c}$	-0,4 ± 2,4	~ 0,3	1,2	от 3,5 до 22 см

Таким образом, рассмотрение поведения протонов в процессе их заброса в зазор септум-магнита показывает пригодность выбранной схемы для осуществления медленного резонансного вывода пучка.

4. Расчёт фокусировки пучка в септум-магните, рассеянном поле ускорителя и системе транспортировки.

Была исследована фокусировка пучка при медленном выводе протонов по направлению быстрого вывода ( район нейтронного павильона ) для 2-х расположений резонансного возмущения в камере и разных длинах септум-магнита. В этом случае пучок будет проходить значительное расстояние в краевом дефокусирующем по радиусу поле ускорителя, поэтому септум-магнит должен иметь радиальную фокусировку, подобно аналогичному магниту быстрого вывода [6]. Для выбора угла поворота  $\beta_s$  и оптимального значения показателя поля  $n_s$  в магните с помощью ЭВМ была использована управляющая программа [7], которая позволяет рассчитывать траектории протонов через прямолинейный промежуток,

септум-магнит и III квадрант до выхода из ускорителя. Рассмотрим вариант с длиной магнита 80 см, для которого может быть использован механизм передвижения и оборудование на прямолинейной секции, разработанное для быстрого вывода. Край септум-магнита находится на  $R = R_0 + 20$  см. Был рассчитан угол отклонения в магните  $\beta_s$  и  $n_s$  для случая медленного вывода при расположении или резонансной обмотки на  $R_0$  и  $R_0 + 10$  см, "поле 2" и токе ИВЗ  $I = 340$  а (случай б). Поскольку угол протонов на входе магнита меняется во времени, угол отклонения  $\beta_s$  и  $n_s$  магнита подбирались отдельно для начала и конца вывода. Протоны, которые первыми попадают в зазор магнита при  $\beta_s = -0.01477$  рад выходят из камеры по направлению быстрого вывода. Зависимость радиального размера пучка на выходе из ускорителя (азимут  $1,57$  III квадранта [8]) от  $n_s$  в магните приведена на рис. 21. Оптимальная величина  $n_s = -100$ , при этом полная ширина пучка  $\Delta R_H = 12$  см, угловой раствор  $\Delta \alpha_H = \pm 11,5$  мрад. Аналогично были подобраны  $\beta_s$  и  $n_s$  для протонов, приходящих в конце вывода:  $\beta_s = 0,0139$  рад и  $n_s = -110$ . При этом  $\Delta R_{H,K} = 10$  см,  $\Delta \alpha_K = \pm 8$  мрад. Однако эти размеры пучка увеличиваются при учёте дисперсии. Если  $\Delta P/P = \pm 1 \frac{\text{MeV}}{c}$ , то  $\Delta R$  увеличивается примерно на 2 см, а  $\Delta \alpha$  на  $\pm 10\%$ . Таким образом, величину и показатель поля септум-магнита необходимо менять в процессе медленного вывода, чтобы пучок выходил из ускорителя по постоянному направлению и имел минимальный горизонтальный размер. Если в рассматриваемом примере  $\beta_s$  не уменьшать во времени, центр пучка к концу вывода сместится на 64 см наружу. Размер пучка к концу вывода при  $n_s(\omega) = \text{const} = -100$  увеличится до 16 см, т.е. изменение  $n_s$  менее существенно, чем  $\beta_s$ . Вертикальный размер пучка,

выходящего из ускорителя, как и при быстром выводе, невелик:  $\Delta z = \pm 0,2$  см. Результат получен на основе расчёта 34 вертикальных проекций траекторий, соответственно с распределением пучка по амплитудам свободных колебаний без учёта движения при резонансе.

Пересечение крайних траекторий пучка с наружной стенкой вакуумной камеры ускорителя даёт возможность определить размеры выпускного отверстия. Его высота должна составлять не менее 2 см, а протяженность в азимутальном направлении - 450 см. Центр этого отверстия находится на том же азимуте, что и при быстром выводе (1,374 рад).

Размеры пучка на выходе из ускорителя позволяют использовать для его транспортировки систему, предназначенную для быстрого вывода [1]. На основании рассчитанных характеристик пучка на выходе из ускорителя, были получены мнимые источники в горизонтальной и вертикальной плоскости [8], необходимые для расчёта системы транспортировки. Расстояния до мнимого источника в горизонтальной плоскости в начале и в конце вывода примерно совпадают  $L_{r2} = 553$  см. По вертикали мы имеем действительное изображение пучка на расстоянии 5 см от азимута 1,57 рад. В первую ступень системы транспортировки вошли 2 поворотнo-фокусирующих магнита M-2 и квадрупольная линза 20K200 ( $Q_1$ ). Поскольку расстояние до входа в первый магнит не может быть меньше 104,5 см [9], для расчёта первой ступени взяты  $L_r = 657,4$  см и  $L_B = 99,85$  см. Пределы изменения  $n$  в магнитах M 2 взяты от -138 до -142. На рис. 22 приведена зависимость  $K\beta$  в линзе  $Q_1$  и расстояния  $T$  до стигматичного изображения  $F_1$  от  $n$  в магнитах. При этом угол отклонения в каждом магните  $\beta = 0,052$  рад, расстояние между

магнитами -  $d$  мм -17 см, расстояние между магнитом и линзой -  $d$  мм -30 см. Вторая ступень системы транспортировки может состоять, например, из дублета линз 20К200 ( $Q_2$  и  $Q_3$ ). Последовательность линз в горизонтальной плоскости Д-Ф, расстояние между ними 100 см. На рис.23 показана зависимость в таком дублете  $K_{1l}$  и  $K_{2l}$  от расстояния до второго изображения  $F_2$  при расстоянии до источника 700 см. Дублет имеет линейный коэффициент увеличения в горизонтальной плоскости  $< 1$ , в вертикальной  $> 1$ . Через обе ступени системы просчитаны крайние траектории в обеих плоскостях при  $\alpha = -140$ , расстояние до первого изображения 585 см и до второго - 934 см (рис.24). Параметры системы и размеры изображений приведены в таблице IV и таблице V.

Таблица IV

Элемент системы	$K_{\beta}$ или $\beta$ [рад]		Размер пучка, см в элементах системы	
			горизонтальная плоскость	вертикальная плоскость
$M_2$	0,052рад	-140	9,5	1,4
$M_2$	0,052рад	-140	9,2	2,8
$Q_1$	0,9498	-	5,6	3,8
$Q_2$	0,85	-	5,7	4,8
$Q_3$	0,821893	-	9,3	3



Таблица У

Обозначение точки		$\bar{J}_1$	$\bar{J}_2$
Горизонтальная плоскость	размер, см	0,4	0,2
	угловая расходимость, мрад	$\pm 4,98$ мрад	$\pm 9,485$
Вертикальная плоскость	размер, см	0,4	0,8
	угловая расходимость, мрад	$\pm 6,18$	$\pm 2,4$

Движение пучка до выхода из ускорителя было рассчитано также для расположения шин резонансной обмотки на  $R_0 + 5$  см и  $R_0 + 15$  см (поле 2,  $\neq$  случай 2) при том же положении и длине септум-магнита, что и в предыдущем случае.

Полученные величины  $\beta_s$ ,  $n_s$ , а также  $\Delta R$  и  $\Delta \alpha$  на выходе из ускорителя представлены в таблице У1.

Таблица У1

	начало вывода	конец вывода
$\beta_s$ , рад	0,0149	0,0137
$n_s$	-100	-140
$\Delta R$ , см	$\sim 8,7$	$\sim 20$
$\Delta \alpha$ , рад	$\pm 7,8$	$\pm 17,7$

Теперь требуется большее изменение  $n_s$  в септум-магните, что связано с увеличением углового раствора пучка в конце вывода. По этой же причине пучок в конце вывода имеет на выходе из ускорителя худшие характеристики. [Как уже указывалось, для данного расположения резонансного возмущения на азимуте  $\varphi = \pi$  был рассчитан заброс протонов на  $R > 2830$  см. Это позволило сместить край септума наружу. Необходимый угол отклонения в септум-магните  $\beta_s$  уменьшится за счет: 1) смещения септума наружу; 2) увеличения угла пучка  $\alpha$  при забросе на большие  $R$ . Это позволит снизить индукцию в зазоре и уменьшить тем самым толщину септума. Для этой же цели длина магнита была увеличена до 400 см. Чтобы такой магнит отклонил пучок протонов на направление быстрого вывода требуется угол  $\beta_s = 0,012$  рад (начало вывода), что соответствует индукции на равновесном радиусе септум-магнита  $B = 1060$  га. На рис. 25 приведена зависимость радиального размера пучка на выходе из ускорителя от  $n_s$  в таком магните. Минимальный размер пучка на азимуте  $1,57$  рад в этом случае составляет см, угловой раствор ирад. Эти характеристики несколько хуже, соответствующих величин  $\Delta R$  и  $\Delta \alpha$ , приведенных в таблице VI. Последнее обстоятельство связано с тем, что при забросе на большие радиусы увеличивается угловой раствор пучка на входе септум-магнита.

#### Основные выводы.

- 1) лучшие характеристики пучка на выходе из ускорителя получены для случая б) резонансных условий; при этом размер пучка в месте первого изображения  $F_1$  достаточно мал  $-0,4 \times 0,4 \text{ см}^2$ ;
- 2) смещение септум-магнита на большие радиусы с целью

уменьшения угла отклонения приводит к некоторому ухудшению оптических свойств пучка; в этом случае угловой разворот пучка при забросе на большие радиусы, необходимо уменьшать за счёт изменения резонансных условий в ускорителе.

В заключение оценим допуски на амплитуды пульсаций различных гармоник поля ускорителя в режиме "стола тока" и допуски на стабильность уровня токов элементов системы вывода. В режиме "стола тока" существуют гармонические пульсации с частотой  $f = 600$  Гц, 1200 Гц, 1800 Гц. Наличие этих гармоник приводит к модуляции плотности протонов в процессе медленного вывода. При оценке допусков на амплитуды пульсаций будем исходить из требования, что модуляция интенсивности пучка при медленном выводе за счёт пульсаций не должна превосходить 10-20%. Для вывода длительностью 140 мсек в нашем случае требуется скорость изменения поля  $\dot{B} = 33$  Гс/сек. Таким образом, допустимая скорость изменения поля от различных гармоник пульсаций  $\dot{B}_{доп}$  не должна превышать 3,3 Гс/сек при модуляции интенсивности 10%. Допуски на амплитуды пульсаций  $B_n$  по отношению к индукции на центральном радиусе ускорителя  $B_{z0}$  определяется из отношения:

$$\frac{B_n}{B_{z0}} = \frac{\dot{B}_{доп}}{2\pi f B_{z0}}$$

где  $f$  - частота пульсаций. Зависимость  $\frac{B_n}{B_{z0}}$  от  $f$  приведена в таблице I.

$f, \text{Гц}$	600	1200	1800
$B_n/B_{z0}$	$0,7 \cdot 10^{-7}$	$0,35 \cdot 10^{-7}$	$0,23 \cdot 10^{-7}$

Предполагаемая схема подавления пульсаций в режиме "стола тока" предусматривает величину  $\dot{B}_{600}$  порядка  $\sim 8$  Гс/сек, что приводит

к модуляции интенсивности 25% с указанной частотой. Гармоники с частотой 1200 и 1800 гц дают примерно такую же модуляцию интенсивности, как и гармоника с  $f = 600$  гц. Допуск на стабильность поля в септум-магните выбирался из требования стабильности положения пучка на входе канала транспортировки. При отклонении поля от заданного на  $\pm 0,1\%$  центр пучка смещен в указанном месте приблизительно на  $\pm 1$  см.

Вау

Миз  
Эмир  
Н. Павлов  
Л. Замовьев

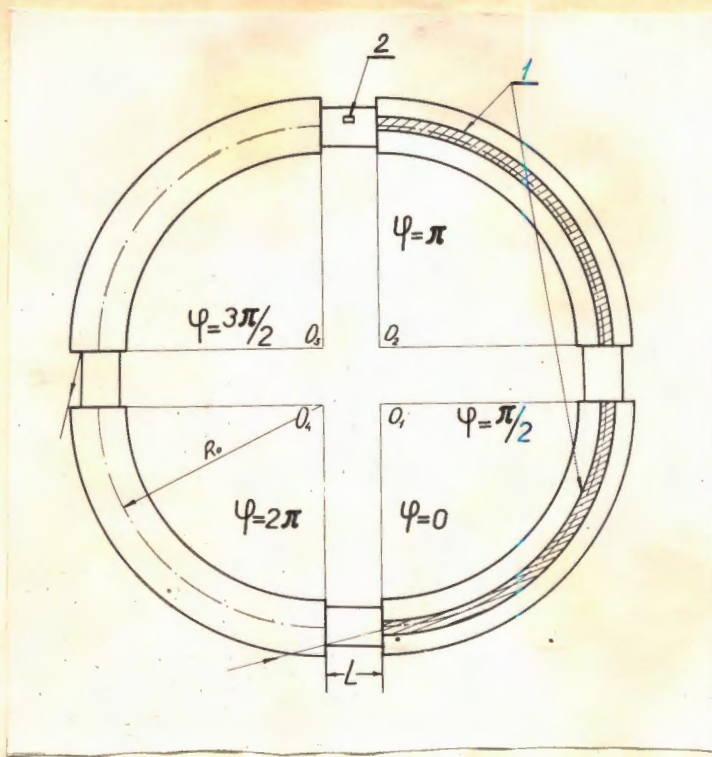


Рис. 1

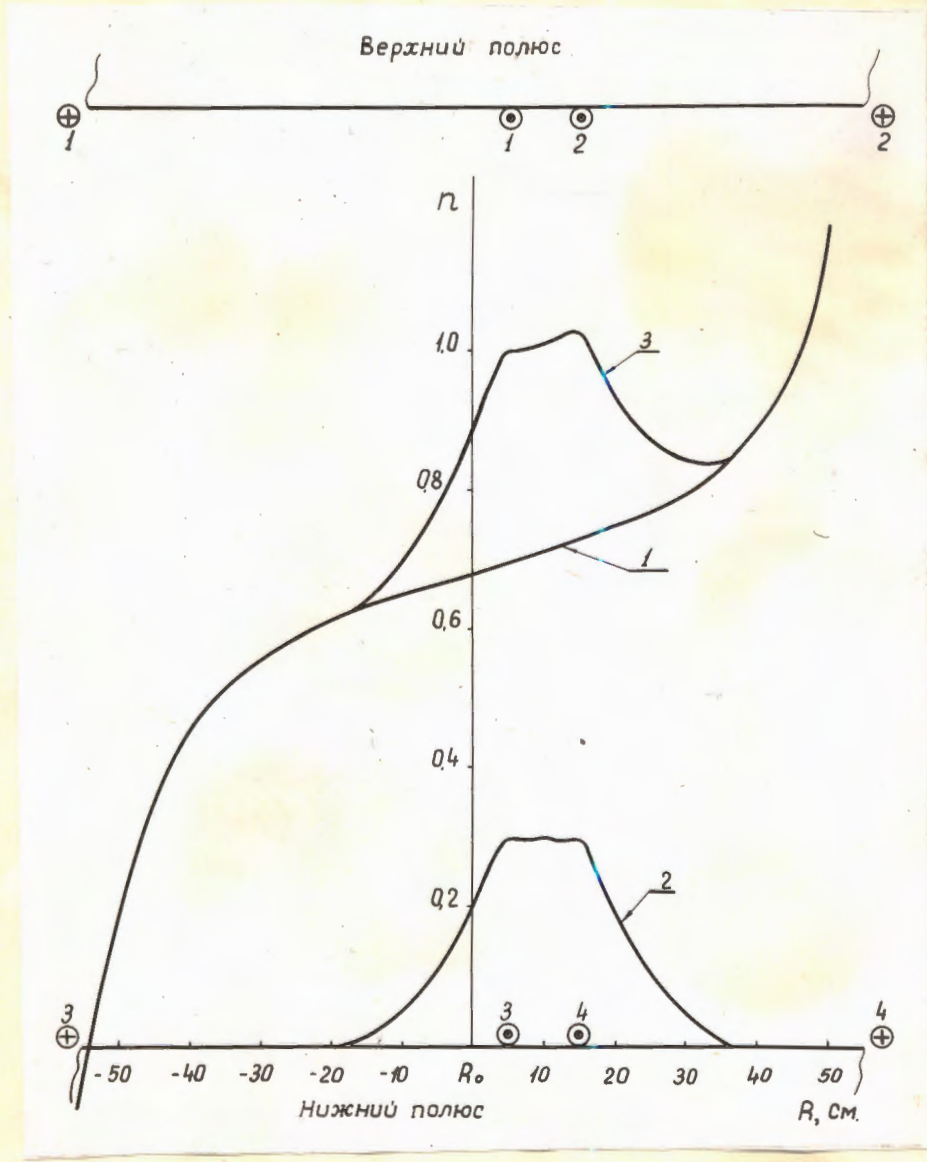


Рис. 2

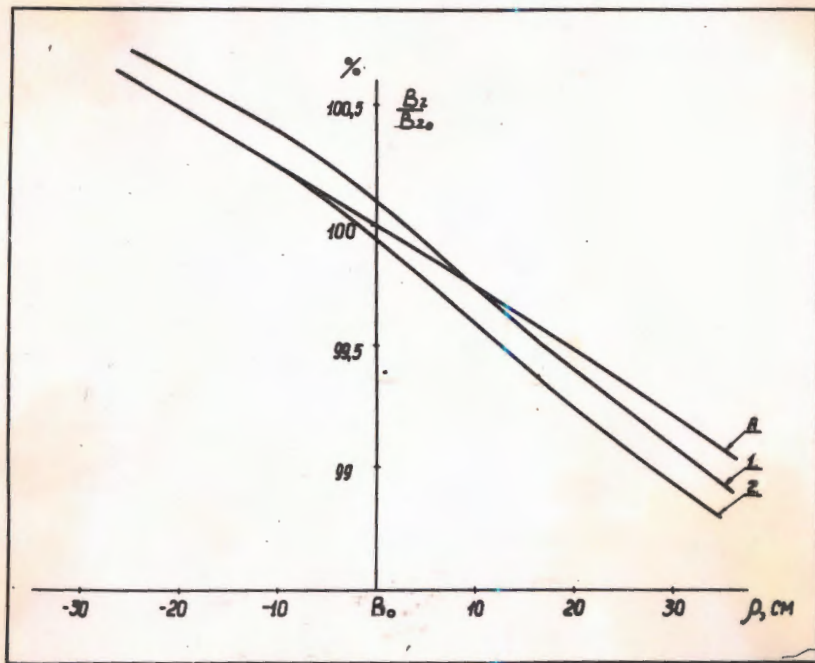


Рис. 3

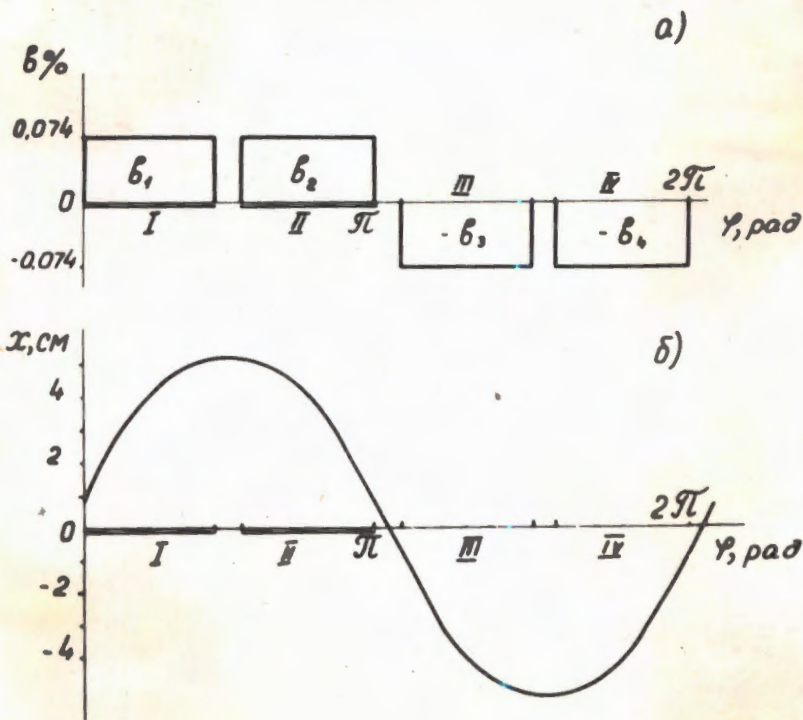


Рис. 4

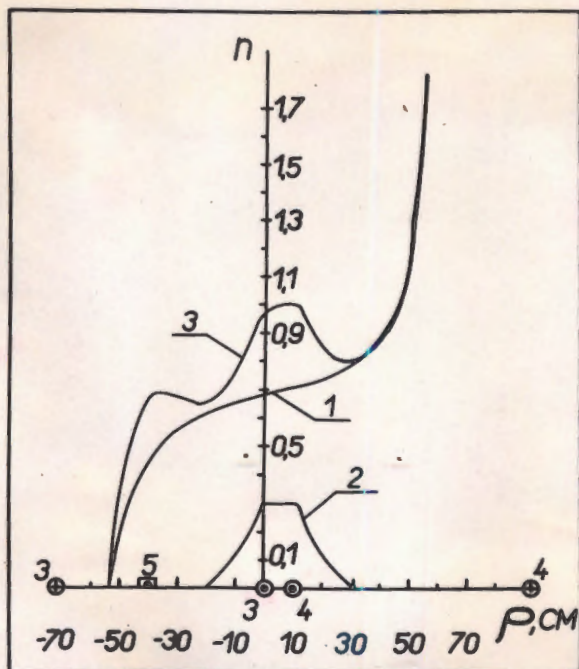


Рис. 5.

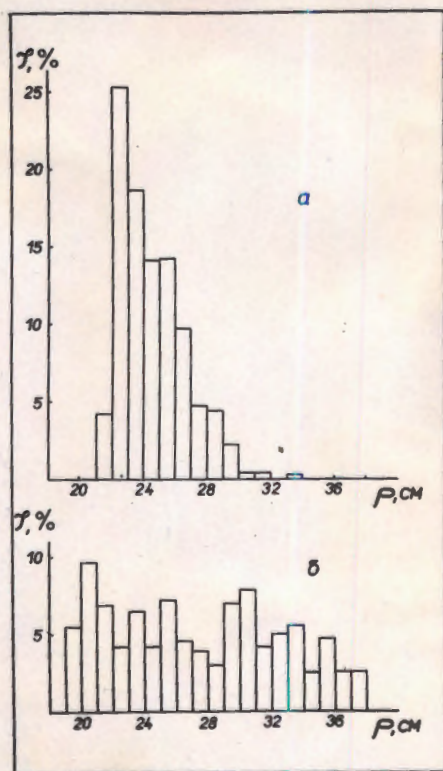


Рис. 6.

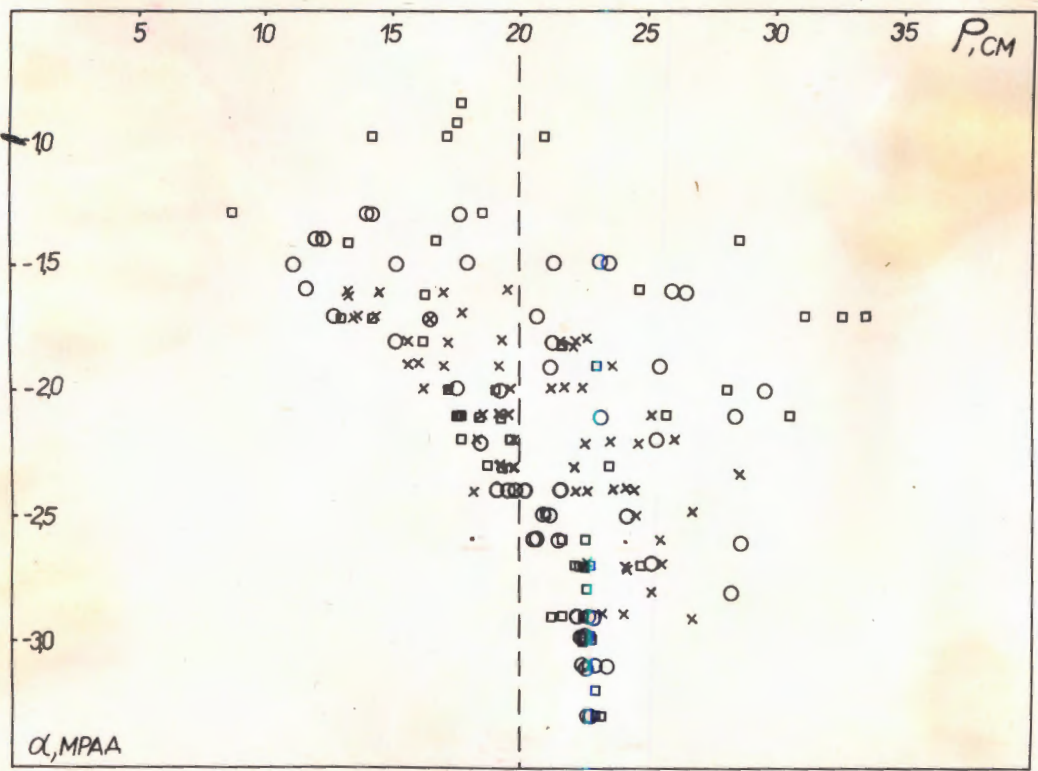


Рис. 7

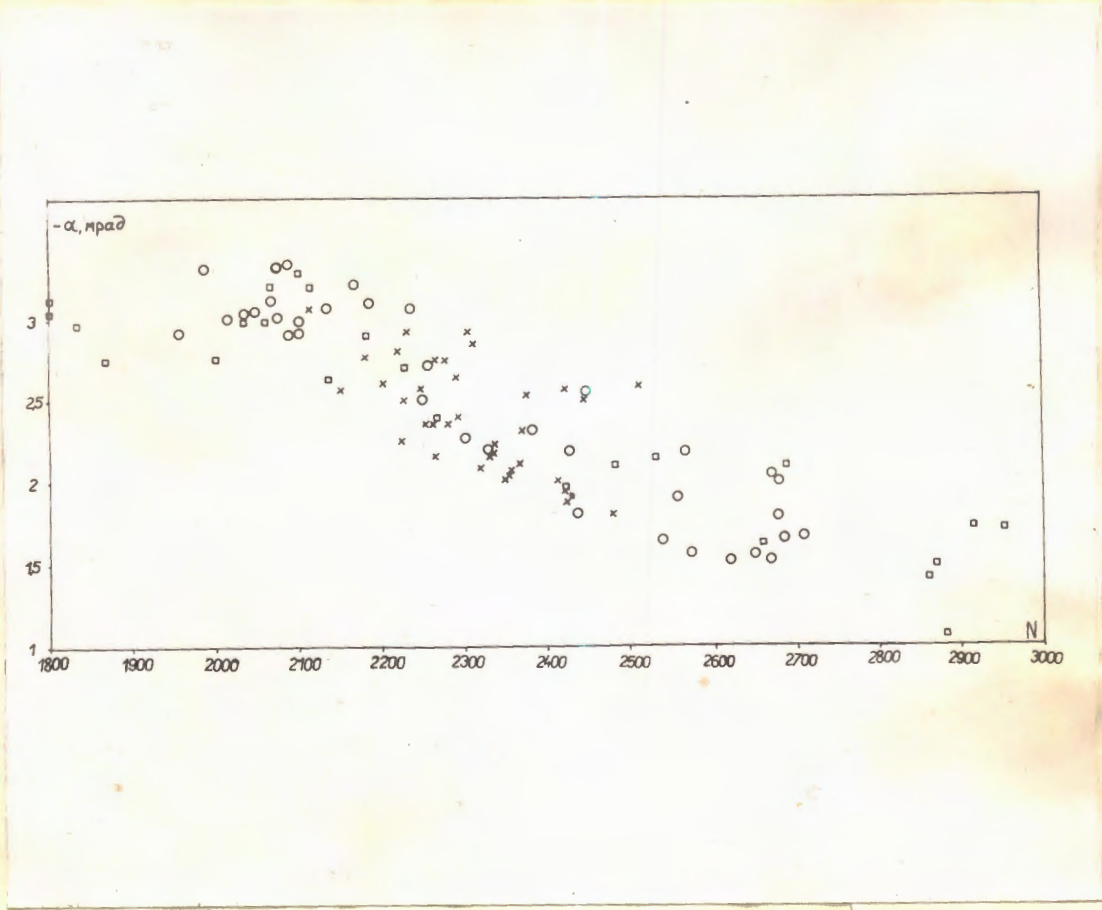


Рис. 8.



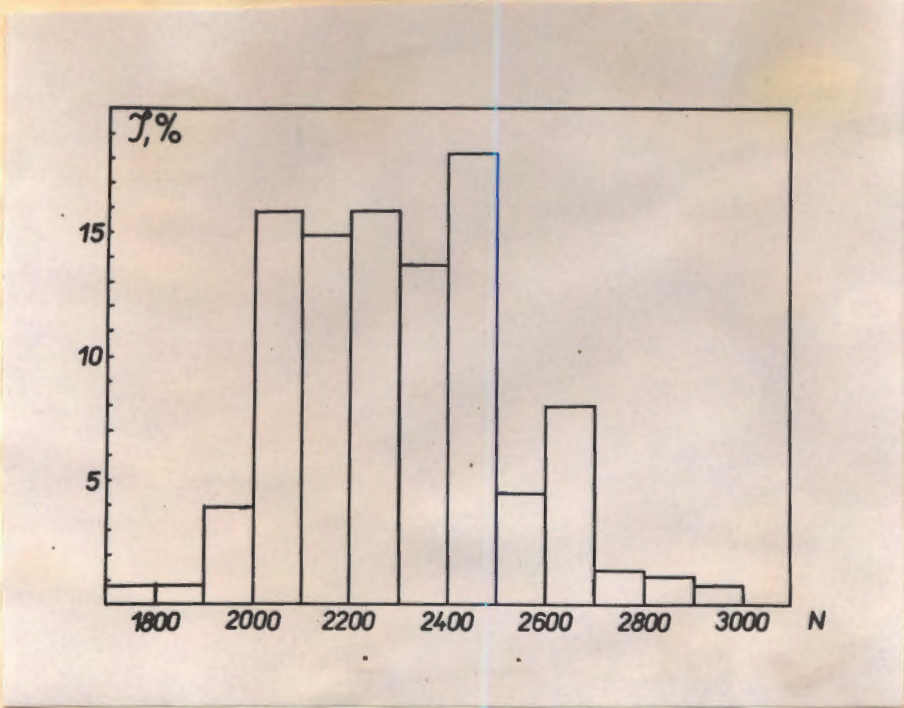


Fig. 9.

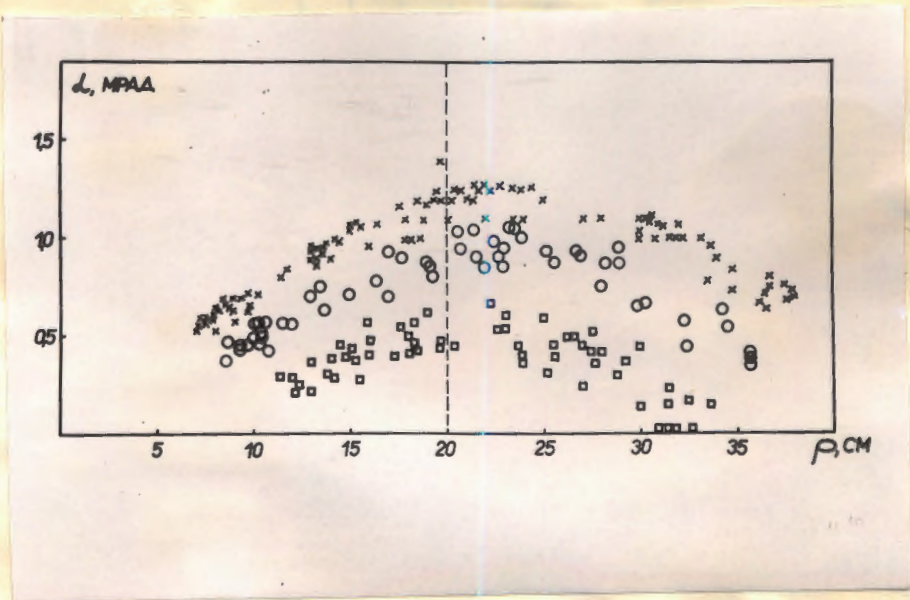


Fig. 10.

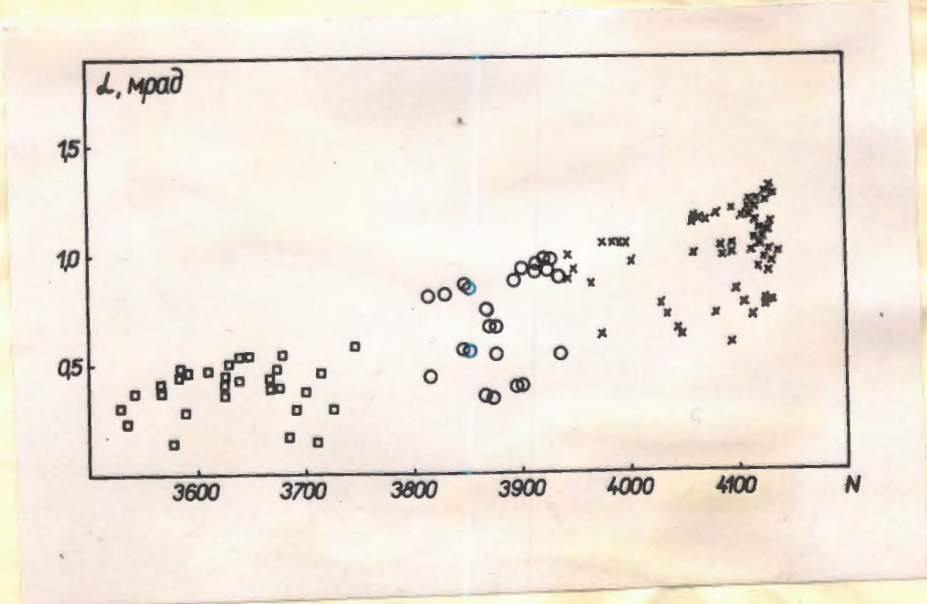


Fig. 11.

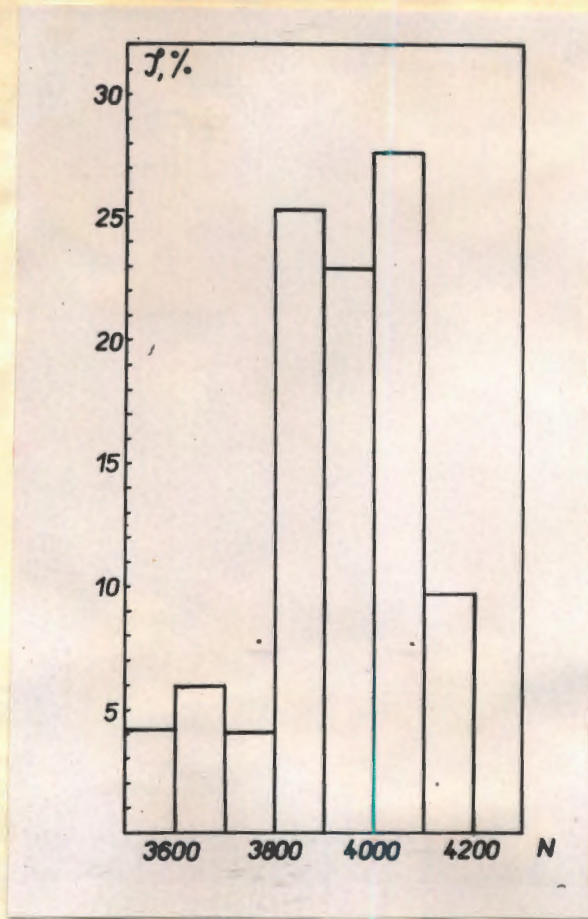


Рис. 12.

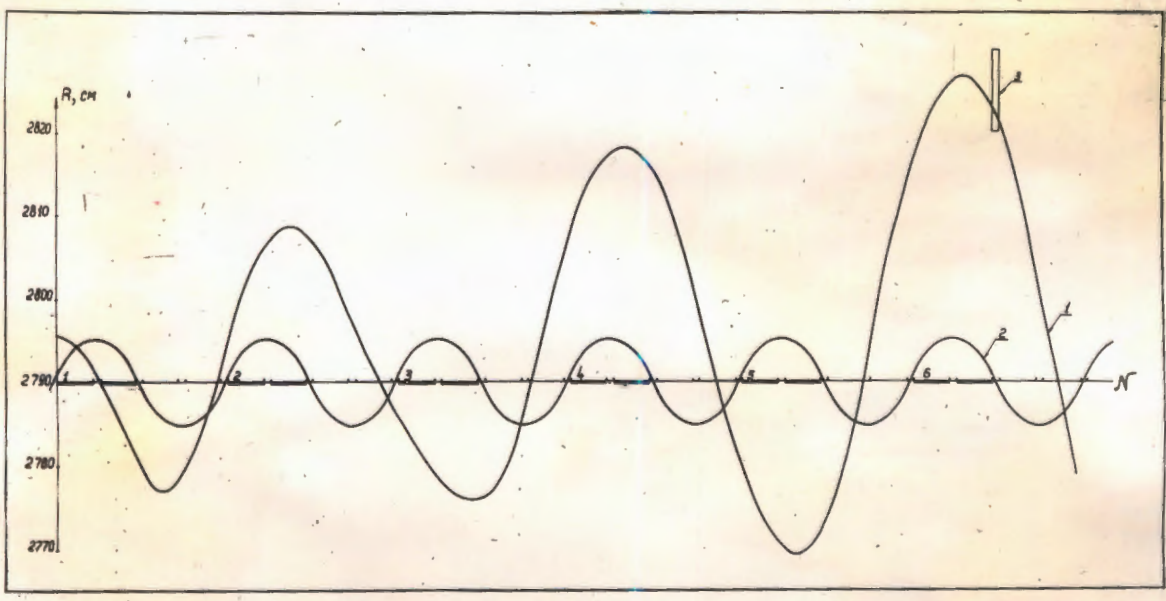
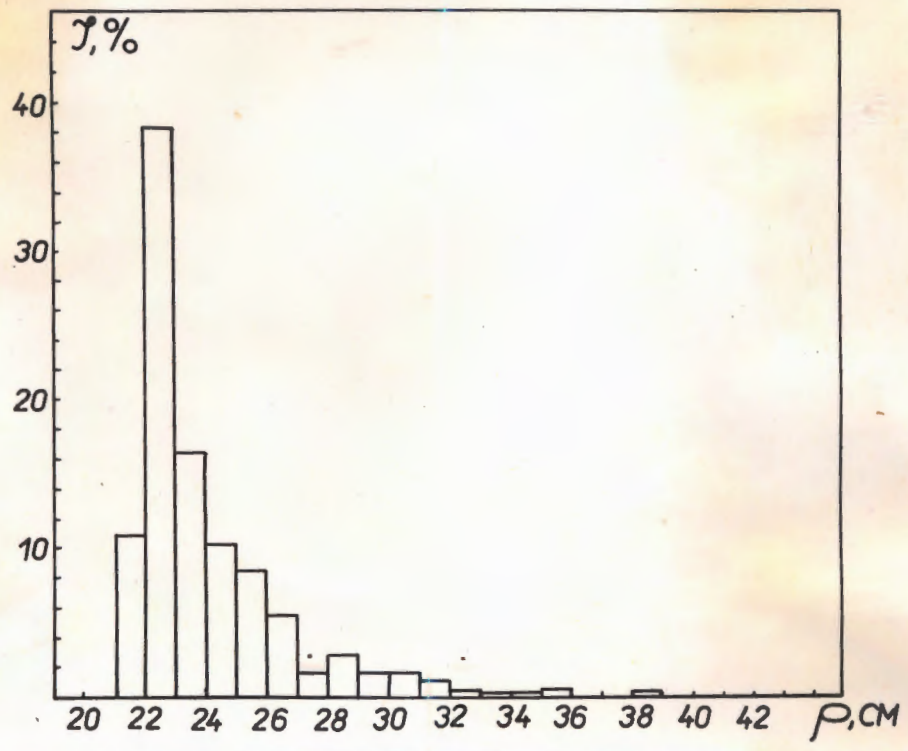


Рис. 13.



b)  
from  
them  
are

Рис 14

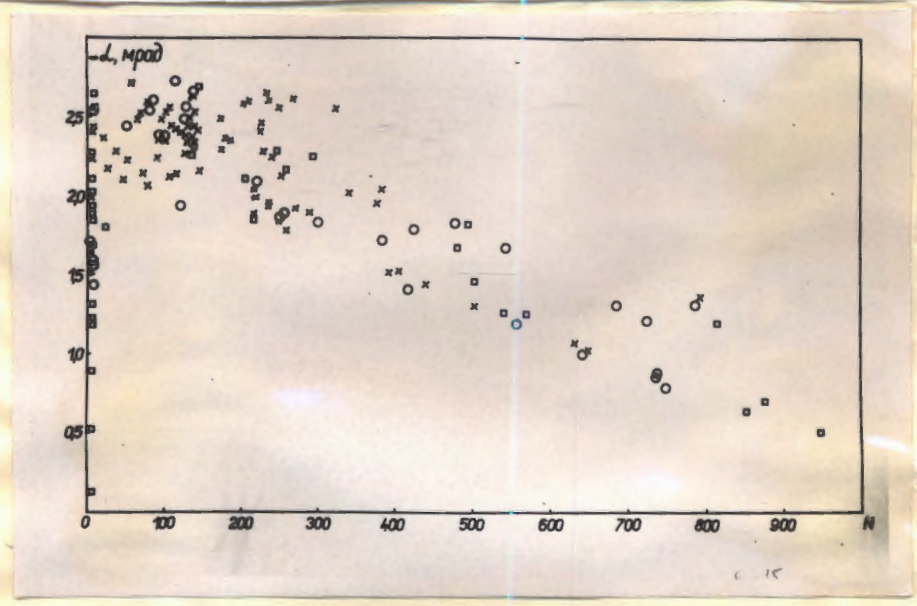


Рис 15.

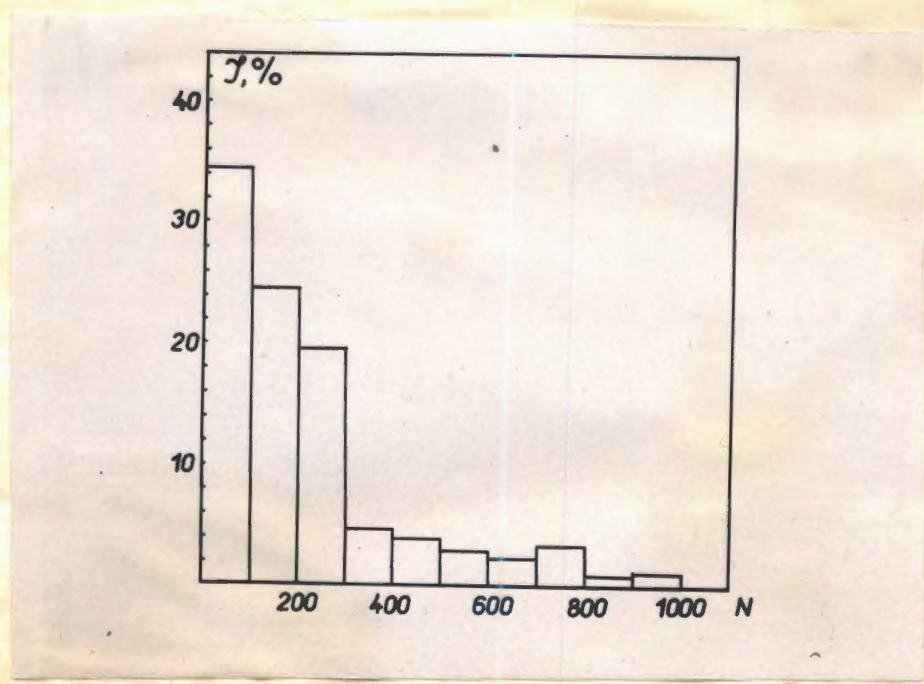
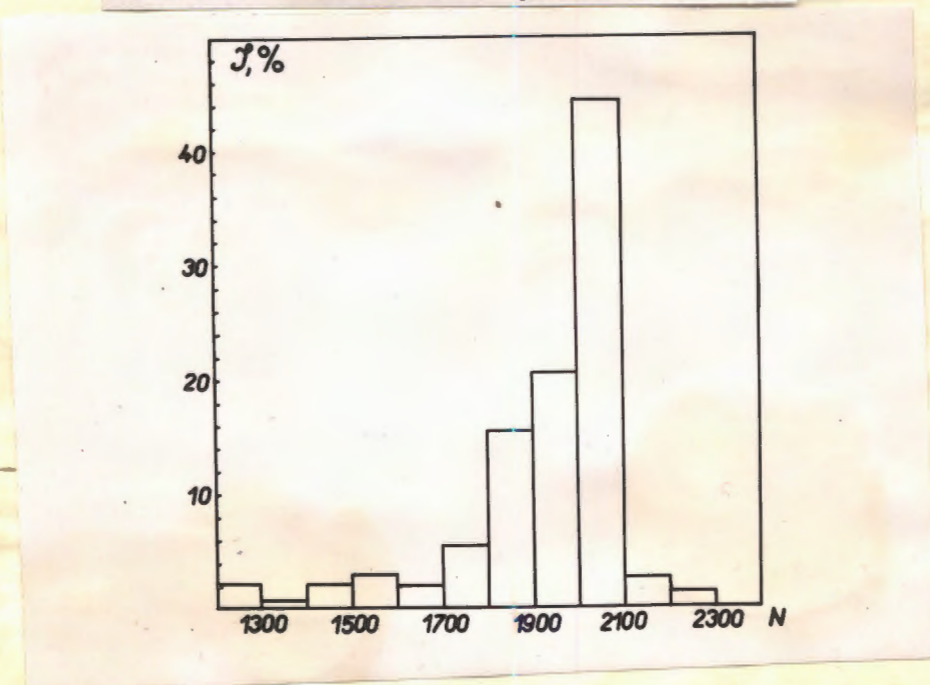
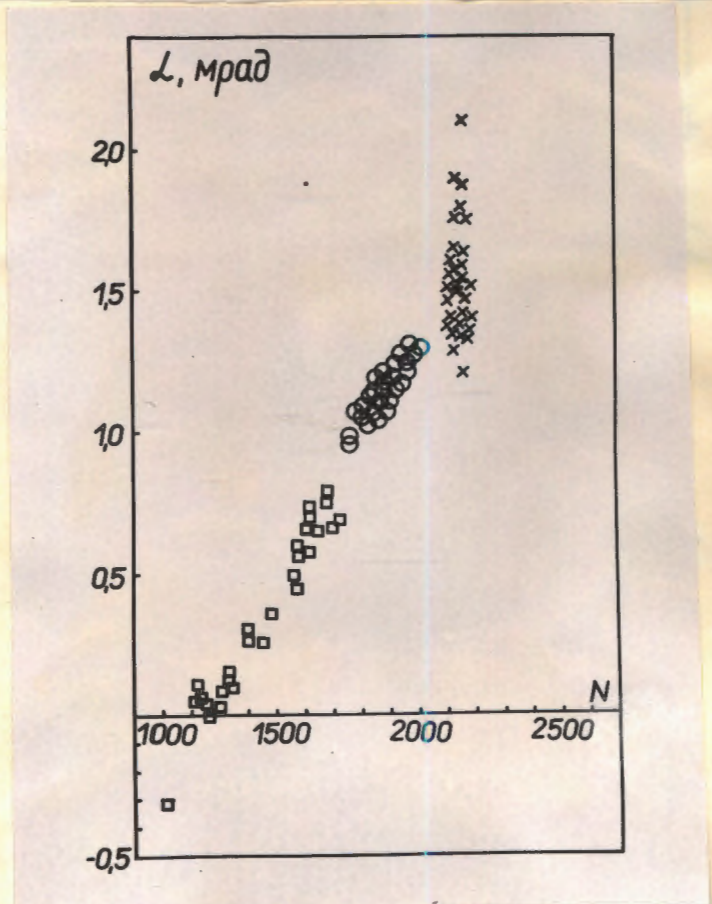
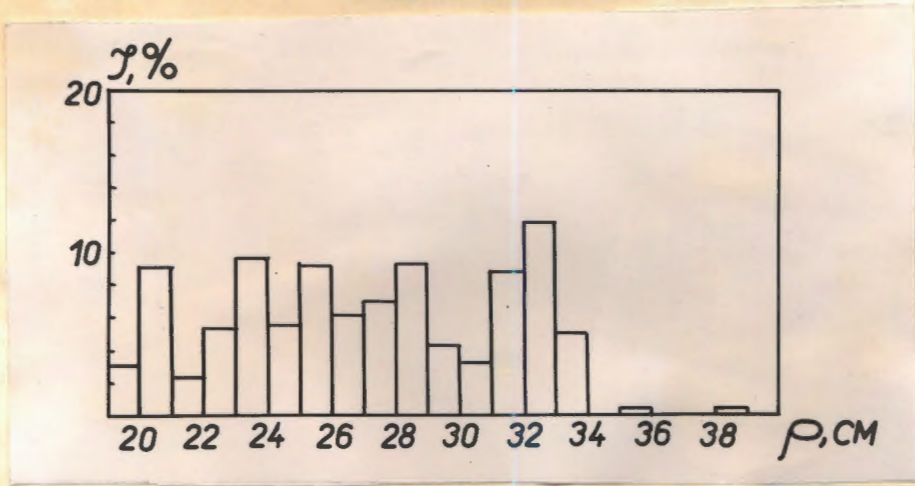


Рис 16.



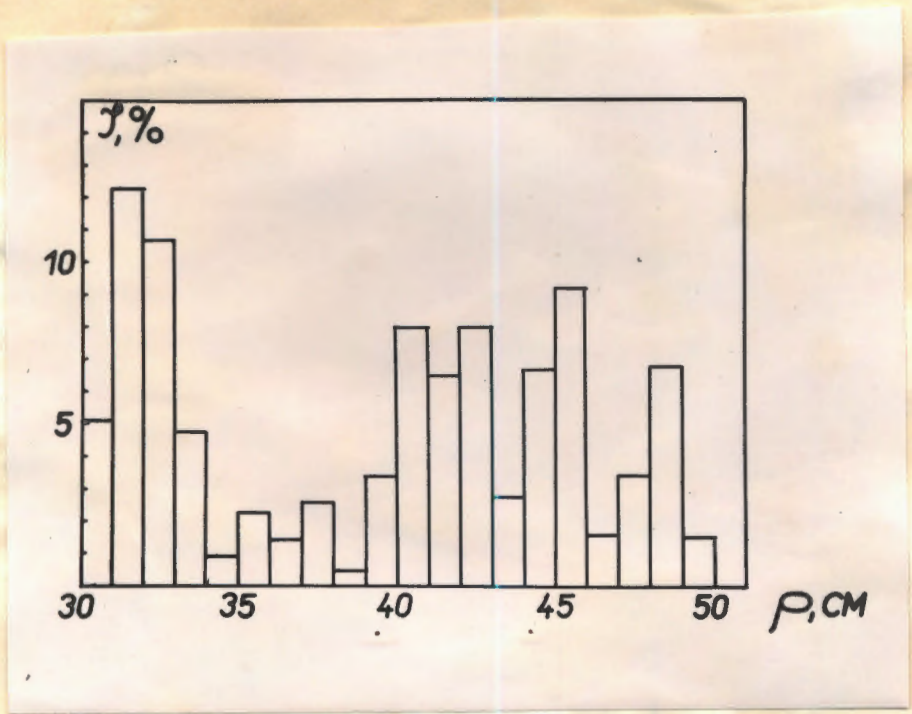


Рис. 20.

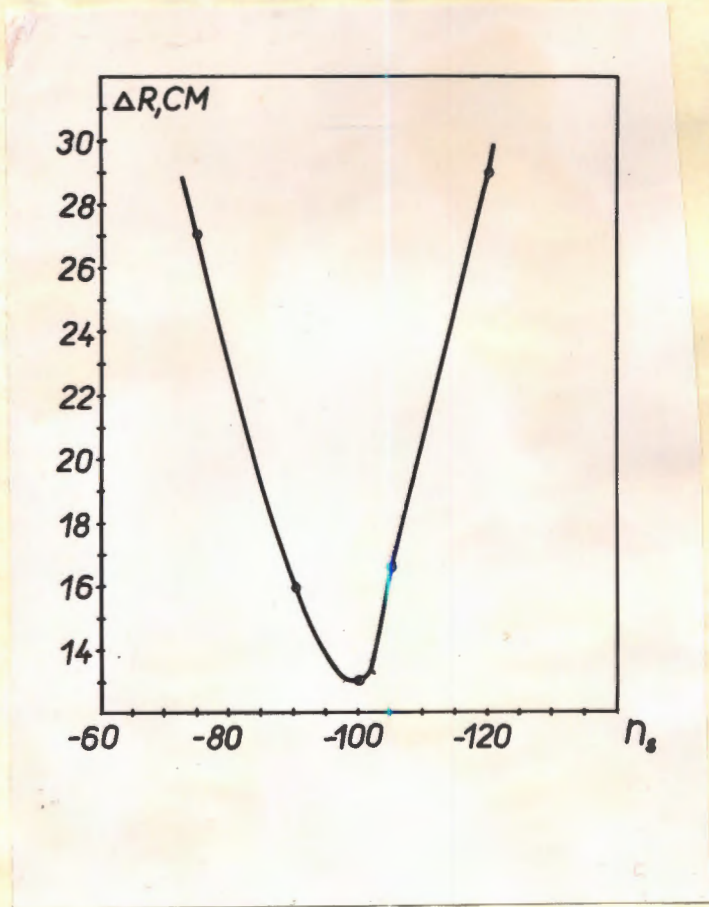


Рис. 21.

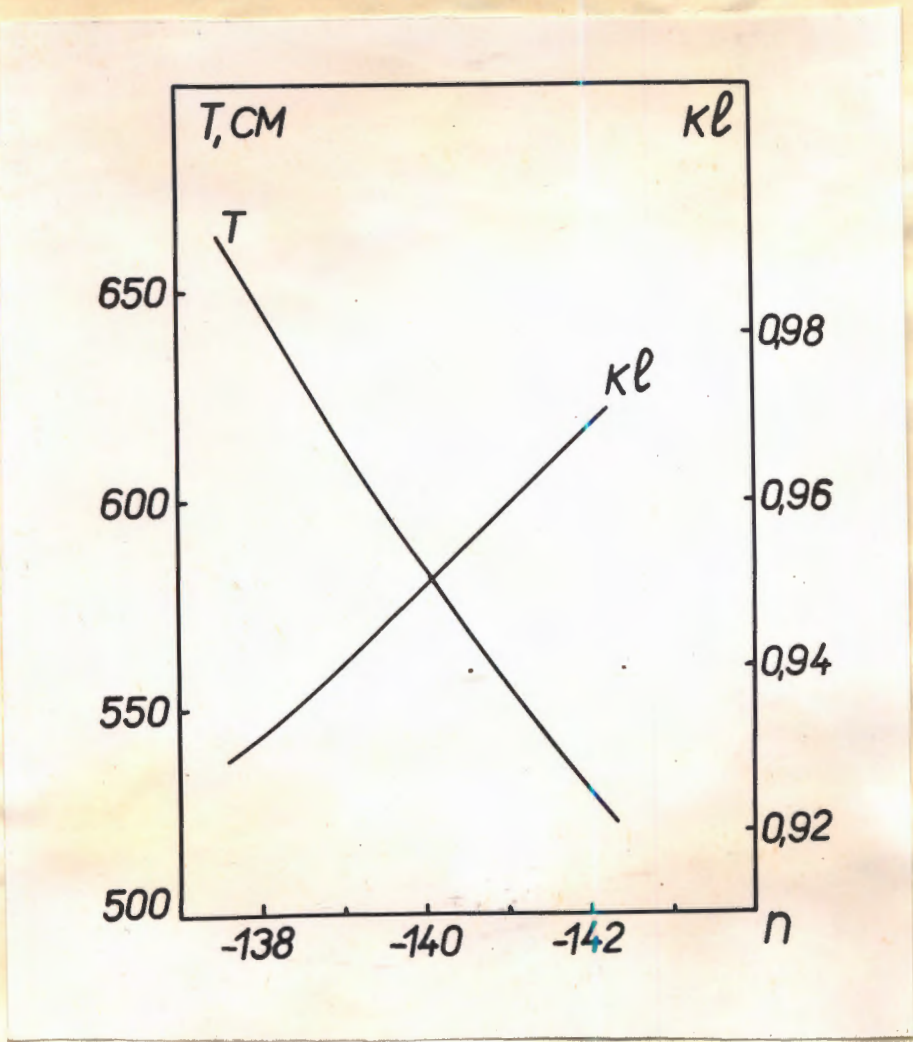


Fig. 22.

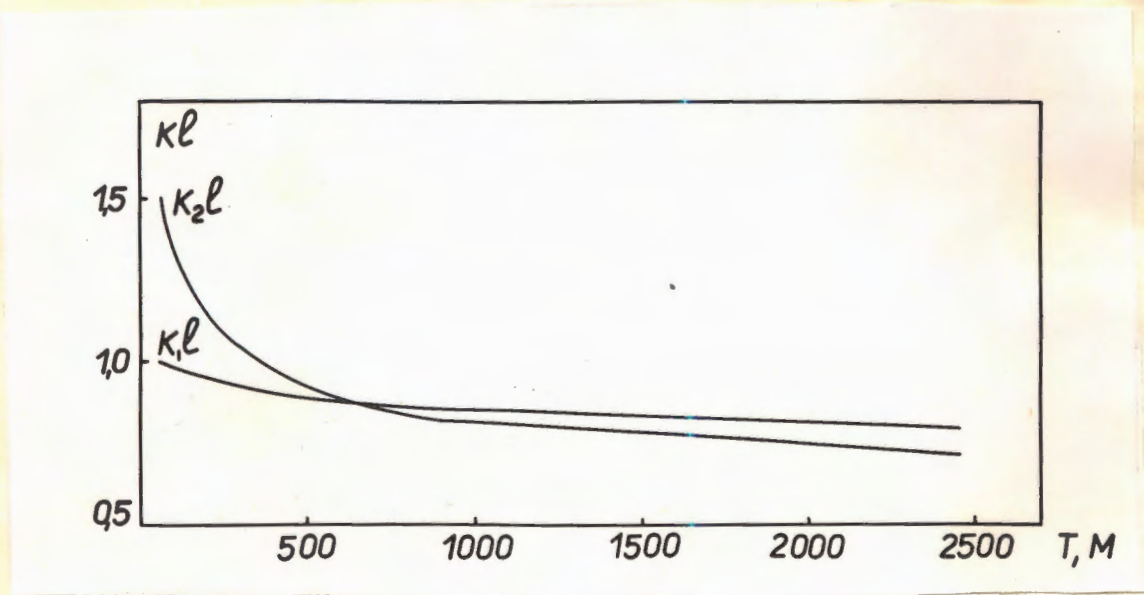


Fig. 23.

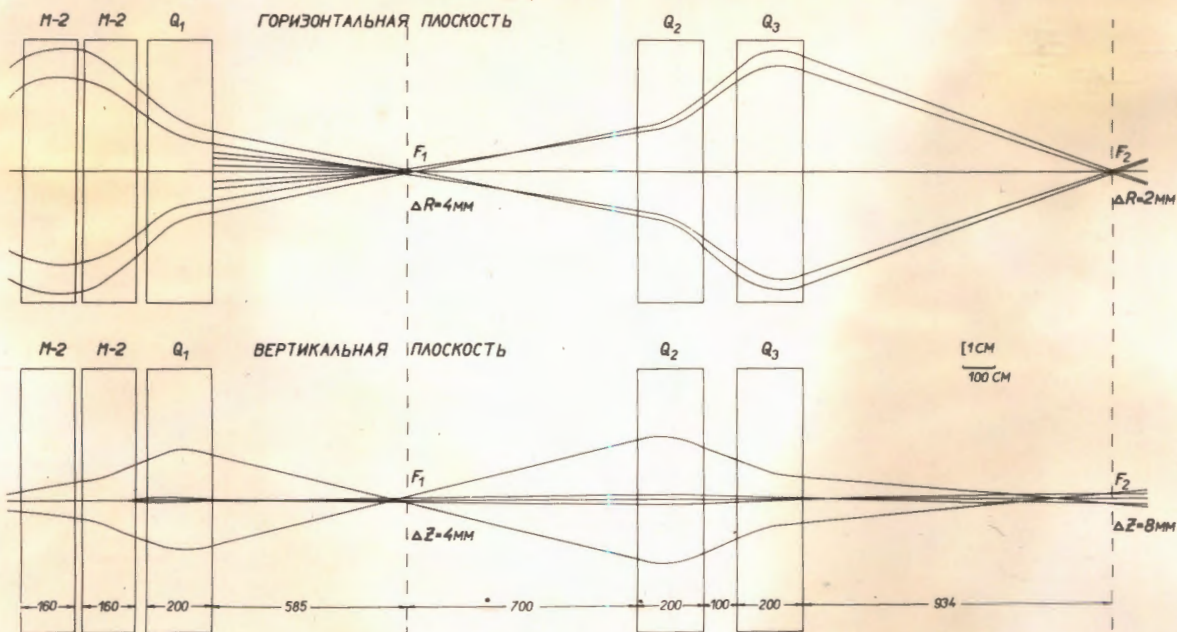


Рис. 24,

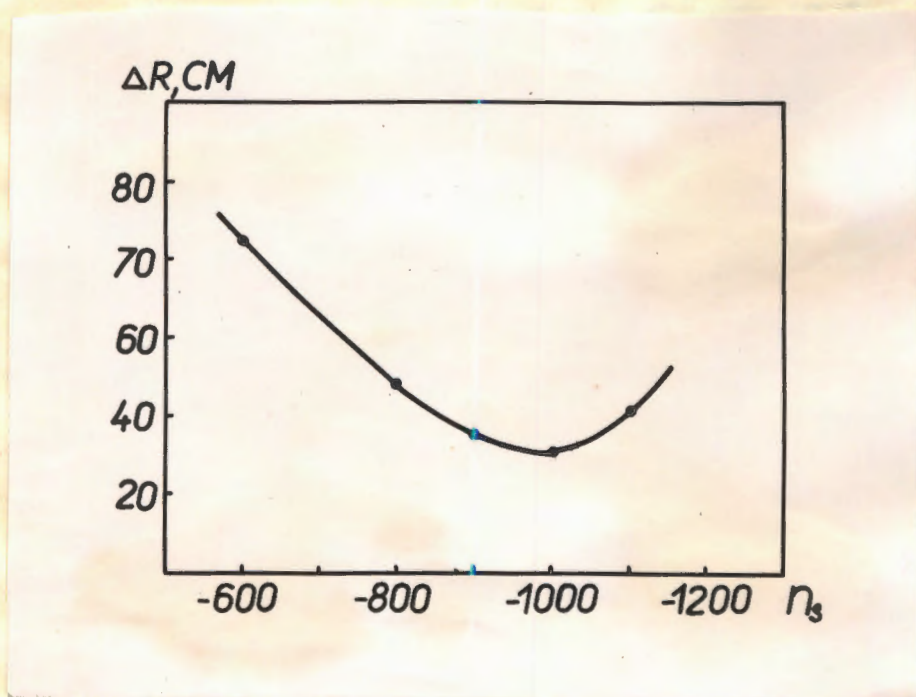


Рис. 25

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Схема медленного вывода и система полярных координат, I, II, III, IV - квадранты ускорителя.  $O_1, O_2, O_3, O_4$  - центры полярных систем координат каждого квадранта, 1 - область существования резонансного возмущения, 2 - септум-магнит,  $R_0 = 2800$  см - центральный радиус ускорителя.

Рис.2. Зависимость  $n$  от радиуса при индукции 12600гс (кривая 1) и величина  $\Delta n$  при токе 340а (кривая 2). Распределение  $n + \Delta n$  (кривая 3); 1, 2, 3, 4 - шины резонансной обмотки, расположенные на  $R_0 + 5$  и  $R_0 + 15$  см.

Рис.3. Зависимость  $B_z$  от радиуса в квадрантах III и IV (кривая A), в квадрантах I и II при "поле 1" (кривая 1) и при "поле 2" (кривая 2) при том же расположении проводников, *что и на рис 2.* По оси абсцисс отложено расстояние  $\pm \rho$  от центрального радиуса ускорителя  $R_0$  по оси ординат  $B_z/B_{z0}$  в процентах.

Рис.4. Искажение поля в квадрантах ускорителя (а) и искаженная радиальная проекция орбиты (б) на  $R = 2790$  см.

Рис.5. Зависимость  $n(R) + \Delta n(R)$  в I и II квадрантах при расположении шин резонансной обмотки на  $R_0$  и  $R_0 + 10$  см и токе во внутренней шине ИВЗ(5)  $I = 340$ а (кривая 3). Кривая 1 - зависимость  $n(R)$ , кривая 2 - зависимость  $\Delta n(R)$ , 3 и 4 - шины резонансной обмотки на нижнем полюсе ускорителя.



Рис.13. Искаженная радиальная орбита на  $R_n = 2790$  см для случая в). (Кривая 1) и траектория с  $a = 6$  см (кривая 2)), 3 - положение септум-магнита.

Рис.14. Распределение плотности протонов по зазору магнита для случая в). Обозначения прежние.

Рис.15. Зависимость  $\alpha(N)$  на входе септум-магнита для случая в). Обозначения прежние.

Рис.16. Временная гистограмма протонов для случая в). Обозначения прежние.

Рис.17. Распределение плотности протонов по зазору магнита для случая г). Обозначения прежние.

Рис.18. Зависимость  $\alpha(N)$  для случая г). Обозначения прежние.

Рис.19. Временное распределение протонов для случая г). Обозначения прежние.

Рис.20. Распределение плотности протонов по зазору магнита для случая г) при  $R_g = 2830$  см.

Рис.21. Зависимость радиального размера пучка на выходе из ускорителя от  $N_s$  в септум-магните, длиной 80 см ( $\beta_s = 0.01477$  рад, случай б), начало вывода)

Рис.22. Зависимость силы линзы  $k_l$  и расстояния до стигматического изображения  $T$  от  $n$  в магнитах в первой ступени системы транспортировки.

Рис.23. Зависимость силы линз  $k_1 l$  и  $k_2 l$  от расстояния до стигматического изображения во второй ступени системы транспортировки. Расстояние до источника - 700 см, расстояние между линзами - 100 см.

Рис.24. Ход крайних траекторий через элементы системы транспортировки: а) горизонтальная плоскость; б) вертикальная плоскость.

Рис.25. Зависимость радиального размера пучка на выходе из ускорителя от  $n_s$  в септум-магните ( $\beta_s = 0,012$  рад,  $l_s = 400$  см,  $R_s = 2830$  см, случай г).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова, В.Н.Лысяков, К.П.Мызников, Н.И.Павлов, Тараканов Н.М. Доклад на VI Международной конференции по ускорителям, Кэбридж, 1967.
2. К.П.Мызников. Препринт ОИЯИ Р-2537, Дубна, 1966 г.
3. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова, К.П.Мызников, Л.М.Панченко, Р.Н.Федорова. Доклад на Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1968 г.  
Атомиздат.
4. Б.В.Василишин, Е.М.Кулакова, Л.М.Панченко, Р.Н.Федорова. Отчёт ОИЯИ Б-2-94063, Дубна, 1968 г., препринт ОИЯИ 9-4223, Дубна, 1968 г.
5. Н.Б.Рубин. Диссертация.
6. Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, В.И.Котов, Е.М.Кулакова, К.П.Мызников, Н.И.Павлов. Препринт ОИЯИ Р-2387, Дубна, 1965 г.
7. Е.М.Кулакова, К.П.Мызников, Л.А.Смирнова, Б.В.Феокистов. Препринт ОИЯИ Р-2880, Дубна, 1966 г.
8. Е.М.Кулакова. Сообщения ОИЯИ, 9-4386, Дубна, 1969 г.
9. Б.В.Василишин, И.Б.Иссинский, Е.М.Кулакова. Сообщения ОИЯИ 9-4385, Дубна, 1969 г.