

C345

E-645

+



Б 1 - 1514

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ,  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

"Утверждаю"

Директор Лаборатории  
ядерных проблем ОИЯИ

*А. П. Дзелепов* (А. П. Дзелепов)

" 30 " июля 1960 года

C 345

E - 645

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ПУЧКА ПРОТОНОВ  
В ШЕСТИМЕТРОВОМ СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ  
(ДВУХКАСКАДНОЕ УСКОРЕНИЕ).

Отчет составили:

*И. Гусев*  
*Савенков*  
*Сафонов*

И. Б. Енчевич  
А. Л. Савенков  
А. Н. Сафонов

под редакцией М. Ф. Пульги

Руководитель группы  
синхроциклотрона

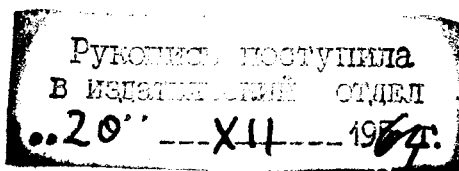
*М. Ф. Пульга*  
М. Ф. Пульга

Ведущий инженер

А. Л. Савенков



г. Дубна, 1960 год.



с. ф. 489

О Г Л А В Л Е Н И Е

	стр.
Краткое содержание . . . . .	<u>3</u>
В в е д е н и е . . . . .	<u>4</u>
Глава I. Расчет режимов предварительного ускорения	<u>7</u>
А. Циклотронный режим . . . . .	<u>7</u>
Б. Стохастический режим . . . . .	<u>15</u>
Глава II. Резонансная система нестиметрового синхротро- хротрона при двухкаскадном ускоре- нии. . . . .	<u>21</u>
Глава III. Высокочастотный генератор . . . . .	<u>29</u>
Глава IV. Радиотехнические измерения . . . . .	<u>30</u>
А. Измерения на макете резонансной системы . . . . .	<u>30</u>
Б. Измерения на резонансной системе синхротрона . . . . .	<u>31</u>
Глава V. Исследование работы синхротрона в режиме двухкаскадного ускорения	<u>34</u>
В в о д ы . . . . .	<u>39</u>
З а к л ю ч е н и е . . . . .	<u>40</u>
Л и т е р а т у р а . . . . .	<u>42</u>

Краткое содержание.

Обсуждены предпосылки для постановки работ по исследованиям двухкаскадного ускорения. Приведены расчеты режимов предварительного ускорения (циклотронного и стохастического) с учетом параметров действующего синхроциклотрона. Описаны радиотехнические устройства, примененные для питания каскада предварительного ускорения, экспериментальные исследования, проведенные на макете вч системы и на действующем синхроциклотроне, и результаты этих исследований. Сделаны соответствующие выводы.

## В в е д е н и е

Известно, что в современных синхроциклотронах на энергии в сотни Мэв величина тока внутреннего пучка протонов не превышает 1 мка.

В работе Келлера, Фидекаро и Барбье /1/ произведен расчет интенсивности пучка протонов для синхроциклотрона ЦЕРН<sup>а</sup> с учетом пространственного заряда. Этот расчет показал, что при амплитудах ускоряющего напряжения, которые используются в настоящее время в крупных синхроциклотронах, теоретический предел тока пучка не может быть существенно больше 1 мка.

Многочисленные эксперименты показали, что на радиусах до 13 - 15 см теряется основная часть частиц, захваченных из ионного источника.

Этот факт наталкивает на мысль о том, что если бы тем или иным способом удалось получить вне области больших потерь достаточное число ионов, часть которых захватывалась бы в ускорение до конечных радиусов, то интенсивность пучка на этих радиусах была бы пропорциональна числу ионов, накопленных в центральной области (до радиусов 25 - 30 см).

С этой точки зрения для увеличения тока ускоренных частиц наиболее приемлемым является двухкаскадный метод ускорения. Идея двухкаскадного ускорения заключается в том, что вначале происходит предварительное ускорение частиц до радиусов 25 - 30 см, а затем основное ускорение до конечного радиуса. Предварительное ускорение необходимо производить в одном из режимов, обеспечивающих на радиусах 25 - 30 см токи ионов в сотни и тысячи раз превосходящие синхроциклотронный ток на этих радиусах. Только при таком условии

можно получить значительный выигрыш в интенсивности пучка на конечных радиусах.

Наиболее простым режимом предварительного ускорения является циклотронный режим. Теория и практика циклотронного ускорения достаточно хорошо разработана и поэтому в принципе не представляется невыполнимым получение в наших условиях на радиусах 25-30 см тока в  $I - 1,5$  ма.

Проявившийся недавно интерес к стохастическому (вероятностному) ускорению, теоретические исследования этого метода <sup>/2/</sup> и экспериментальная его проверка <sup>/3/</sup>, проведенные в ЦЕРН<sup>е</sup>, позволяют считать стохастический режим пригодным для накопления значительного пространственного заряда в центральной области (до радиусов 25-30 см) с последующим переходом к синхроциклотронному режиму.

Важно отметить, что осуществление двухкаскадного метода ускорения не связано с коренными конструктивными изменениями в действующем синхроциклотроне и не должно повлиять на его работу в обычном режиме.

Ускоряющее электрическое поле можно получить при помощи дополнительного электрода, на который подается соответствующее напряжение. Дополнительный электрод должен быть расположен в центре ускорительной камеры против дуганта.

Кроме указанных выше двух режимов предварительного ускорения, дополнительный электрод дает возможность исследовать еще один способ повышения интенсивности. При помощи этого электрода, настроенного в резонанс на частоты захвата, можно в несколько раз увеличить амплитуду ускоряющего напряжения на этих частотах и тем самым увеличить эффективность отсоса ионов из источника

В главе I приведены расчеты режимов предварительного ускорения (циклотронного и стохастического) с учетом параметров действующего синхроциклотрона. В последующих главах (II - V) описаны радиотехнические устройства, примененные для питания каскада предварительного ускорения, экспериментальные исследования двухкаскадного ускорения, результаты этих исследований, а также сделаны соответствующие выводы.

## ГЛАВА I.

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ.А. Циклотронный режим.

Циклотронный режим предварительного ускорения можно осуществить, подавая на дополнительный ускоряющий электрод высокочастотное напряжение с амплитудой в несколько десятков кв.

Ввиду того, что при циклотронном ускорении ионы совершают всего лишь одно фазовое колебание, нужно наилучшим образом выбрать частоту ускоряющего напряжения, принимая во внимание амплитуду этого напряжения, конечный радиус предварительного ускорения, спад напряженности магнитного поля по радиусу и значения так называемой "фазы поворота", т.е. фазы, при которой в процессе ускорения частота обращения протона становится равной частоте ускоряющего напряжения. Очень удобно произвести такой расчет графоаналитически, построив кривую спада магнитного поля по радиусу (рис. I) и нанеся на этот график семейство кривых резонансного магнитного поля для разных частот ускоряющего напряжения. Расчет кривых резонансного магнитного поля достаточно провести в первом приближении по формуле<sup>/5/</sup>

$$H_{рез.} \approx H_0 \left( 1 + \frac{2\pi^2 f^2}{c^2} \cdot R^2 \right) \quad (1)$$

где  $H_0 [эрсг]$  - напряженность магнитного поля в центре ускорителя;  
 $f [гц]$  частота ускоряющего напряжения,  
 $R [см]$  - радиус,  
 $c [см/сек]$  - скорость света в вакууме.

Но для каждого значения  $f$  удобно находить по формуле

$$H_0 = \frac{2\pi f \cdot E_0}{300 e \cdot c} \quad (2)$$



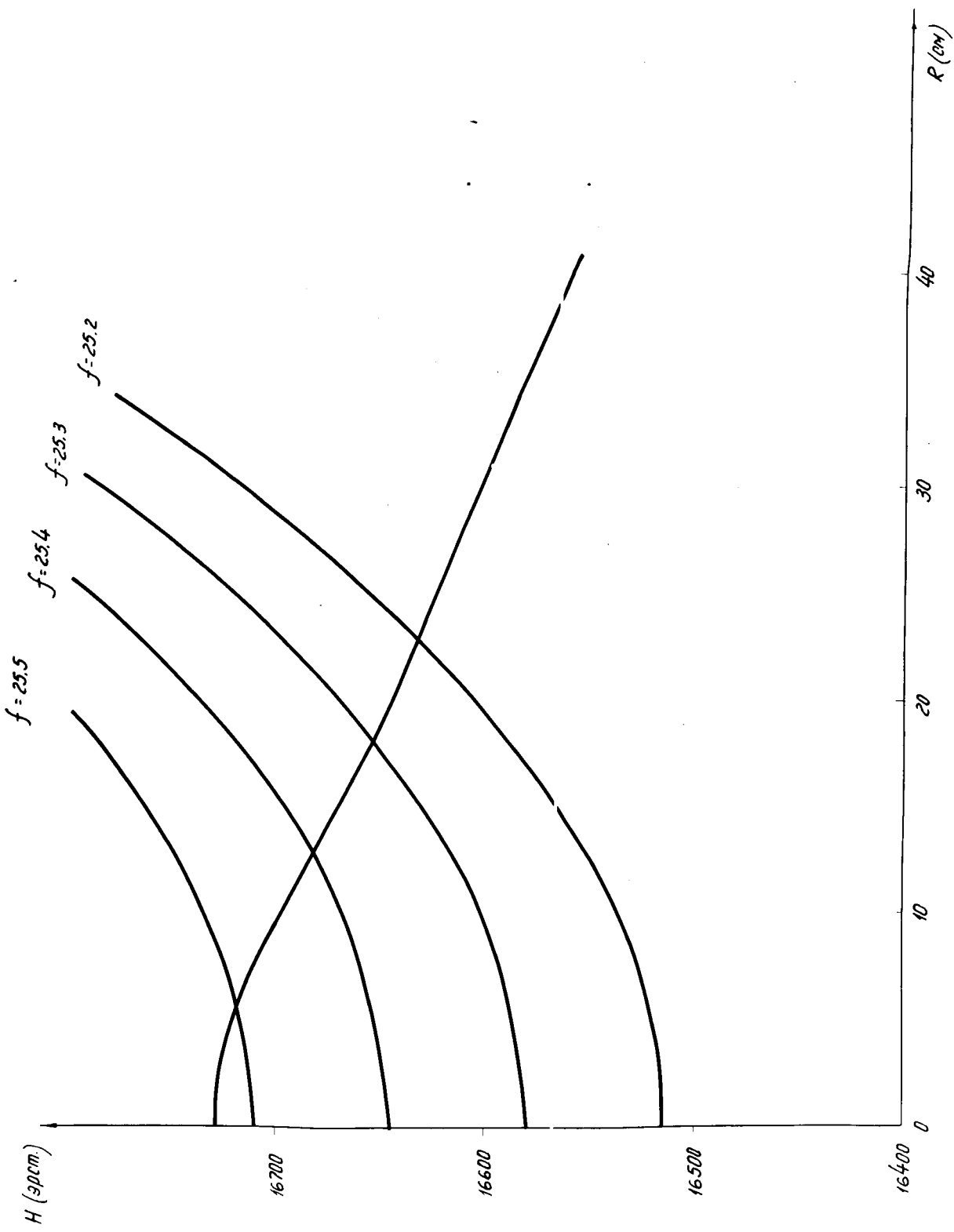


Fig. 1.

где  $E_0$  [эв] - энергия покоя протона.

Кроме того, для расчета потребуется зависимость кинетической энергии протона от радиуса орбиты, а также серия кривых, показывающих зависимость величины ускоряющего напряжения от конечного радиуса циклотронного ускорения для диапазона фаз поворота  $-30^\circ > \varphi_{пов} > -90^\circ$ .

Так как при предварительном ускорении кинетическая энергия протона остается значительно меньшей его энергии покоя ( $W \ll E_0$ ) для расчета зависимости  $W = W(R)$  можно воспользоваться нерелятивистской формулой:

$$W = \frac{(300 H R)^2}{2 E_0} \quad (3)$$

где  $H$  [эрсг] - напряженность магнитного поля на радиусе  $R$ .  
График  $W = W(R)$  изображен на рис.2.

Формулу для расчета зависимости величины ускоряющего напряжения  $U$  от конечного радиуса ускорения легко вывести преобразовав выражение, показывающее как изменяется предельная энергия ускорения в циклотроне от ускоряющего напряжения, начальной фазы и "фазы поворота" [5]

$$W_{пред} = 2 \sqrt{\frac{2eUE_0}{\pi} (\sin \varphi_{нач} - \sin \varphi_{пов})} \quad (4)$$

Легко может быть показано, что  $\varphi_{нач} = 0$  [1,2]  
Переписав формулу (4) в виде  $U = U(W_{пред}, \varphi_{пов})$   
и подставив числовые значения постоянных величин, получим следующую расчетную формулу:

$$U = 0,42 \frac{W_{пред}^2}{\sin \varphi_{пов}} \quad (5)$$

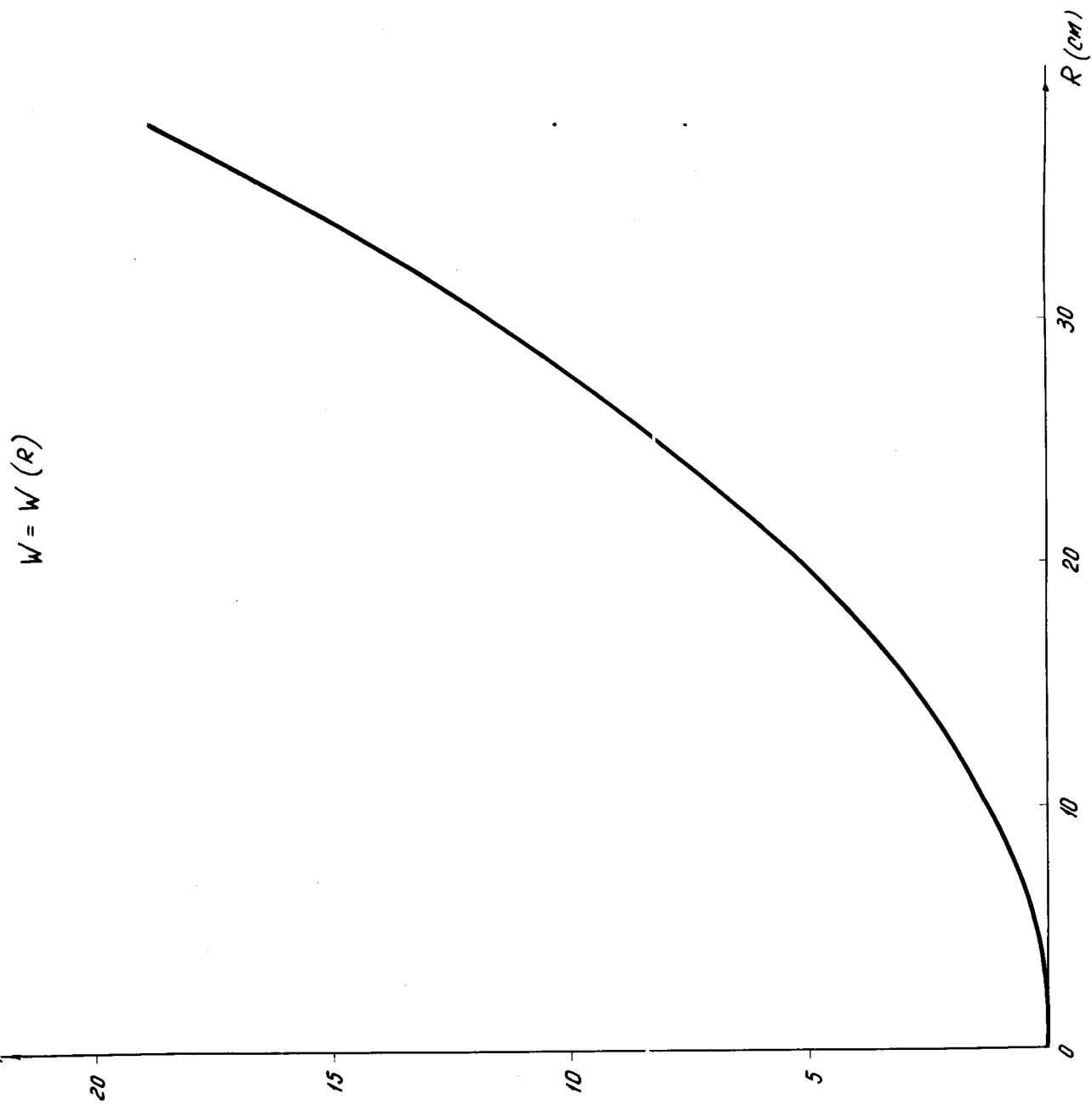


Рис. 2.

где:  $U$  [кВ] - амплитуда ускоряющего напряжения;  
 $W_{\text{прег}} [МэВ]$  - предельная энергия ускорения.

В таблице I приведены значения  $U$  для нескольких значений  $W_{\text{прег}}$  и  $\varphi_{\text{пов}}$ . Пользуясь кривой  $W = W(R)$  (рис.2) легко построить серию кривых  $U = U(R)$  для разных значений  $\varphi_{\text{пов}}$  (см.рис.3).

Таблица I.

$\varphi_{\text{пов}}$ $W_{\text{прег}} (МэВ)$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$R$ [см]
20	335	260	219	194	167	39,3
16	214	267	140	124	107	35,1
12	121	94	79	70	60	30,4
8	54	42	35	31	27	24,8
4	13	10	9	8	7	17,5

Очевидно, что с увеличением конечного радиуса предварительного ускорения увеличивается и накопленный пространственный заряд. Однако, это приводит к необходимости резко увеличивать ускоряющее напряжение ( $U \sim R^4$ ). В.Ч. генератор, который предполагается использовать для циклотронного режима, а также конструктивные особенности подвода ускоряющего напряжения к дополнительному электроду не даст возможности поднять ускоряющее напряжение выше 100 кв. Как видно из рис.3, не следует конечный радиус циклотронного ускорения выбирать большим 30 см, так как при этом обеспечить необходимое ускоряющее напряжение весьма затруднительно.

Найдем зависимость частоты ускоряющего напряжения от амплитуды для конечных радиусов предварительного ускорения в диапазоне от 20 до 30 см при оптимальном значении фазы  $\varphi_{\text{пов}} = 80^\circ$ .



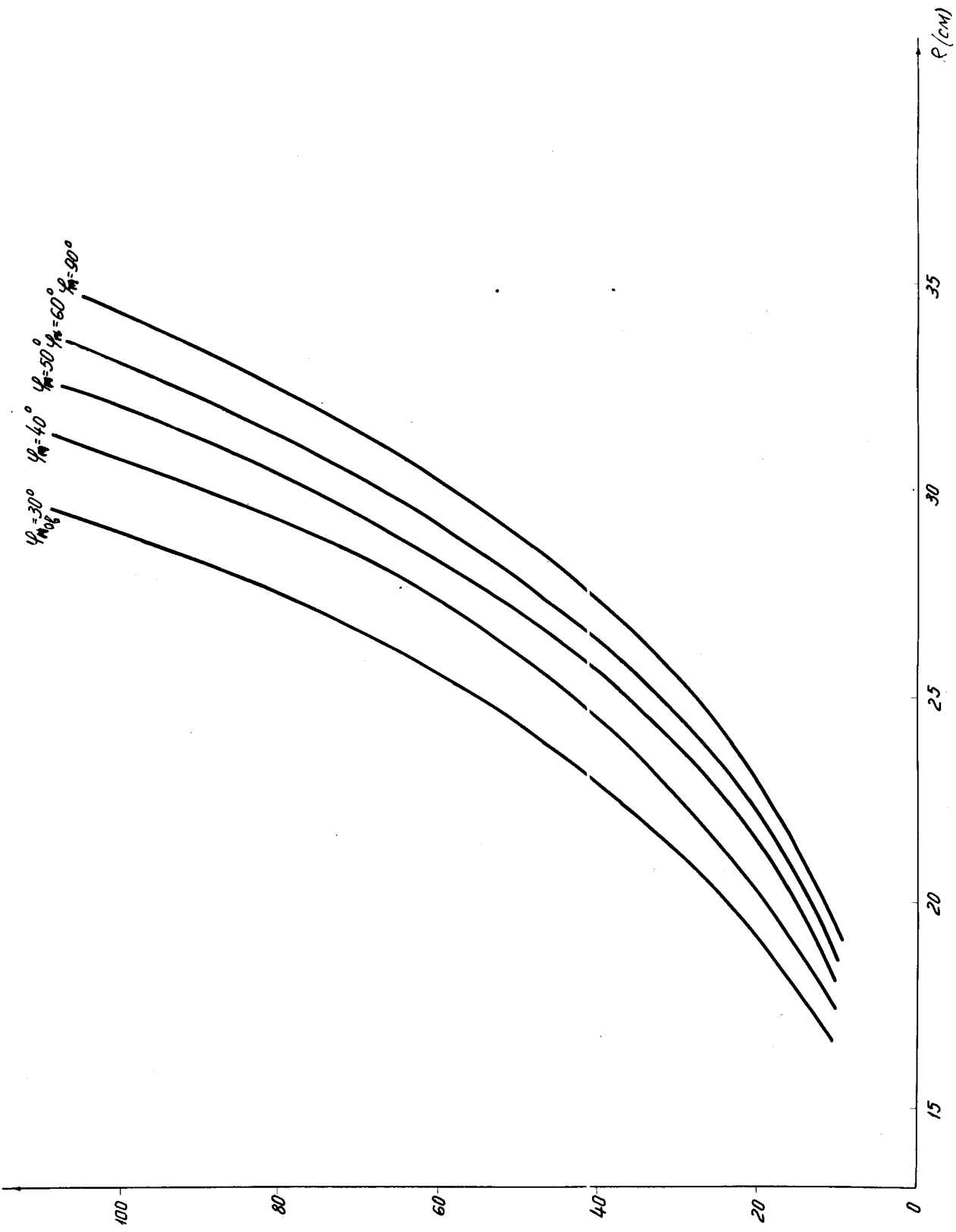


Рис. 3.

Пользуясь графиками, изображенными на рис.1,2 и 3, можно построить зависимость  $f = f(U)$ . Предположим, что амплитуда ускоряющего напряжения  $U = 60$  кв. По графику рис.3 находим, что протоны будут ускоряться до радиуса  $R_{\text{ком}} = 30$  см. Из рис.2 находим

$W_{\text{ком}} = 11,7$  Мэв, а треть предельной энергии будет набрана на

$R_{1/3} = 18,0$  см. На этом радиусе должны пересекаться кривая спада напряженности магнитного поля по радиусу и кривая резонансного магнитного поля. Из этого условия, пользуясь рис.1, находим значение частоты ускоряющего напряжения  $f$ . Аналогичным образом рассчитывается  $f$  для других значений  $U$ . График  $f = f(U)$  приведен на рис.4.

Для того, чтобы рассчитать насколько может увеличиться ток внутреннего пучка при использовании циклотронного метода предварительного ускорения, нужно знать величину заряда, который накапливается при этом в центральной области ускорителя (до  $R = 25+30$  см). Кроме того, следует принять во внимание время жизни накопленного заряда после отключения циклотронного ускоряющего напряжения и оценить, какая доля накопленного заряда захватывается в режим основного ускорения.

В работе<sup>/2/</sup> приводится методика, при помощи которой можно определить накопленный заряд, если известны время ускорения в циклотронном режиме и средний циклотронный ток. Используем для определения среднего тока зависимость циклотронного тока от радиуса  $i = i(R)$  (рис.5), экспериментально полученную на полтораметровом циклотроне Института атомной энергии им.Курчатова АН СССР<sup>/7/</sup>. Мы вправе это сделать, так как эта кривая служит лишь для оценки заряда, который может быть накоплен при циклотронном ускорении.

25.4

25.3

25.2



[K<sup>6</sup>]

Рис. 4.

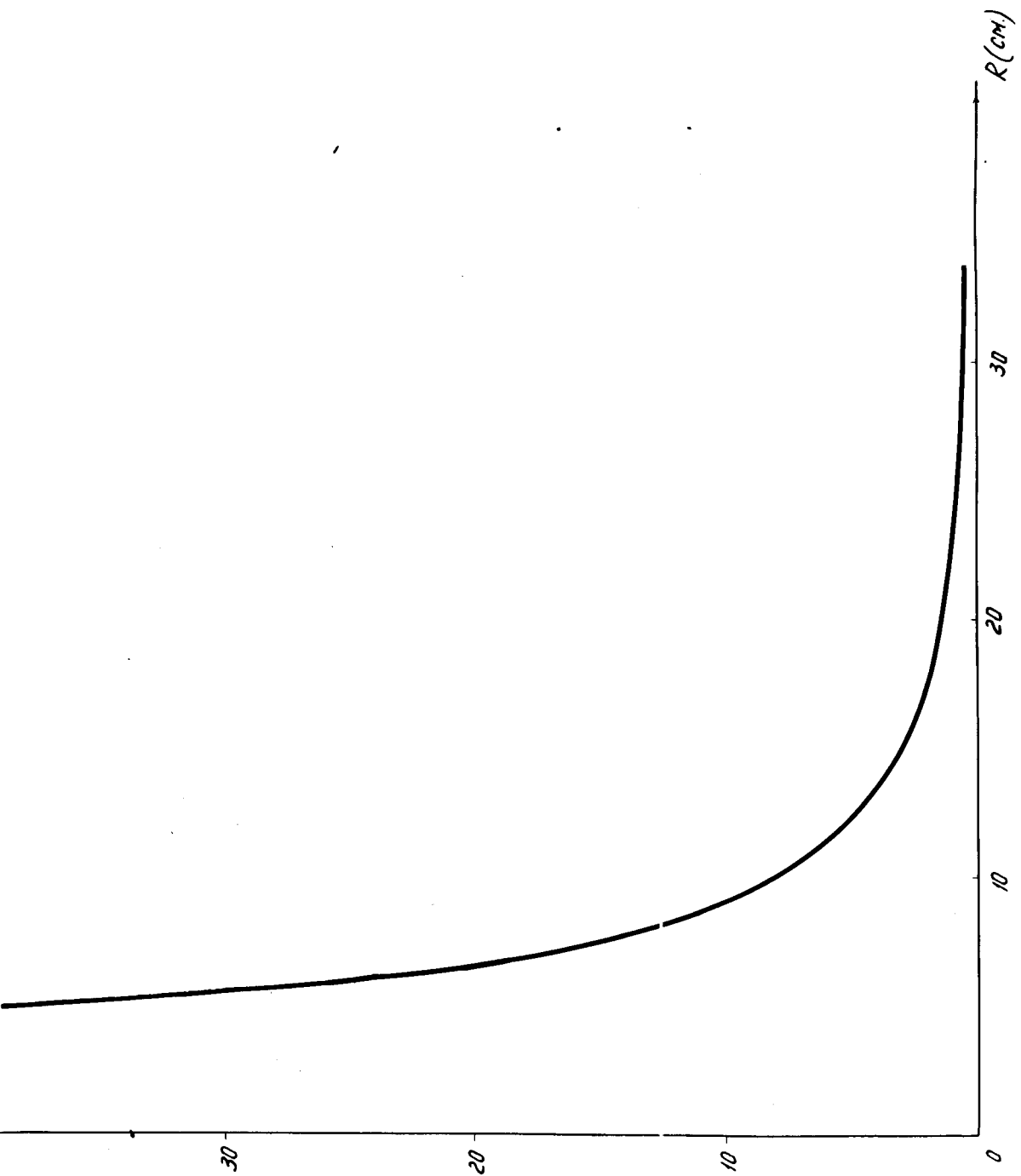


Рис. 5.



Величину заряда, который может быть накоплен при циклотронном ускорении, можно было бы найти по формуле:

$$q_n = i T, \quad (6)$$

где:  $i$  - ток протонов;  
 $T$  - время ускорения.

Однако в течение времени ускорения протонов от центра до конечного радиуса циклотронный ток уменьшается, поэтому накопленный заряд следует находить графическим интегрированием кривой

$i = i(T)$  (рис.6), принимая во внимание, что

$$q_n = \int_t^T i(t) dt$$

Кривая  $i = i(t)$  построена при помощи рассчитанной в работе <sup>16/</sup> зависимости числа оборотов протона от радиуса. Графическое интегрирование дает для  $q_n$  величину, равную  $15 \cdot 10^{-9}$  кул. Так как циклотронный режим будет продолжаться значительно большее время, чем  $T$  (несколько мсек), то полный накопленный заряд будет в два раза больше  $q_n$ :  $Q_n = 2q_n = 30 \cdot 10^{-9}$  кул из-за того, что протоны не используются на конечном радиусе циклотрона, а начинают возвращаться к центру ускорителя, как только попадают в замедляющий полупериод  $\beta c$  напряжения.

Основной причиной, вызывающей уменьшение величины накопленного заряда в циклотроне, является многократное кулоновское рассеяние на атомах остаточного газа <sup>14,8/</sup>. В работе <sup>18/</sup> выведена формула для расчета константы накопленного пучка (т.е. величины обратной времени жизни)

$$\lambda = \tau^{-1} = (1,15)(2,40)^2 R^2 \frac{\langle \theta^2(t) \rangle}{4 \sigma^2 n t}, \quad (7)$$

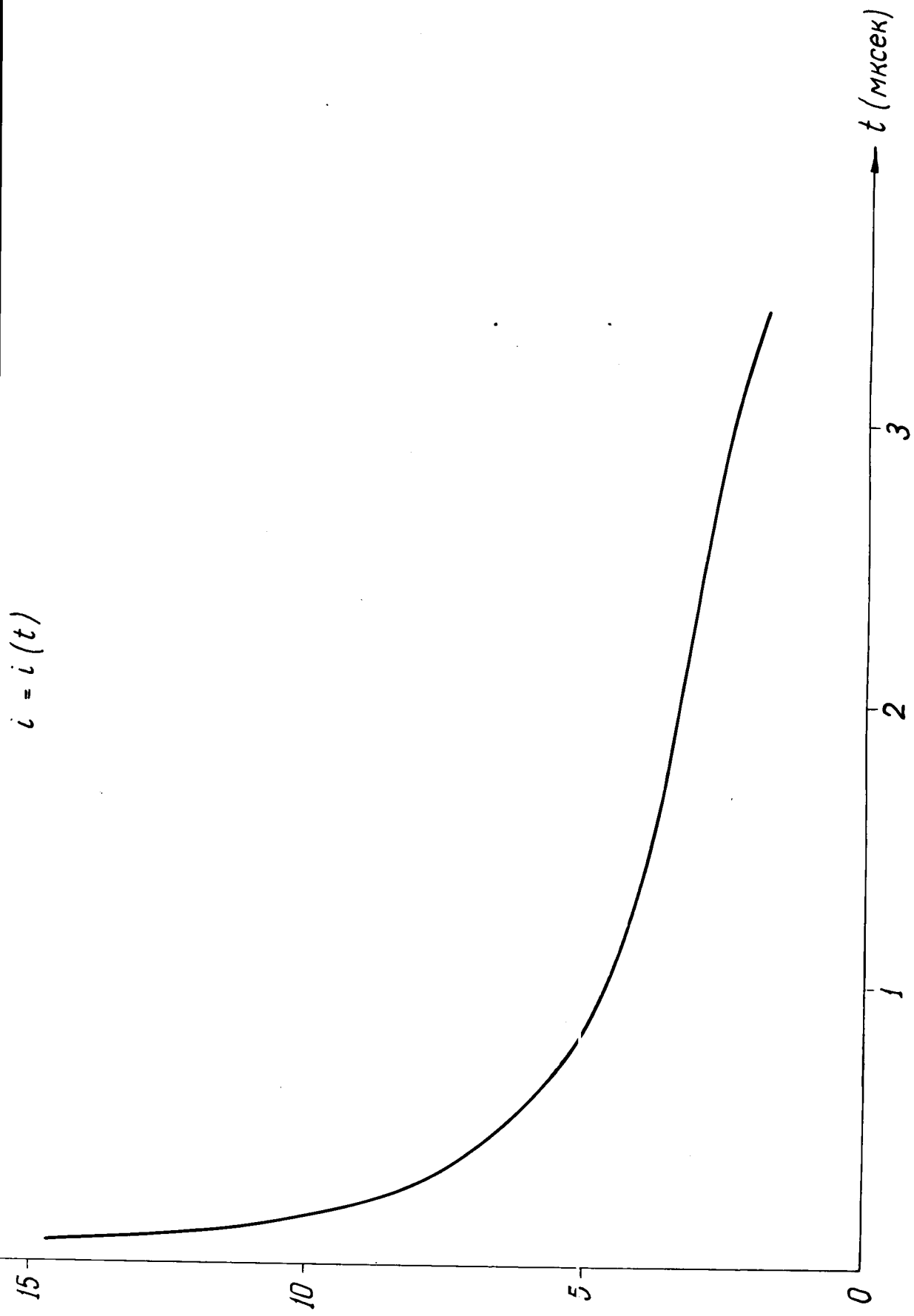


Рис. 6

где:  $\tau$  - время жизни накопленного пучка;

$R$  - радиус накопления;

$d$  - половина апертуры дуанта;

$n$  - показатель спада магнитного поля;

$t$  - произвольный интервал времени;

$\langle \theta^2(t) \rangle$  - средний квадрат угла многократного рассеяния, накопившегося за время  $t$ , причем  $\frac{\langle \theta^2(t) \rangle}{t}$  не зависит от  $t$ ;

2,40 - первый корень функции Бесселя нулевого порядка;

1,45 - коэффициент, учитывающий вклад однократного кулоновского рассеяния.

В нашем случае не было возможности воспользоваться той методикой для нахождения величины  $\frac{\langle \theta^2(t) \rangle}{t}$ , которая указана в работе /8/. Однако, учитывая, что

$$\langle \theta^2(t) \rangle = \frac{15^2}{(Pv)^2} \frac{\ell}{X_0} \quad (8)$$

где  $Pv$  в Мэв  $\ell$  - количество газа в г/см<sup>2</sup>, а  $X_0$  - радиационная длина в г/см<sup>2</sup>, и поделив обе части (8) на  $t$ , получим

$$\frac{\langle \theta^2(t) \rangle}{t} = \frac{15^2}{P^2 v} \cdot \frac{\ell}{vt} \cdot \frac{1}{X_0} \quad (9)$$

где  $\ell/vt$  [г/см<sup>3</sup>] - плотность остаточного газа, которую можно рассчитать в зависимости от давления  $P$  и абсолютной температуры  $T$  /9/.

Для расчета необходимо знать, как изменяется давление в камере с удалением от источника ионов. На рис. 7 приведена зависимость давления от радиуса для расхода газа  $S = 34$  см<sup>3</sup>/мин. Окончательно получается следующая формула для расчета константы распада накопленного заряда:

$$\lambda = \tau^{-1} = 0,72 \cdot 10^{10} \frac{R^2 P W}{(2d)^2 n T X_0 P^2 \beta} \quad (10).$$

$\rho$  [mm pt. cm.]

$$\rho = \rho(R)$$

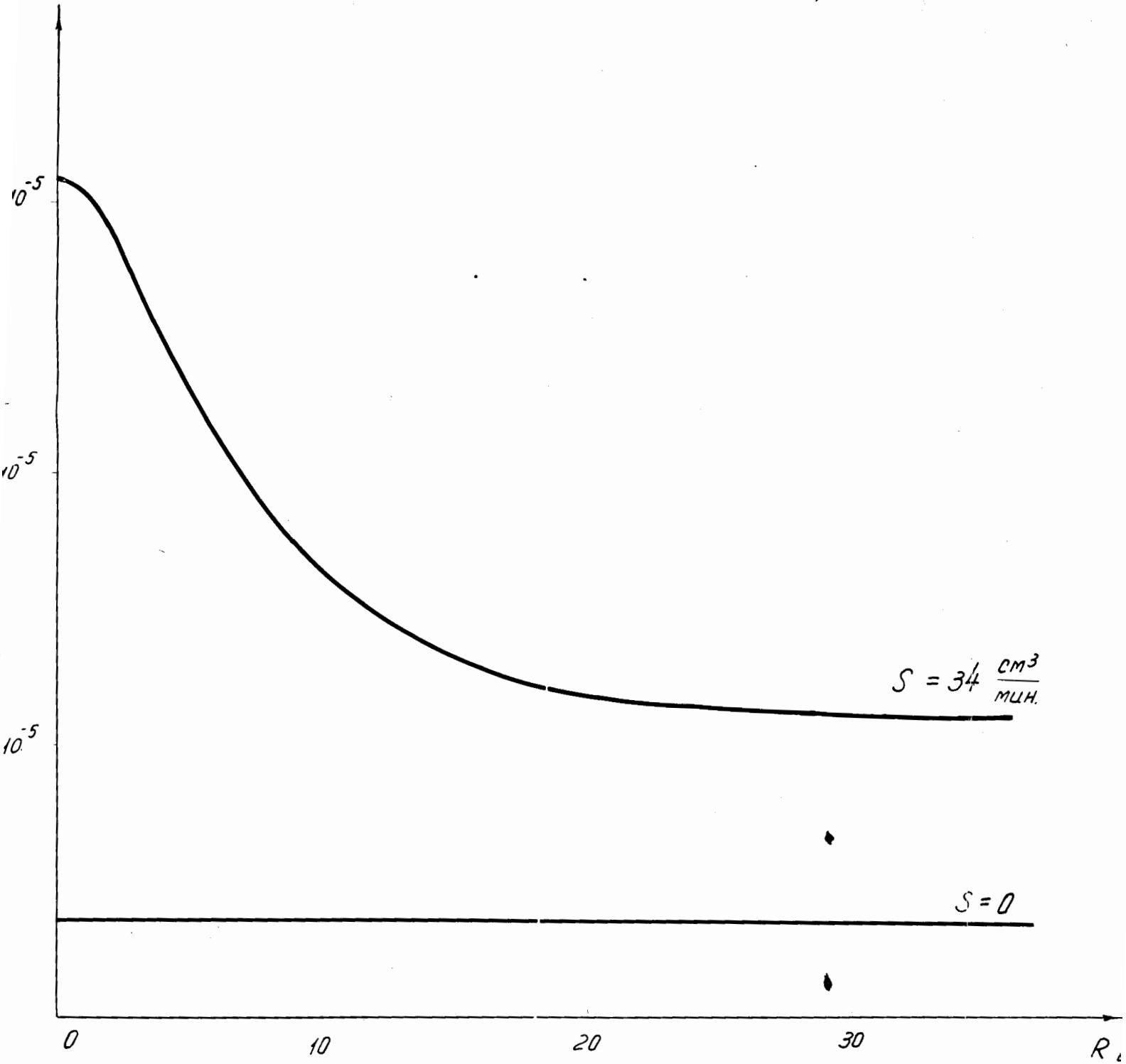


Рис. 7.



(10)

В этой формуле, кроме уже известных обозначений (см. формулу 7), приняты следующие:

$P [\frac{MeV}{c}]$  - импульс протонов;

$\beta = \frac{v}{c}$  - относительная скорость протонов;

$P [мм рт. ст.]$  - давление в камере;

$W$  - атомный вес остаточного газа;

$\chi_0$  - радиационная длина;

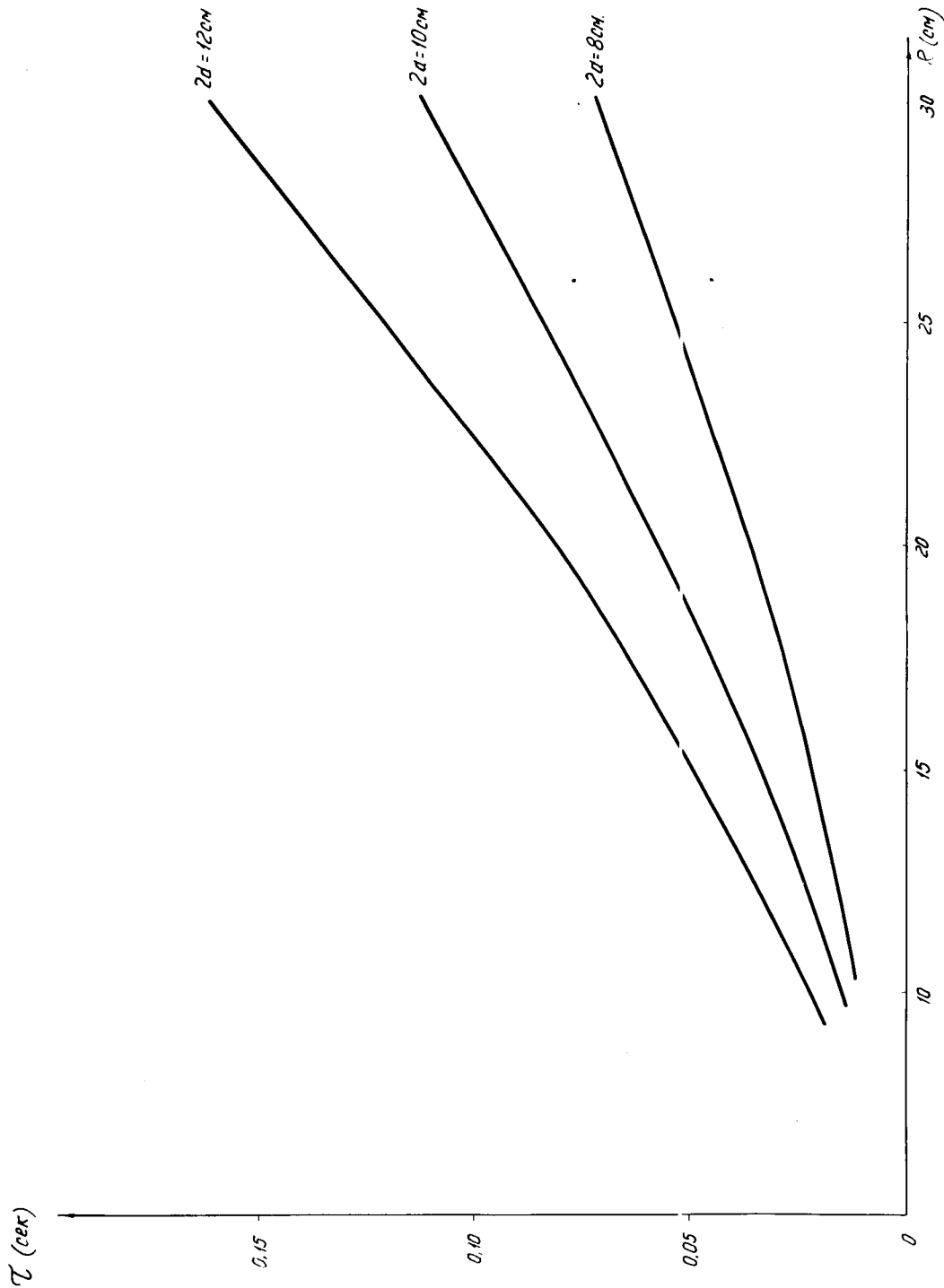
(  $\chi_0 = 38 \text{ г/см}^2$  для азота и  $\chi_0 = 58 \text{ г/см}^2$  для водорода).

По формуле (10) определялась константа распада  $\lambda = \lambda(R)$  для смеси воздуха с водородом при различных апертурах дуанта. Парциальное давление воздуха  $3,5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. (см. рис. 7), парциальное давление водорода на каждом радиусе находилось как разность между давлением в камере при подаче водорода в источник и давлением в камере без подачи водорода. Константа распада в таком случае равна сумме констант распада на атомах азота и на атомах водорода. Результаты расчета приведены в таблице II, а зависимость времени жизни накопленного заряда от радиуса для различных апертур дуанта изображена на рис. 8.

Таблица II.

$\frac{2d [см]}{R [см]}$	$\lambda [сек^{-1}]$			$\tau [сек]$		
	8	10	12	8	10	12
10	87,3	64,9	44,7	0,011	0,005	0,022
15	45,4	29,1	20,1	0,022	0,034	0,050
20	27,6	17,7	12,3	0,036	0,057	0,081
25	18,7	11,9	8,3	0,054	0,084	0,121
30	13,9	8,9	6,2	0,072	0,112	0,162

0.5 (cm)



Дис. 8.

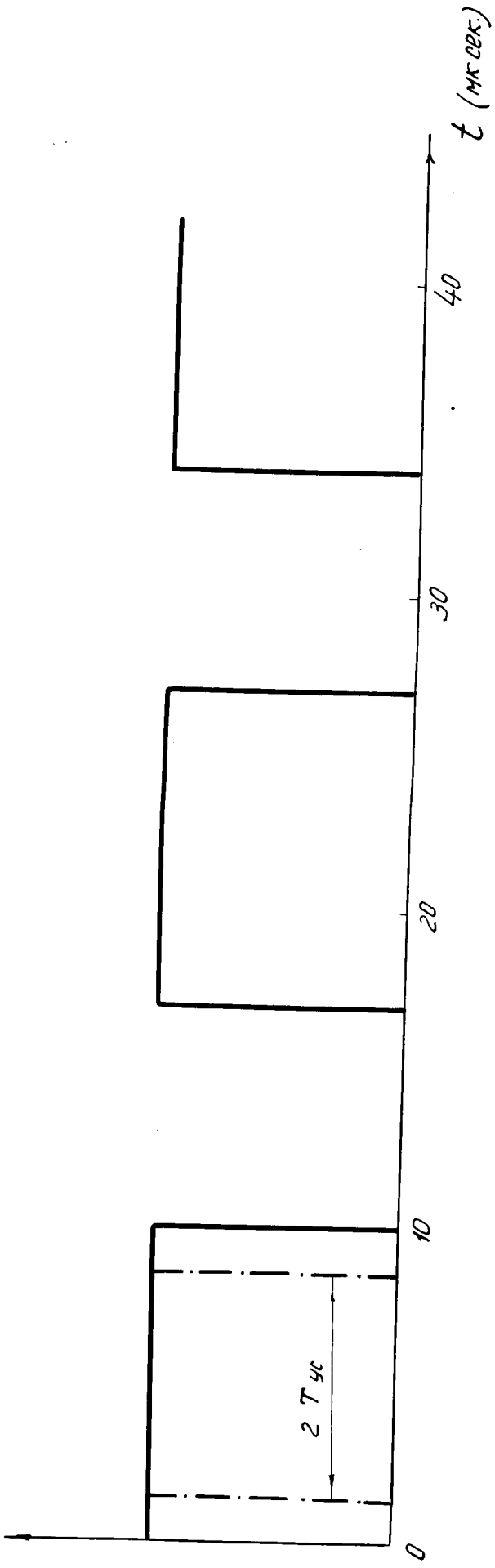
Приведенные расчеты показывают, что накопленный заряд после выключения ускоряющего циклотронного напряжения существует в течение времени в несколько раз большего периода модуляции основного ускоряющего напряжения и за время перехода от предварительного ускорения к основному может потеряться всего лишь незначительная часть накопленного заряда.

Предварительное ускорение в циклотронном режиме достаточно производить в течение времени всего лишь в несколько раз большего времени жизни накопленного заряда и заканчивать непосредственно перед началом основного ускорения. С точки зрения некоторого увеличения накапливаемого заряда, а также для обеспечения большей однородности его по азимуту, что важно при переходе к режиму основного ускорения, имеет смысл подавать циклотронное напряжение импульсами длительностью несколько большей, чем удвоенное время ускорения протонов в циклотронном режиме с промежутками, длительность которых меньше длительности импульса. Примерная временная диаграмма изображена на рис.9.

Захват в синхроциклотронный режим в предположении, что накопленные протоны равномерно распределены на орбитах рассматривается в работе /6/. В основное ускорение захватываются с каждого радиуса предварительного ускорения те частицы, которые при изменении частоты ускоряющего синхроциклотронного напряжения попадают в диапазон устойчивых фаз. Подсчитано, что в режим синхроциклотронного ускорения захватывается примерно 0,8 накопленного в результате предварительного ускорения заряда.

Таким образом, если не учитывать потери частиц из пучка при основном ускорении от  $R = 30$  см до конечного радиуса, то величину тока внутреннего пучка протонов на конечных радиусах можно найти по следующей формуле:

U



Dec 9

$$\dot{I} = 0,8 Q_n \cdot F_{\text{мод}} \quad (\text{II})$$

При частоте модуляции  $F_{\text{мод}} = 80$  гц и  $Q_n = 30 \cdot 10^{-9}$  кул, ток ускоренных протонов  $\dot{I} \approx 2,0$  мка.

В действующем синхроциклотроне интенсивность пучка протонов на конечном радиусе ускорения оценивается величиной 0,3 мка. Таким образом, приведенный расчет показывает, что при циклотронном режиме предварительного ускорения и при учете потерь при ускорении до конечного радиуса интенсивность пучка протонов на этом радиусе может быть увеличена, примерно, в 6 раз.

#### Б. Стохастический режим.

Принцип стохастического (вероятностного) ускорения заключается в следующем: если ускоряющее напряжение имеет вид непрерывного спектра, в котором одновременно присутствуют все частоты между максимальной и минимальной частотами обращения протонов в синхроциклотроне, то в каждый данный момент будет наблюдаться ускорение тех частиц, для которых в этот момент будут соблюдаться необходимые фазовые условия.

Если рассматривать движение протонов в таком ускорителе с помощью полярной диаграммы, то можно заметить почти полную аналогию с броуновским движением молекул в двумерном газе. Поэтому появляется возможность для изучения стохастического ускорения воспользоваться теорией диффузии газов, причем вместо столкновений молекул газа при таком рассмотрении выступает взаимодействие ускоряемых протонов с высокочастотным полем дуанта <sup>12/</sup>.

Уравнение диффузии для стационарного случая имеет вид

$$\text{div } \frac{\lambda}{2} \cdot \text{grad}(w/p) = 0 \quad (\text{I2})$$

Здесь:  $\lambda$  - средний свободный пробег частицы;  
 $W$  - ее средняя скорость;  
 $\rho$  - плотность заряда.

Решая диффузионное уравнение для соответствующих граничных условий можно найти зависимость тока от радиуса в предположении, что объемный заряд ограничивается величиной вертикальной фокусирующей силы, компенсирующей силу отталкивания.

Формула для расчета тока протонов при стохастическом ускорении имеет следующий вид:

$$i = \frac{8 \epsilon_0 B' D U^2}{\pi \sqrt{\omega} B^2 (R-D)} \quad (13)$$

где:  $U$  - среднее квадратичное значение ускоряющего напряжения;

$D$  - апертура дуанта;

$B$  - индукция магнитного поля;

$B'$  - градиент магнитного поля;

$\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная;

$\omega$  - круговая частота обращения протона на орбите радиуса ;

$\nu = \omega_0 - \omega$  - ширина полосы частотного спектра.

Имеющаяся система питания дополнительного ускоряющего электрода ограничивает величину ускоряющего напряжения при заданной ширине полосы частотного спектра.

Величина  $\nu$  в свою очередь зависит от конечного радиуса стохастического ускорения. Хотя накопленный заряд, как будет показано дальше, прямо пропорционален конечному радиусу предварительного ускорения, выбрать этот радиус большим 30 см не имеет смысла, так как необходимая ширина полосы приблизительно пропорциональна квадрату радиуса, а увеличение  $\nu$  приведет к значи-

тельному уменьшению  $U$ .

При конечном радиусе  $R = 30$  см  $\dot{\nu} = 3,7 \cdot 10^6$  рад/сек. и среднее квадратичное значение ускоряющего напряжения в наших условиях ограничивается величиной 8 кв.

Пользуясь формулами, вывод которых дан в работе [2], можно подсчитать некоторые зависимости, характеризующие стохастический режим предварительного ускорения для нашего случая при вышеуказанных значениях  $U$  и  $\dot{\nu}$ .

На рис. 10 изображена зависимость тока от радиуса, рассчитанная по формуле (13). При расчете принималось:

$$B = 16730 \text{ гаусс}, \quad B' = 5,07 \text{ гаусс/см.}$$

( $B'$  найдено графическим дифференцированием кривой спада напряженности магнитного поля (рис. 1),  $U = 8$  кв,  $D = 12$  см,  $\dot{\nu} = 3,7 \cdot 10^6$  рад/сек. Для рационализированной системы MKSM, в которой производился расчет,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ).

Формула (13) выведена в предположении, что при ускорении отсутствуют потери заряда. На самом деле из-за рассеяния на газе потери будут иметь место. Поэтому следует рассмотреть диффузионное уравнение для нестационарного случая:

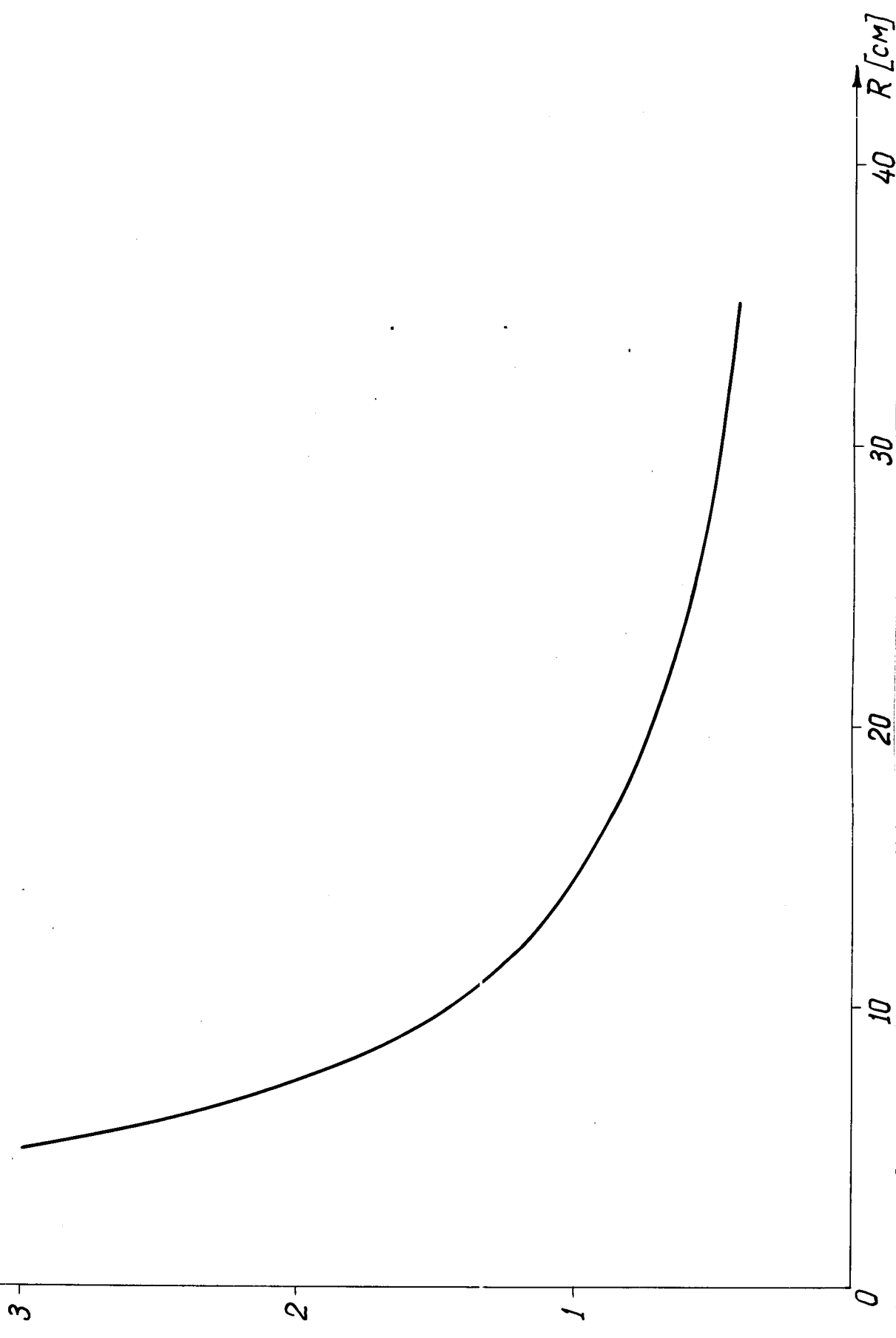
$$\operatorname{div} \frac{\lambda}{2} \cdot \operatorname{grad}(W\rho) - \frac{\rho}{\tau} = \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (14)$$

где  $\tau$  - среднее время жизни ионов. Решая это уравнение, можно получить формулу для определения времени ускорения ионов, при стохастическом ускорении

$$t = \frac{\dot{\nu} B^2 R^4}{5,61 U^2} \quad (15)$$

Время ускорения до радиуса  $R = 30$  см равно 400 мксек.

$\sigma = \sigma(r)$





Так как это время достаточно мало, можно в нерабочий интервал изменения частоты основного генератора накопить в центральной области синхроциклотрона при помощи стохастического ускорения заряд, величина которого определяется силой вертикальной фокусировки. Протоны будут накапливаться до тех пор, пока сила об'емного расталкивания не станет больше силы вертикальной фокусировки, обусловленной спадом магнитного поля. Решая уравнение (12) с граничным условием  $\dot{l}/_{R=R_{\text{ком}}} = 0$ ; можно найти плотность пространственного заряда в медианной плоскости:

$$\rho = \epsilon \cdot \omega R B' \quad (16)$$

Для нашего случая  $\rho = 2,37 \cdot 10^{-5}$  кул/м<sup>3</sup>. При средней высоте пучка 2 см накопленный заряд будет равен  $135 \cdot 10^{-9}$  кул.

При включении основного ускоряющего напряжения с начальной частотой, равной частоте обращения протонов на орбите радиуса  $R = 30$  см, в окончательное ускорение захватятся все протоны, энергия которых будет соответствовать некоторому диапазону энергий  $\Delta E$ , обусловленному радиально-фазовыми колебаниями протонов. Допустимый разброс энергий  $\Delta E$  связан с  $\Delta R$  соотношением:

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta R}{R} \quad (17)$$

Величину тока протонов при синхроциклотронном ускорении можно найти, умножив величину заряда, накопленного в кольце шириной  $\Delta R$ , на частоту модуляции  $F_{\text{мод}}$ :

$$i = \rho 2\pi R \frac{2D}{\pi} \Delta R \cdot F_{\text{мод}} \quad (18)$$

Используя (16 и 17), получим:

$$i = 4\epsilon \cdot (B'/B) R D \cdot F_{\text{мод}} \cdot \Delta E \quad (19)$$

Величина  $\Delta E$  через основные параметры ускорителя может быть выражена следующим образом <sup>/2/</sup>

$$\Delta E = \left( \frac{32 f_0 V}{\pi^3 \frac{df_0}{dE}} \right)^{1/2} \alpha, \quad (20)$$

где:  $V$  - максимальный набор энергии за оборот при синхроциклотронном ускорении,

$$\alpha = (1 - \sin \varphi)^{1/2}. \quad /10/$$

Для зависимости частоты от времени, изображенной на рис. II (один из рабочих вариантов) и  $V = 20$  Кэв, значение  $\Delta E$  на радиусе  $R = 30$  см равно 2,44 Мэв.

При частоте модуляции основного ускоряющего напряжения  $F_{mod} = 80$  гц расчет по формуле (19) дает значение  $L = 8,6$  мка.

После того, как сгусток частиц ушел в синхроциклотронное ускорение, пространственный заряд в центральной области ускорителя может успеть восстановиться в течение нерабочей части периода модуляции основного вч генератора при условии, что ускоряющее стохастическое напряжение не меньше некоторой величины. Требуемая величина этого напряжения, как показано в работе <sup>/2/</sup>, может быть определена по следующей формуле:

$$U = \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{V}{\omega} \cdot B \cdot F_{mod} \Delta E \right)^{1/2} R, \quad (21)$$

где  $\gamma$  - коэффициент захвата, учитывающий величину ускоряющего стохастического напряжения. Так как ток при стохастическом ускорении пропорционален квадрату ускоряющего напряжения, то желательно иметь возможно большее ускоряющее напряжение. Величина  $\gamma$  показывает, как изменится ранее рассчитанный ток.

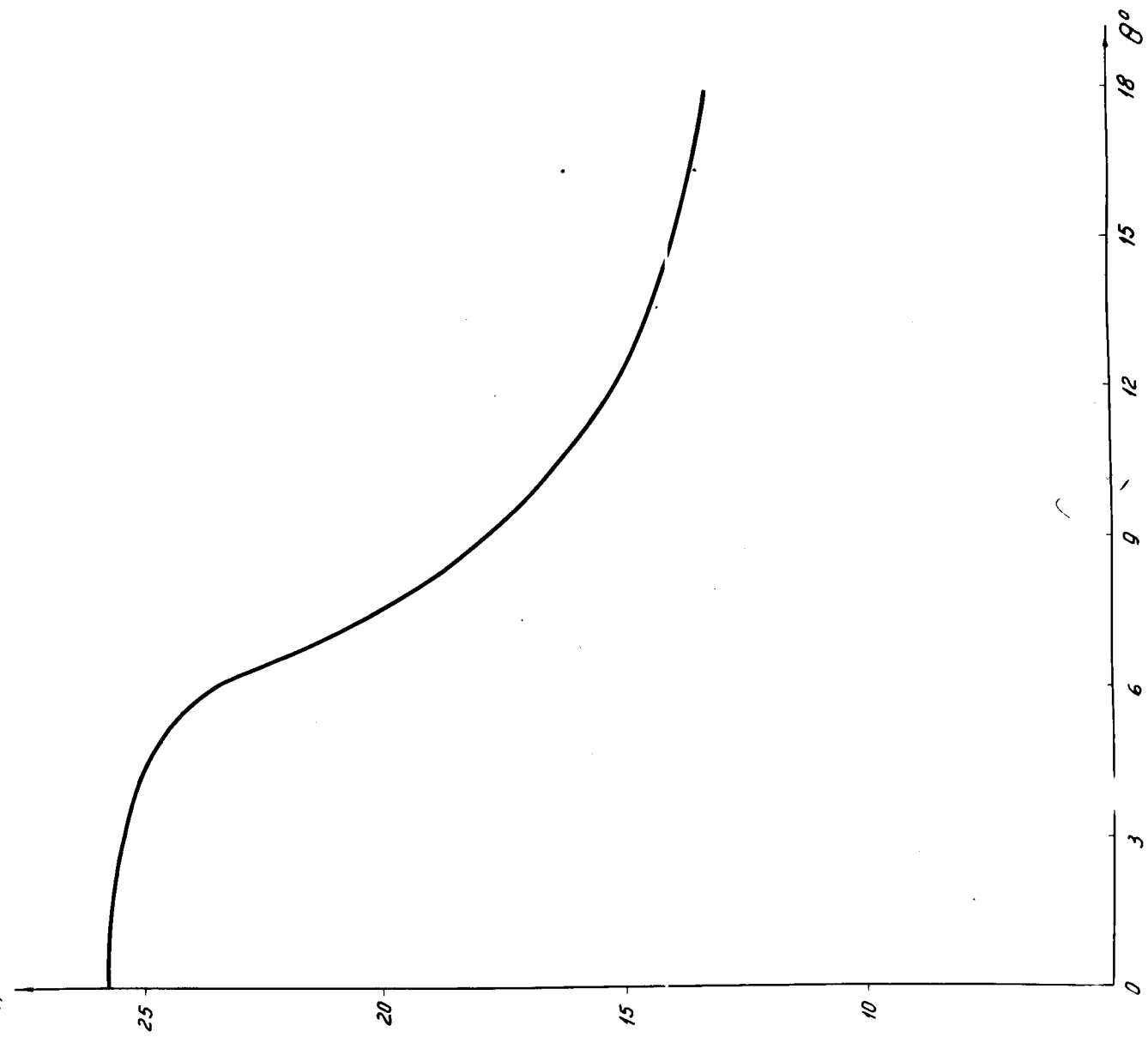


Рис. 11.

Чтобы узнать величину тока в нашем случае следует, пользуясь формулой (21), найти величину  $\gamma$  и умножить ее на значение тока, полученное по формуле (19). При  $U = 8$  кв величина  $\gamma$ , равная 0,96 не намного изменит ранее рассчитанный ток. Окончательно имеем для тока значение  $i = 8,2$  мка.

## ГЛАВА П.

РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА ШЕСТИМЕТРОВОГО СИНХРОЦИКЛОТРОНА  
ПРИ ДВУХКАСКАДНОМ УСКОРЕНИИ

Частота захвата в синхроциклотроне, соответствующая напряженности магнитного поля в центре  $H_0 = 16800$  эрстед, равна  $25,5$  МГц.

При циклотронном режиме резонансная частота первого каскада должна быть равна, примерно,  $25,5$  МГц. Резонансная система дополнительного ускоряющего электрода должна обладать высокой добротностью  $Q$  (порядка тысячи).

При работе первого каскада в режиме стохастического ускорения этот каскад должен быть настроен на  $25,2 \pm 0,3$  МГц, т.е. иметь полосу пропускания  $2 \Delta f = 0,6$  МГц. Соответственно добротность  $Q$  резонансной системы ускоряющего электрода должна быть порядка 30.

Геометрические размеры резонансной системы первой ступени ускорения определялись в основном размерами камеры и возможным местом установки резонансной линии, связывающей дополнительные электроды с питающим фидером.

Для уменьшения связи между первым и вторым каскадами ускорения рационально было бы расположить резонансные линии, питающие дополнительные электроды, перпендикулярно кромке основного дуанта. К сожалению, этого нельзя было сделать из-за имеющегося внутри камеры оборудования. Пришлось резонансные линии разместить почти параллельно кромке дуанта (рис. 12).

Дополнительные электроды имели форму полудисков. Были изготовлены два варианта электродов - диаметром 50 см и 70 см. Расстояние между электродами равнялось 12 см (апертура основного дуанта).

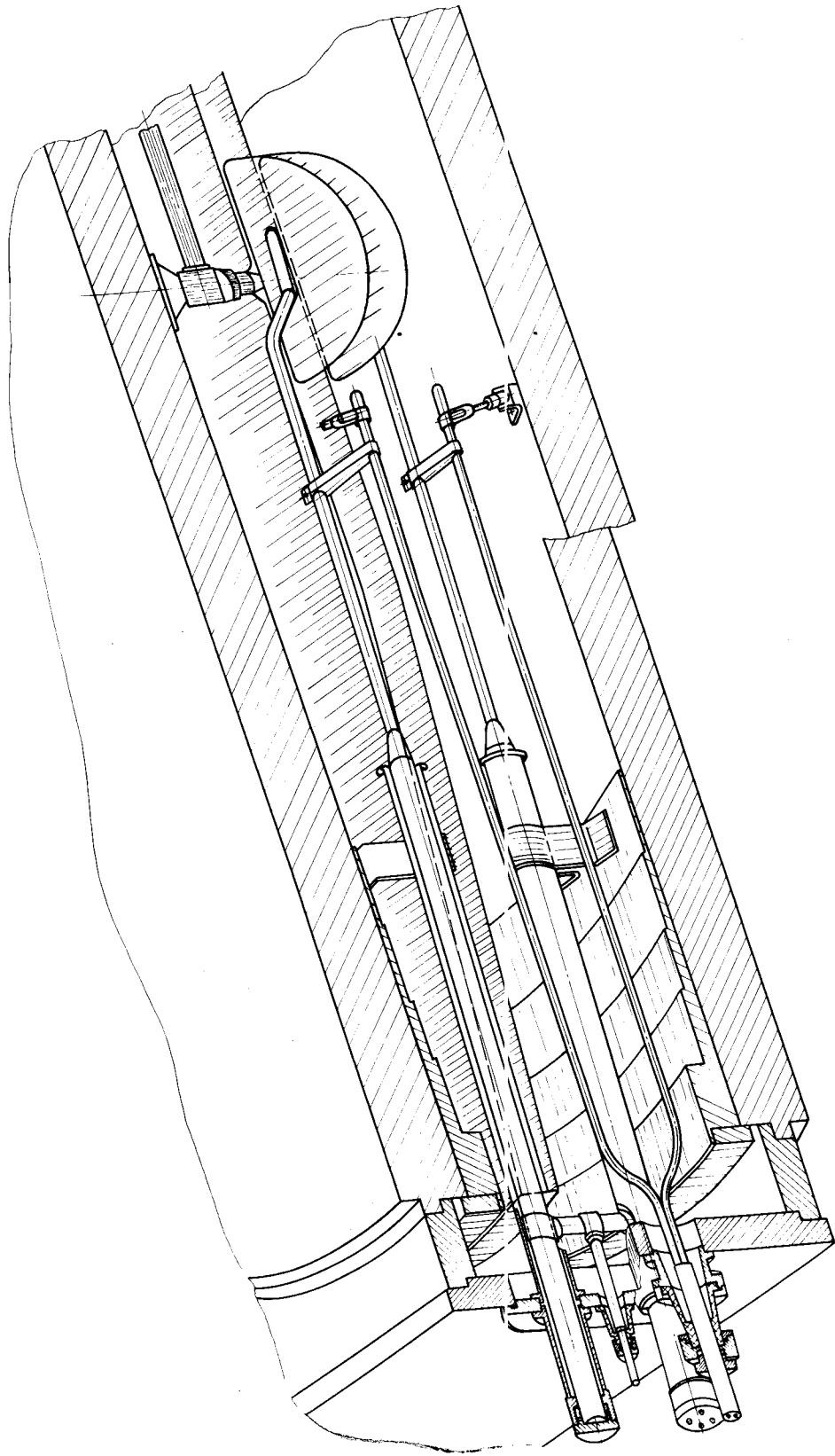


Fig. 12.

Минимальная длина резонансной линии с распределенными постоянными равна  $\lambda/4$  ( $\lambda$  -длина волны). В нашем случае  $\frac{\lambda}{4} \approx 3\text{ м}$ . При такой длине линии потери в ней будут минимальными по сравнению со всеми другими возможными длинами.

При выборе геометрической длины резонансных линий необходимо было учесть:

а) необходимость получения достаточно высокого входного сопротивления;

б) обеспечение возможно большего коэффициента трансформации напряжения;

в) необходимость подключения питающего фидера к резонансным линиям вне зоны ускорения, т.е. за радиусом 3 м.;

г) возможность конструктивного выполнения резонансной системы первого каскада.

С учетом указанных факторов геометрическая длина резонансных линий была выбрана равной 4 метрам.

Электрическую длину линии можно значительно укоротить, используя свойства неоднородной линии. При этом за счет применения двух участков с разными волновыми сопротивлениями получается дополнительное повышение коэффициента трансформации.

Как известно, возникающий на стыке двух линий с разными волновыми сопротивлениями скачок фазы  $\varphi$  зависит от отношения волновых сопротивлений линий. Угол скачка фазы определяется формулой:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\left(\frac{W_2}{W_1} - 1\right) \operatorname{tg} m l_1}{1 + \frac{W_2}{W_1} \operatorname{tg}^2 m l_1} \quad (22)$$

где (см. рис.13):

$W_1$  - волновое сопротивление участка длиной  $l_1$  ;

$W_2$  - волновое сопротивление участка длиной  $l_2$  ;

$m = \frac{2\pi}{\lambda}$  - фазовая постоянная.

При выбранной геометрической длине линии 4 м для настройки ее на волну 12 м ( $\frac{\lambda}{4} = 3$  м) необходимо электрическое укорочение на 1 м. Скачок фазы должен быть порядка  $30^\circ$ .

Из формулы (22) получается, что скачок фазы будет максимальным в случае, если

$$\operatorname{tg} m l_1 = \sqrt{\frac{W_1}{W_2}} \quad (23)$$

При выполнении этого условия

$$\varphi_{\max} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{W_1}{W_2}} - \sqrt{\frac{W_2}{W_1}} \right) \right] \quad (24)$$

Для  $\frac{W_1}{W_2} = 4$

Длина  $l_1$  (для  $\lambda = 12$  м) получается порядка двух метров (195 см). Резонансная настройка линии, показанной на рис. 13, определяется формулой

$$\frac{\lambda}{4} = l_1 + \frac{\operatorname{arctg} \left( \frac{W_2}{W_1} \operatorname{tg} \frac{2\pi l_2}{\lambda} \right)}{\frac{2\pi}{\lambda}} \quad (25)$$

При заданных  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $W_1$  и  $W_2$  трансцендентное уравнение (25) может быть решено графически или методом последовательных приближений. При  $l_2 = 207$  см и  $\frac{W_1}{W_2} = 4$  получается  $\frac{\lambda}{4} = 2,8$  м.



Собственная частота резонансной линии выбрана выше рабочей, так как емкость электродов снизит резонансную частоту и так как некоторый запас необходим для обеспечения возможности настройки системы. Перестройку системы предполагалось осуществлять при помощи изменения длины обратного токопровода.

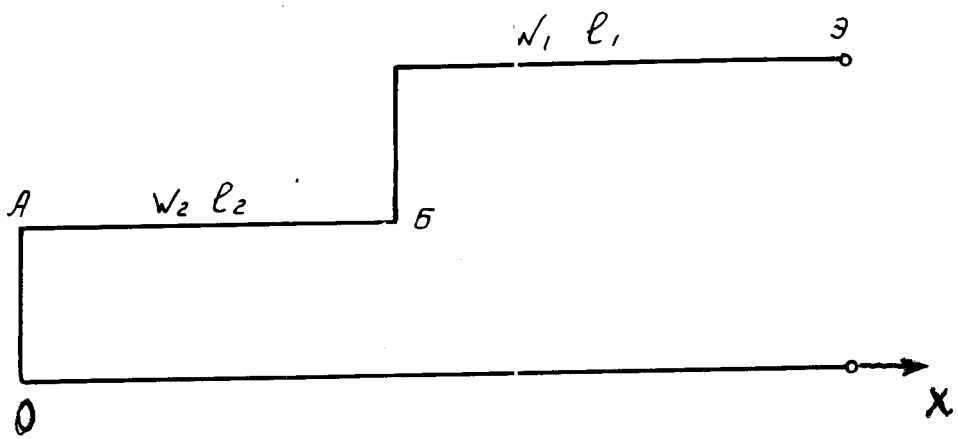
Из вышеизложенного видно, что электрическое укорочение линии возможно осуществить за счет повышения волнового сопротивления первого участка, или за счет уменьшения волнового сопротивления второго участка. Увеличение волнового сопротивления первого участка ограничено тем, что резонансные линии являются несущими конструкциями для дополнительных электродов. Уменьшение  $W_2$  в свою очередь ограничивается электрической прочностью и конструктивными условиями. В результате оказалось возможным выполнить систему с  $W_1 \approx 100$  ом и  $W_2 = 25$  ом ( $\frac{W_1}{W_2} = 4$ ). Волновое сопротивление участка I приблизительно рассчитывалось по формулам для коаксиальной линии.

Мощность потерь определяется добротностью  $Q$  системы и необходимой амплитудой ускоряющего напряжения. Для работы первой ступени в циклотронном режиме предполагалось иметь амплитуду ускоряющего напряжения порядка  $70 + 100$  кв.

Мощность потерь в резонансной линии, показанной на рис. 12 и 13 может быть рассчитана следующим образом.

Из теории линий с распределенными постоянными известно, что ток и напряжение на участке  $AB$  ( $0 \leq x \leq l_2$ ) без учета затухания определяется уравнениями

$$\begin{aligned} U &= j W_2 I_A \sin mx \\ I &= I_A \cos mx \end{aligned} \quad (26)$$



*Рис. 13.*

где  $J_A$  - ток в начале линии.

В точке Б ( $x = l_2$ )

$$U_B = jW_2 J_A \sin ml_2$$

$$J_B = J_A \cos ml_2 \quad (27)$$

Аналогично для участка Б - Э ( $l_2 \leq x \leq l_2 + l_1$ )

$$U = U_B \cos m(x - l_2) + jW_1 J_B \sin m(x - l_2)$$

$$J = J_B \cos m(x - l_2) + j \frac{U_B}{W_1} \sin m(x - l_2) \quad (28)$$

В точке "Э" ( $x = l_2 + l_1$ )

$$U_2 = U_B \cos ml_1 + jW_1 J_B \sin ml_1$$

$$J_2 = J_B \cos ml_1 + j \frac{U_B}{W_1} \sin ml_1 \quad (29)$$

Необходимо подсчитать потери в зависимости от ускоряющего напряжения на электродах ( $U_2$ ).

Из уравнений (5), (6), (7) и (8) следует, что на участке 2 ( $0 \leq x \leq l_2$ )

$$J_2 = j \frac{U_2 \cos mx}{\cos ml_2 (W_2 \operatorname{tg} ml_2 \cos ml_1 + W_1 \sin ml_1)}, \quad (30)$$

а на участке 1 ( $l_2 \leq x \leq l_2 + l_1$ )

$$J_1 = \frac{U_2 [\cos m(x - l_2) - \frac{W_2}{W_1} \operatorname{tg} ml_2 \sin m(x - l_2)]}{W_2 \operatorname{tg} ml_2 \cos ml_1 + W_1 \sin ml_1}, \quad (31)$$

Активное сопротивление коаксиальной линии из меди с учетом поверхностного эффекта может быть подсчитано по формуле

$$R = \left( \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) \sqrt{\frac{1}{1,83 \lambda}} \left[ \frac{\text{ом}}{\text{м}} \right] \quad (32)$$

где  $\lambda$  - длина волны в метрах;

$z_1$  - внешний радиус внутреннего провода в миллиметрах;

$z_2$  - внутренний радиус внешнего провода в миллиметрах.

Отсюда для  $\lambda = 12$  м активное сопротивление второго участка

$$R_2 = (1/60 + 1/40) \sqrt{\frac{1}{1,83 \cdot 12}} = 0,0089 \text{ ом/м.}$$

Активное сопротивление первого участка

$$R_1 = \left( \frac{1}{21} + \frac{1}{110} \right) \sqrt{\frac{1}{1,83 \cdot 12}} = 0,0122 \text{ ом/м}$$

Мощность потерь в резонансной линии

$$P = \frac{R_2}{2} \int_0^{l_2} J_2^2 dx + \frac{R_1}{2} \int_{l_2}^{l_2+l_1} J_1^2 dx \quad (33)$$

где  $J_2$  и  $J_1$  - амплитудные значения токов.

Отсюда

$$P = \frac{R_2}{2} \left[ \frac{U_0}{\cos ml_2 (w_2 \operatorname{tg} ml_2 \cos ml_1 + w_1 \sin ml_1)} \right]^2 \int_0^{l_2} \cos^2 mx dx + \frac{R_1}{2} \left[ \frac{U_0}{w_2 \operatorname{tg} ml_2 \cos ml_1 + w_1 \sin ml_1} \right]^2 \int_{l_2}^{l_2+l_1} [\cos m(x-l_2) - \frac{w_2}{w_1} \operatorname{tg} ml_2 \sin m(x-l_2)]^2 dx \quad (34)$$

Обозначим  $A' = \frac{1}{w_2 \operatorname{tg} ml_2 \cos ml_1 + w_1 \sin ml_1}$

$$B' = \frac{w_2}{w_1} \operatorname{tg} ml_2$$

$$P = \frac{U_3^2 (A')^2}{2} \left\{ \frac{R_2}{\cos^2 ml_2} \cdot \frac{x}{2} \Big|_0^{l_2} + \frac{\sin 2mx}{4m} \Big|_0^{l_2} + \right. \\ \left. + R_1 \left[ \int_{l_2}^{l_2+l_1} \cos^2 m(x-l_2) dx - B' \int_{l_2}^{l_2+l_1} \sin 2m(x-l_2) dx + \right. \right. \\ \left. \left. + (B')^2 \int_{l_2}^{l_2+l_1} \sin^2 m(x-l_2) dx \right] \right\} = \frac{U_3^2 (A')^2}{2} \left\{ \frac{R_2}{\cos^2 ml_2} \left( \frac{l_2}{2} + \frac{\sin 2ml_2}{4m} \right) + \right. \\ \left. R_1 \left[ \frac{l_1}{2} + \frac{\sin 2ml_1}{4m} - B' \frac{1 - \cos 2ml_1}{2m} + (B')^2 \left( \frac{l_1}{2} - \frac{\sin 2ml_1}{4m} \right) \right] \right\} \\ A' = 0,00923 ; \quad B' = 0,443$$

$$P = \frac{U_3^2 \cdot 0,00923}{2} \left\{ \frac{0,0089}{\cos^2 \frac{2\pi \cdot 2,02}{12}} \left[ \frac{2,02}{2} + \frac{\sin \left( 2 \cdot \frac{2\pi}{12} \cdot 2,02 \right)}{4 \cdot \frac{2\pi}{12}} \right] + \right. \\ \left. + 0,0122 \left[ \frac{1,95}{2} + \frac{\sin \left( 2 \frac{2\pi}{12} \cdot 1,95 \right)}{4 \cdot \frac{2\pi}{12}} - 0,443 \frac{1 - \cos 2 \frac{2\pi}{12} \cdot 1,95}{2 \cdot \frac{2\pi}{12}} + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,443^2 \left( \frac{1,95}{2} - \frac{\sin 2 \frac{2\pi}{12} \cdot 1,95}{4 \frac{2\pi}{12}} \right) \right] \right\} \quad (36)$$

В результате получаем для мощности потерь

$$P = 2,72 \cdot 10^{-6} U_3^2 \text{ [вт]} \quad (37)$$

где  $U_3$  - амплитуда ускоряющего напряжения на электроде в вольтах.  
Если подставить  $U_3$  в киловольтах, то получим

$$P = 2,72 U_{3(\text{кв})}^2 \text{ [вт]} = 2,72 \cdot 10^{-3} U_{3(\text{кв})}^2 \text{ [квт]} \quad (38)$$

Мощность потерь в резонансной линии при амплитуде ускоряющего напряжения  $U_3 = 100$  кв расчетом может быть оценена в 27,2 квт. Поскольку резонансные линии ускоряющих электродов первой ступени две, мощность потерь будет 54,4 квт.

Надо отметить, что эти расчеты не учитывают потери на стенках основного дуанта синхроциклотрона и на медных и железных стенках камеры за концом резонансной линии, питающей ускоряющие электроды. Эти потери эквивалентны внесению сопротивления излучения в сопротивление потерь резонансной линии. Кроме того, эффект "близости" может вызвать перераспределение токов в открытой части резонансной линии и тем самым увеличить потери. Поэтому следует считать, что действительные потери будут превышать расчетные.

Для получения возможно больших амплитуд ускоряющего напряжения в циклотронном режиме, резонансная линия была использована как трансформатор напряжения. Связь с фидером - кондуктивная (см рис.12). Коэффициент трансформации - порядка десяти.

Для питания электродов при полосе частот 0,6 МГц мощность потерь возрастет обратно пропорционально добротности системы. Снижение добротности осуществлялось подключением линии с большими потерями (из нержавеющей стали). Схема подключения этой линии показана на рис.12.

Для совмещения работы первой и второй ступеней ускорения необходимо было обеспечить возможность подстройки по частоте одной из резонансных систем относительно другой. Так как подстраивать частоту ступени ускорения было бы труднее, производилась подстройка верхней частоты второй ступени ускорения при помощи дополнительного статорного пакета, изменяющего верхнюю частоту второй ступени.

На рис.14 показаны кривые частота - время резонансной системы синхроциклотрона при 5 пакетах статора вариатора для верхних частот 26,5 МГц (кривая II без дополнительного пакета) и 25,4 МГц (кривая I с дополнительным пакетом). На этом же рисунке (пунктиром) показана кривая частота-время для 10 пакетов статора.

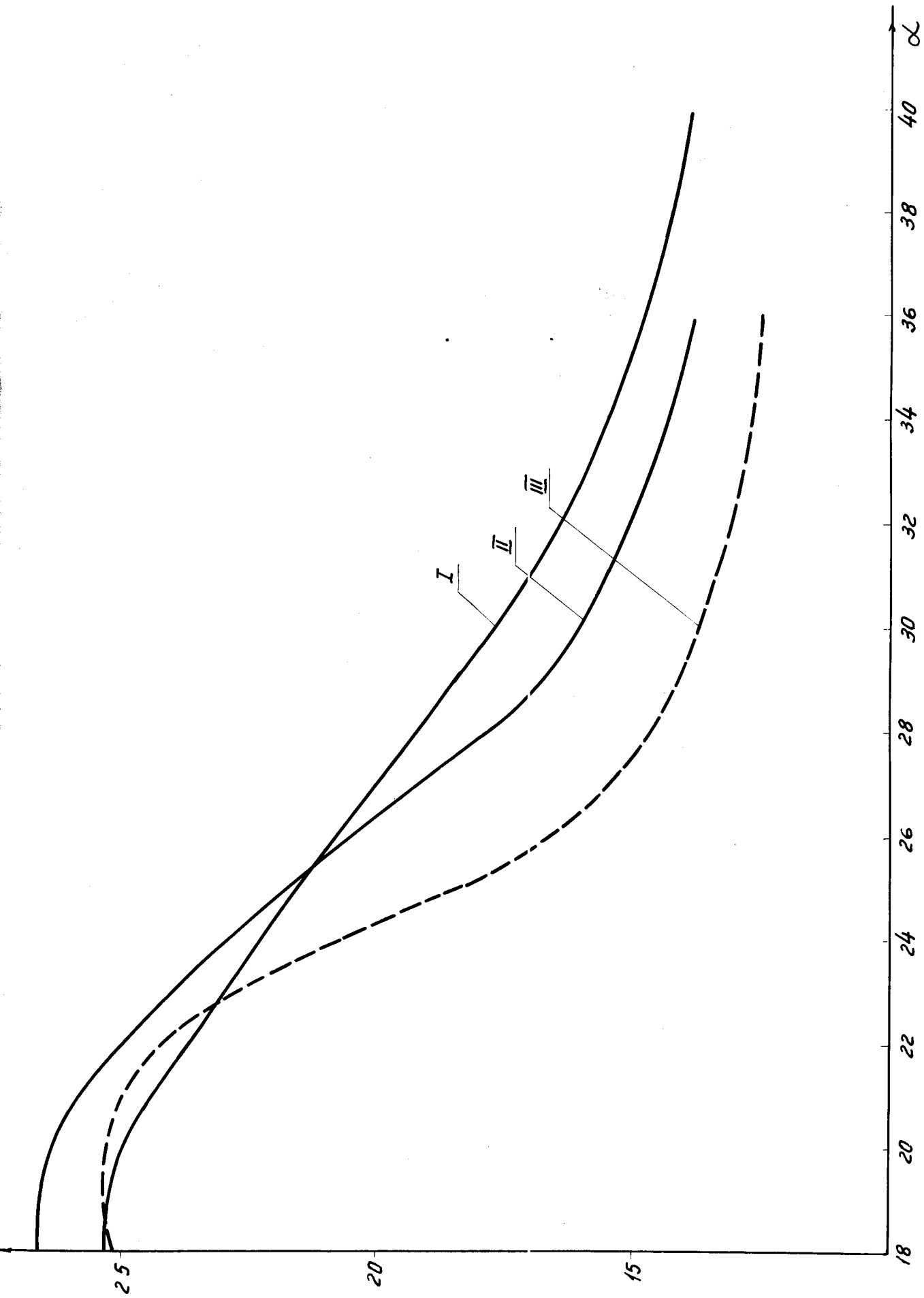


Рис. 14

## Г Л А В А Ш.

### ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Для исследования различных режимов работы первой ступени ускорения мог быть использован только генератор с независимым возбуждением. Наиболее подходящим для этих целей оказался двухтактный генератор I канала пятиэлектродного варианта, расположенный в аппаратном зале 2 корпуса. Схема этого генератора была значительно переделана для получения большей мощности. В результате переделки максимальная генератора возросла с 20 до 90 квт. При настройке на частоту  $f_0 = 25$  Мгц полоса пропускания генератора  $2\Delta f = 1$  Мгц.

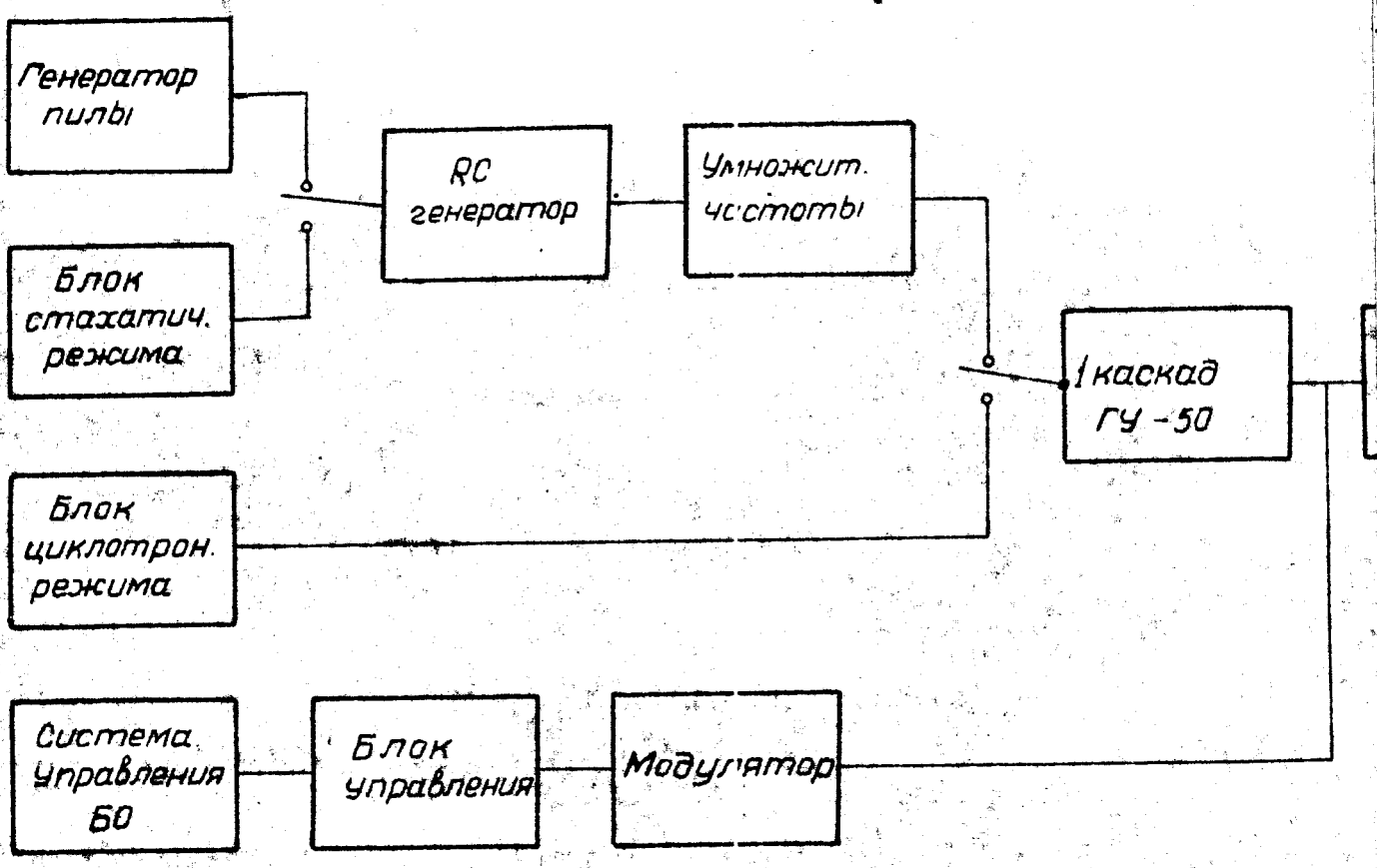
Оконечный и два предварительных каскада генератора работают по схемам с заземленными сетками. Блок-схема управления, задающих генераторов, усилительных каскадов и системы фидеров показана на рис.15. Принципиальные схемы отдельных блоков приведены в приложении.

Генератор использовался для исследования работы дополнительных электродов на макете резонансной системы: определения коэффициента трансформации напряжения, распределения мощности потерь, выяснения напряжений, индуцируемых в узлах резонансной системы, определения электрической прочности системы в атмосфере и др.

Окончательный каскад генератора был связан с ускоряющим электродом первой ступени двумя коаксиальными фидерными линиями длиной около 500 м с волновым сопротивлением  $W = 58$  ом и затуханием  $\beta = 0,0146$  ом/м (для  $\lambda = 12$  м) каждая.

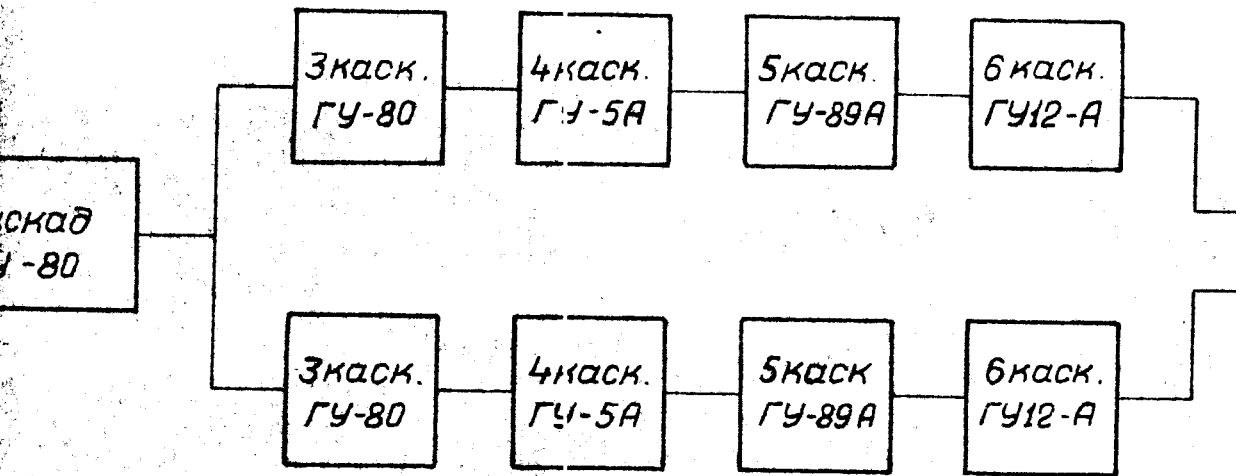


Блок-схема В.Ч. пу



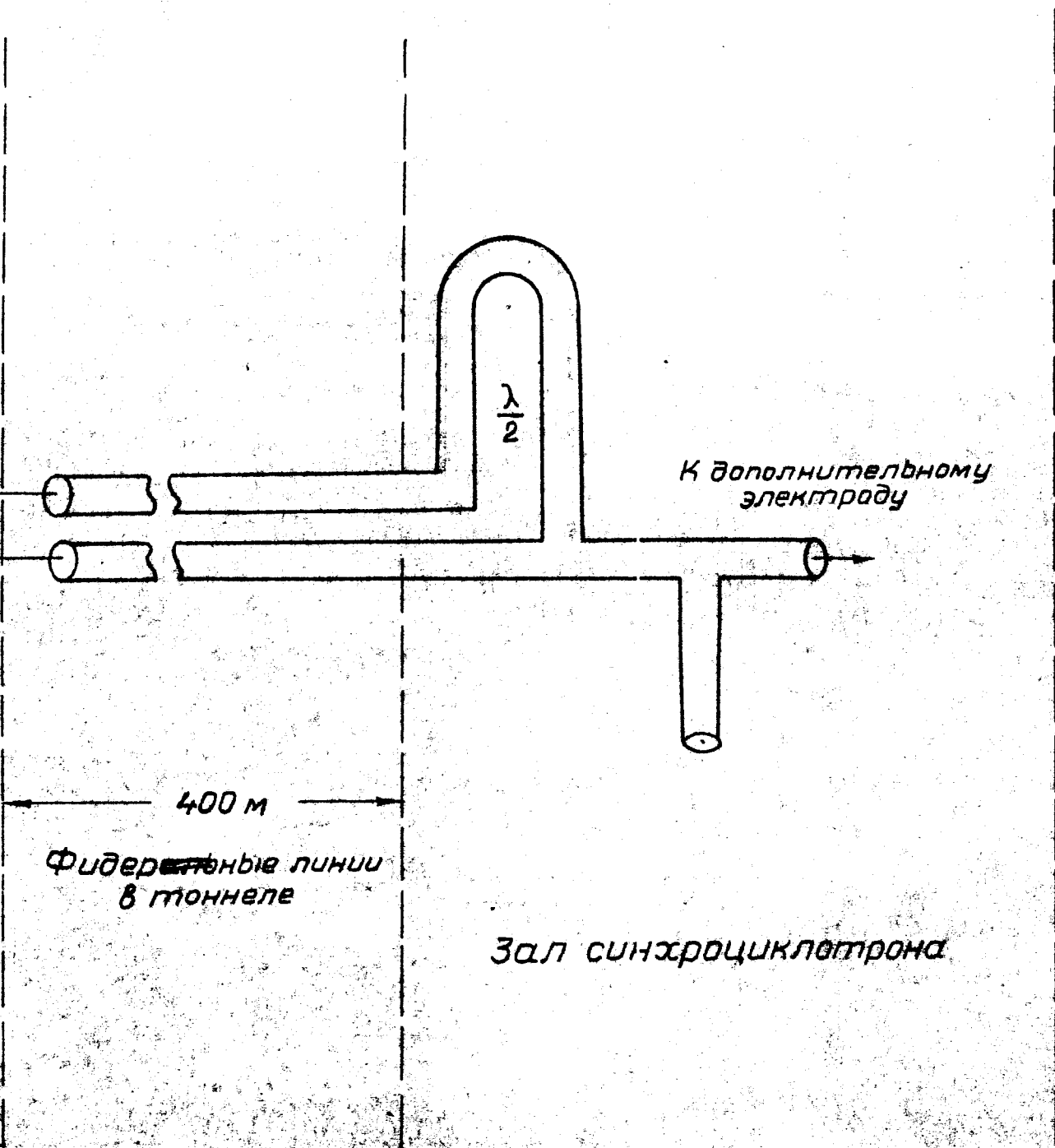
КС

ния дополнительного электрода.



16 №2

Рис. 15



Фидерные линии  
в тоннеле

400 м

Зал синхроциклотрона

К дополнительному  
электроду

$\frac{\lambda}{2}$

## Г Л А В А IV.

### РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

#### А. Измерения на макете резонансной системы.

Радиотехнические измерения на макете были необходимы для уточнения расчетных данных и отработки конструктивных элементов. Результаты измерений позволили значительно ускорить монтаж и настройку системы в радиоактивной камере синхроциклотрона.

В зависимости от необходимого для измерений напряжения, резонансная система возбуждалась либо генератором ГСС-6, либо генератором, предназначенным для питания первой ступени ускорения.

Собственная частота первой ступени при диаметре электродов 50 см оказалась равной 26,8 мгц, при диаметре 70 см - 25,6 мгц. Добротность системы  $Q$  была определена по резонансной кривой и получилась равной 1150 ( $\Delta f = \pm 11$  кгц). Такая добротность вполне удовлетворительна для обеспечения работы в циклотронном режиме. При включении в пучность напряжения железной линии добротность системы понижалась до 170. Резонансные кривые приведены на рис.16.

Мощности потерь на макете подробно не исследовались, так как вследствие плохого состояния макета (главным образом из-за плохих контактных переходов) эти мощности в 3-3,5 раза больше, чем в действующей системе.

Частотные характеристики (зависимость собственной частоты системы от угла поворота ротора вариатора, значения частоты связи и об'емных частот вариатора и камеры) на макете не могли быть проверены из-за несоответствия макета реальной системе (12 лопаток ротора вместо 10, отсутствие коллекторного конденсатора, второй половины камеры и др.). В результате этого измерения на макет

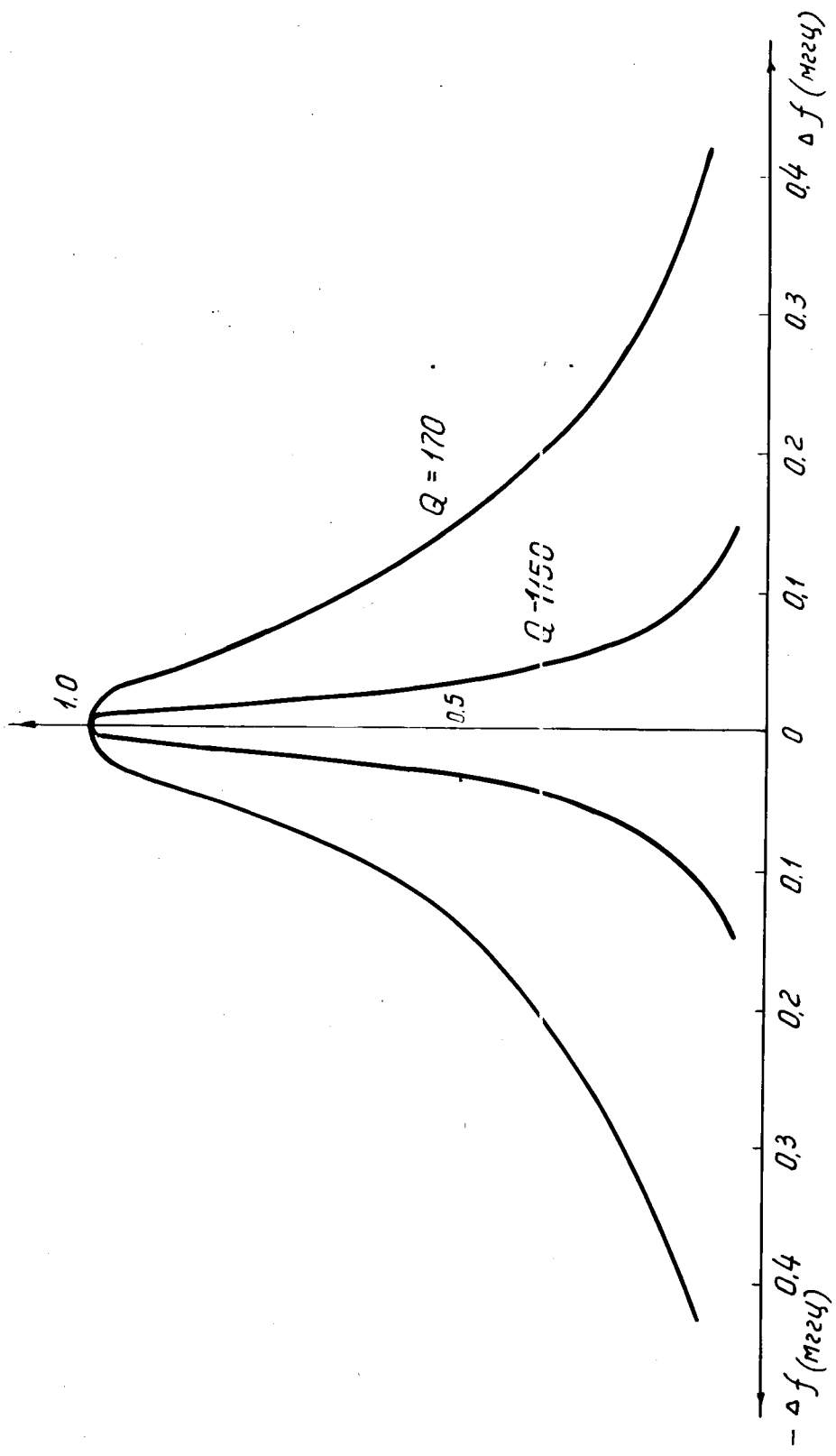


Рис.16.

не позволили проверить очень важные факторы - связь между резонансными системами первой и второй ступеней ускорения и наличие паразитных настроек.

Максимальная амплитуда напряжения на дополнительных электродах макета (при  $Q = 1150$ ), измеренная при помощи осциллографа (в импульсном режиме - пила с частотой 1300 гц), была 35-40 кв при анодном напряжении оконечного каскада 5,5 кв.

Б. Измерения на резонансной системе синхроциклотрона.

В таблице III приведены результаты контрольных измерений мощности потерь; измерения были произведены 16 декабря 1959 года перед остановкой ускорителя для ревизии.

Таблица III.

$f$ (Мгц)	$U_{гес}$ ВКС №6193 (в)	$U$ сист ВКС №6960 (в)	$U$ дуант (центр верх) ВКС №7057 (в)	$U$ дуант (край правый) ВКС №1027 (в)	$U$ дуант (центр низ) ВКС №1080 (в)	$R_{сe}$ (резонансн. сопротивл. сист. (ом)	$R_c$ (колеб. мощн. д/10кв амплитуды ускорения напряж. (квт)	Примечание
25,2	I	0,69	2,3	2,2	2,3	220	20	1. Частота измерялась волномером 513.
24,2	I	0,76	2,2	1,95	2,2	310	19	
23,4	I	0,78	2,1	1,9	2,1	354	19,5	
22,9	I	0,83	1,9	1,7	1,9	490	19,4	
22,1	I	0,85	1,7	1,6	1,7	565	22,4	
20,6	I	0,84	1,65	1,6	1,65	525	24,8	
18,4	I	0,82	1,7	1,5	1,7	455	25	
17,0	I	0,85	1,8	1,7	1,8	565	19,8	
16,2	I	0,85	1,95	1,85	1,95	565	16,8	
15,5	I	0,78	2,3	2,3	2,3	354	16,2	
14,2	I	0,82	2,2	2,2	2,2	455	15,3	2. Измерения произведены при 10 пакетах статора ватриатора.
12,55	I	0,73	2,7	2,65	2,65	270	13,5	

С тах

По окончании ревизии ускорителя в камере была смонтирована резонансная система первой ступени ускорения; на статорном кольце вариатора был установлен дополнительный передвигной пакет. Вне камеры были смонтированы фидера, питающие дополнительные электроды.

При первых же измерениях в рабочем диапазоне частот были обнаружены паразитные настройки. Выяснилось наличие двух видов паразитных настроек. Первый вид был обусловлен значительной связью между резонансными системами синхроциклотрона и дополнительных электродов. Перечень этих настроек приведен в таблице IV.

$f$ (Мгц)	Напряжение на входе вч генератора (в)	Напряжение на дуанте синхроцикло- трона (в)	Примечание
24,8	0,3	0,75	рабочая частота
24,6	0,2	0,34	} паразитные настройки, обусловленные частотами связи (много- вольностью фидера).
24,4	0,32	0,70	
24,3	0,9	0,90	
24,1	0,3	0,60	
23,9	0,3	0,80	
23,6	0,3	1,00	
23,3	0,3	1,20	
23,0	0,3	1,20	

Второй вид паразитных настроек был связан с возбуждением колебаний, имеющих значительную вертикальную составляющую электрического поля.

Паразитные настройки первого вида были исключены введением соответствующих закороток и экранов. Устранить паразитные колебания второго вида способами, не нарушающими процесс ускорения в двухкаскадном цикле, не удалось. Как выяснилось позднее, возникновение паразитных колебаний второго вида было обусловлено асимметрией в объеме вариатора, связанной с дополнительным статорным пакетом.

Следует отметить, что паразитные колебания объемного типа имели место при настройке резонансной системы первой ступени ускорения как в циклотронном режиме, так и в режиме стохастического ускорения независимо от места возбуждения системы. Существенная перестройка объемной частоты (с 24,2 + 24,6 на 29 МГц) была возможна только при введении эквипотенциальной перемычки между ускоряющими электродами первой ступени.

При питании дополнительных электродов от генератора с независимым возбуждением естественный КВВ был равен 0,32. Для повышения КПД фидера было определено место подключения индуктивного шлейфа:

$$\sin m\chi_1 = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \quad (39)$$

где:  $\chi_1$  - расстояние от пучности напряжения в сторону генератора;

$$K = \frac{V_{min}}{V_{max}} \text{ коэффициент бегучести.}$$

Длина шлейфа  $\chi_2$  была определена из формулы:

$$\operatorname{ctg} m\chi_2 = \frac{1-K}{\sqrt{K}} \quad (40)$$

По расчету получили  $\chi_1 = 198$  см,  $\chi_2 = 130$  см. После подключения и настройки шлейфа КВВ был доведен до 0,87.



## Г Л А В А У.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СИНХРОЦИКЛОТРОНА В РЕЖИМЕ  
ДВУХКАСКАДНОГО УСКОРЕНИЯ.

Исследования работы синхроциклотрона в режиме двухкаскадного ускорения предполагалось произвести в определенной последовательности.

Для того, чтобы убедиться в возможности работы ускорителя в нормальном режиме при наличии в камере устройств первого каскада ускорения, предполагалось исследовать синхроциклотронный режим с электродами первой ступени, перестроенными на высокие частоты (30-36 МГц). Затем должна была проверяться работа ускорителя с повышенной амплитудой ускоряющего напряжения на частотах захвата:

а) при помощи "пассивных" резонансных электродов, т.е. при помощи дополнительных электродов настроенных в резонанс на частоты захвата, но без подачи на них напряжения от вч генератора; б) при питании дополнительных электродов генератором с независимым возбуждением, возбуждаемого основным генератором ВЧ с регулировкой фазы напряжения возбуждения. В обоих случаях предполагались измерения тока пучка на малых радиусах (с II до 80 см.).

Далее были предусмотрены исследования ускорителя при работе первого каскада ускорения в циклотронном режиме, в режиме пилообразной частотной модуляции и в режиме стохастического ускорения. И в этих трех случаях предполагалось контролировать интенсивность пучка ускоренных частиц в первой ступени ускорителя.

Все исследования по намеченной программе предполагалось выполнить в течение месяца.

Проверка работы синхроциклотрона в нормальном режиме была начата II февраля. Перед самым началом проверки вышло из строя приспособление для перестройки резонансной системы дополнительных

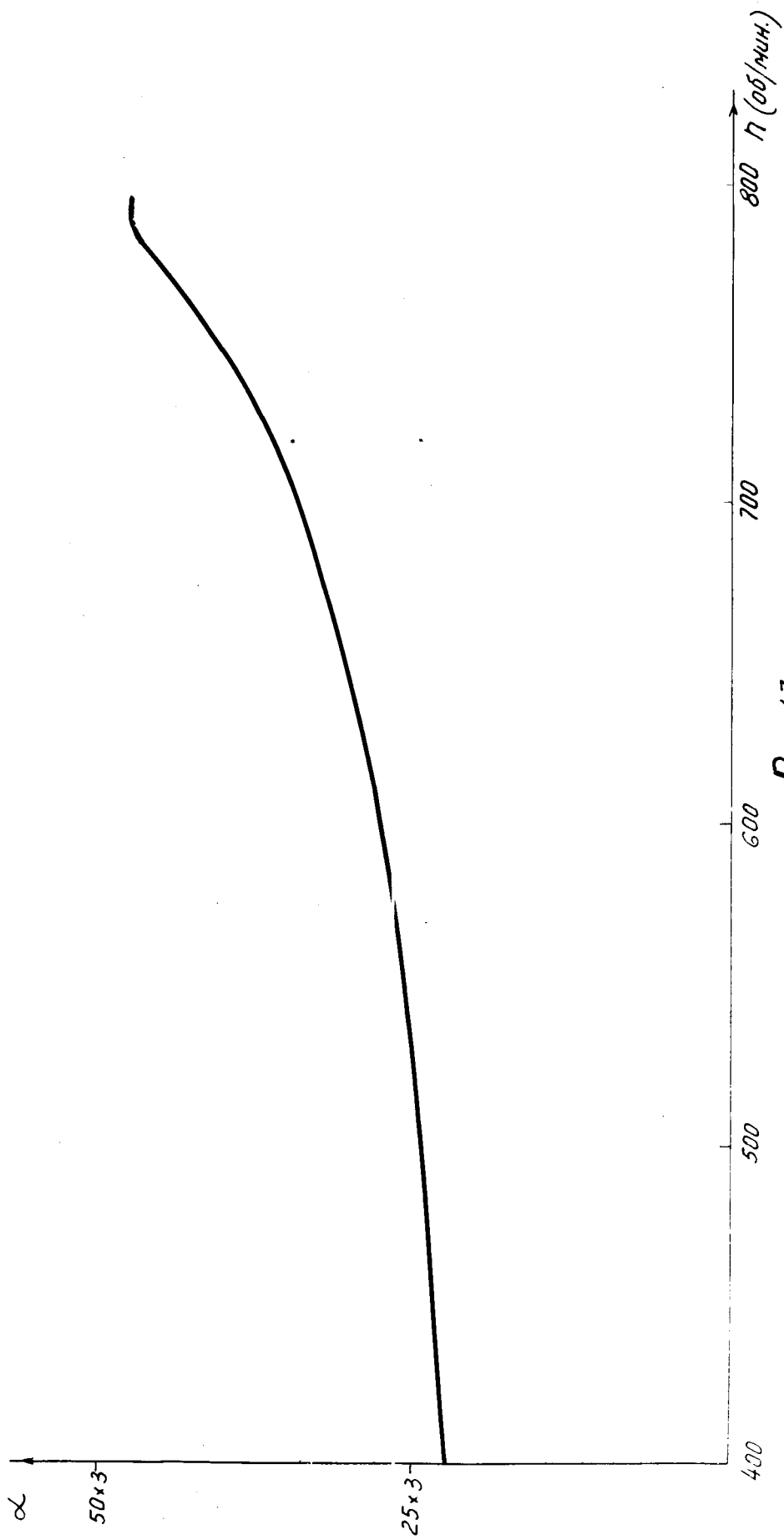


Рис. 17

электродов на частоты 30-36 Мгц. При пробном включении синхротрона была получена максимальная интенсивность 25.3 (в условных единицах, см.сноску), вместо 70.3, наблюдавшихся перед остановкой ускорителя. На кольце статора вариатора было установлено при этом 5 пакетов и передвижной дополнительный пакет. Для выяснения причины резкого понижения интенсивности 12 февраля были сняты дополнительные электроды, а резонансные линии закорочены медными лентами на крышки камеры. После этого был проверен уровень интенсивности при двух формах кривых частота - время (кривые I и II на рис.14). Максимальная интенсивность в первом случае (кривая I при введенном дополнительном пакете, верхняя частота 25,45 Мгц) оказалась равной 47.3. Зависимость интенсивности от частоты модуляции (числа оборотов ротора вариатора) для этого случая показана на рис.17. Максимальная интенсивность во втором случае (кривая II на рис.14 при выведенном дополнительном пакете, верхняя частота 26,5 Мгц) - 45,3. Авария (выход из строя правой опорной пружины на резонансной линии) не дала возможности получить зависимость интенсивности от частоты модуляции для этого случая.

Для дальнейшего выяснения причины пониженной интенсивности на кольце статора вариатора были установлены симметрично 10 пакетов и оставлен дополнительный передвижной. Полученная при этом кривая частота время приведена на рис.14 (кривая III). Дополнительный передвижной пакет практически не изменял форму кривой и очень мало изменял верхнюю частоту. 19 февраля (после замены лопнувшей опорной пружины) была возобновлена проверка работы синхротрона в нормальном режиме. При самой тщательной настройке ускорителя удалось получить максимальную интенсивность 28.3, т.е. существенно меньшую, чем в двух предыдущих случаях с 5 пакетами статора

Х) Здесь, как и в дальнейшем, все измерения интенсивности на конечном радиусе 274,5 см велись по нейтронам при помощи Дозиметра, находящегося на пульте управления в корпусе № 2.

вариатора (47,3 и 45,3). Это обстоятельство можно объяснить изменением формы кривой частоты - время при переходе к 10 пакетам .

Поиски других причин понижения интенсивности (по сравнению с ее уровнем до остановки ускорителя для ревизии) не увенчались успехом. Поэтому было решено для экономии времени начать исследования двухкаскадного ускорения при полученном режиме работы, т.е. при пониженной интенсивности синхроциклотрона в его нормальной схеме.

Для уменьшения связи между резонансными системами первого и второго каскадов 23 февраля были установлены экраны между основным дуантом и резонансной системой дополнительных электродов. Было также смонтировано новое приспособление для перестройки дополнительных электродов на частоты 30-36 МГц.

25-26 февраля исследовалась работа синхроциклотрона с дополнительными электродами, настроенными в резонанс на частоты захвата, без подачи на них напряжения от вч генератора. В этом режиме была получена максимальная интенсивность 53,3, т.е., почти в два раза большая, чем полученная перед этим в нормальном синхроциклотронном режиме (28,3).

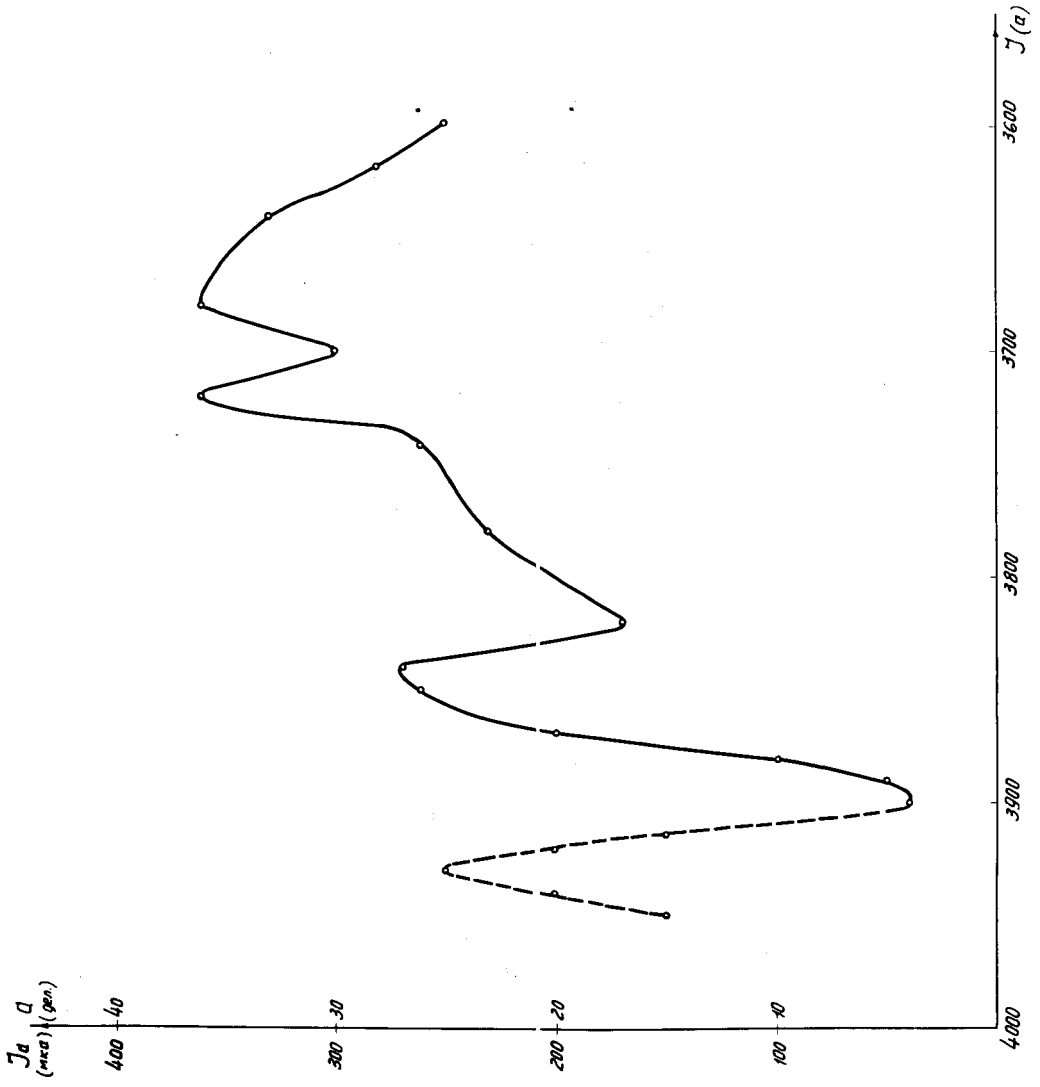
Следующим этапом было исследование циклотронного режима первой ступени ускорения. Измерения тока пучка пробником с дистанционным управлением, проведенные 30 сентября 1959 года Д.Л.Новиковым, дали в циклотронном режиме на радиусе  $12 \pm 0,5$  см ток 360 мка при напряжении на дуанте 14-15 кв. Максимальный ток пучка, измеренный в марте 1960г. новым пробником Е.И.Розановым, на радиусе 10 см был равен 600 мка. Сопоставляя данные токовых измерений интенсивности пучка, амплитуду ускоряющего напряжения в циклотронном каскаде можно оценить величиной 25 кв.

При исследованиях двухкаскадного ускорения (циклотрон-синхроциклотрон) 2-го марта наблюдалась следующая картина. Интенсивность пучка протонов на конечном радиусе синхроциклотрона в зависимости от величины тока, питающего обмотки электромагнита изменялась по кривой, приведенной на рис.18. На этом же рисунке пунктиром показана в другом масштабе (в мка) такая же зависимость интенсивности тока пучка циклотрона на радиусе  $15 \pm 2$  см. Как видно из рисунка, максимальная интенсивность тока пучка циклотрона на этот раз была 250 мка.

Совместная работа двух каскадов наблюдалась при токе питания электромагнита 3900 а. При этом токе включение циклотронного каскада повышало интенсивность на конечном радиусе синхроциклотрона от 4,3 до 20,3. При понижении тока питания электромагнита включение циклотронной ступени не влияло на интенсивность пучка на конечном радиусе, а при токах больше 3900 а пучок на конечном радиусе исчезал. Полученный режим совмещения работы каскадов был явно неудовлетворительным, но улучшить его по ряду причин не удалось.

Заключительным этапом работы было изучение двухкаскадного ускорения с первым каскадом, работающим в режиме пилообразной частотой модуляции и в стохастическом режиме.

Режим пилообразной частотной модуляции ускоряющего напряжения первого каскада проверялся для случая узкой полосы пропускания (циклотронная настройка,  $\Delta f = \pm 11$  кгц). Частота модуляции изменялась в диапазоне  $150 \pm 1500$  гц при глубине модуляции 20 кгц. Анодное напряжение ламп оконечного каскада генератора вч-6,5 кв. При совместной работе первого каскада в указанном режиме и основного синхроциклотронного каскада никакого изменения уровня интенсивности на конечном радиусе не наблюдалось.



**Duc 18**

Для проверки режима стохастического ускорения полоса пропускания тракта дополнительных ускоряющих электродов была расширена до  $\Delta f = \pm 0,25$  Мгц. В качестве генератора, возбуждающего частотный модулятор (блок РС) был использован генератор синусоидального напряжения типа ЗГ-12. Верхняя частота вч генератора 25,3 Мгц.

Исследованиями режима стохастического ускорения было установлено, что совместная работа двух каскадов приводит к некоторому повышению интенсивности только при определенных значениях напряженности магнитного поля и частоты генератора, возбуждающего частотный модулятор. Так, например, при токе намагничивания 4200 а и частоте модуляции 80 кгц наблюдалось повышение интенсивности с 60 до 80 делений (по ~~шкале~~<sup>дозиметру</sup>). Относительное повышение интенсивности наблюдалось при частотах модуляции 20, 40, 60, 80 и 100 кгц. Максимальное повышение уровня интенсивности было отмечено при частотах модуляции 80 кгц (на 30%) и 100 кгц (на 18%).

По окончании работ, связанных с исследованиями двухкаскадного метода ускорения, были удалены из камеры дополнительные ускоряющие электроды и железная линия; огрезки резонансных линий были закорочены медными лентами на крышки камеры; со статорного кольца вариатора был снят дополнительный передвижной пакет. После этого (8 марта) была проверена интенсивность пучка на конечном радиусе, которая оказалась равной 68,3, т.е. практически на уровне, наблюдавшемся перед остановкой ускорителя для ревизии.

## ВЫВОДЫ

1. Повышение интенсивности пучка протонов в режиме двухкаскадного ускорения, которое можно было ожидать на основании расчетов, проведенных в главе I, достигнуть не удалось. Так, например, циклотронный ток, измеренный на радиусе 15 см, равнялся 250 мка, тогда как по расчетным данным он должен был быть не меньше 1 - 1,5 ма.

2. Оптимальные условия для совместной работы двух каскадов не были достигнуты из-за отсутствия эффективно действующих элементов настройки высокочастотных систем первого и второго каскадов.

3. Нормальная работа ускорителя была нарушена из-за возникновения паразитных колебаний в рабочем диапазоне частот. В обычном синхроциклотронном режиме интенсивность пучка протонов была вдвое меньше наблюдавшейся перед остановкой на ревизию. Появление паразитных настроек было обусловлено, в первую очередь, нарушением аксиальной симметрии высокочастотной системы, вызванным установкой в камере дополнительных радиотехнических устройств второго каскада и установкой дополнительного передвижного пакета на кольце статора вариатора.



### З а к л ю ч е н и е

Задача практического осуществления метода двухкаскадного ускорения на действующем синхроциклотроне является весьма сложной. Кроме общей сложности самой задачи, проведение монтажных и измерительных работ сильно затруднено высокой радиоактивностью камеры, что существенно ограничивает время пребывания в камере и вблизи нее.

Выполненную работу следует рассматривать как первый и очень важный этап на пути к решению поставленной задачи. Несмотря на то, что на этом этапе не было получено исчерпывающего ответа на вопрос о возможности существенного повышения интенсивности пучка методом двухкаскадного ускорения, имеются все основания утверждать, что работы в этом направлении следует продолжать.

В дальнейшем необходимо:

а) устранить все недостатки в радиотехнических устройствах и аппаратуре, в частности,

обеспечить возможность дистанционной перестройки в соответствующих пределах собственной частоты резонансной системы первого каскада;

тщательно экранировать друг от друга резонансные системы обоих каскадов;

обратить особое внимание на симметрирование всей системы;

б) устранить недостатки в методике измерений, допущенные на первом этапе работы, в частности, разработать метод и устройства для надежных измерений токов пучка на малых радиусах (10 - 80 см);

в) обеспечить тщательную подготовку к проведению экспериментальных исследований на синхроциклотроне, учтя опыт, полученный на первом этапе исследования.

Настоящая работа выполнена сотрудниками группы синхроциклотрона под общим руководством М.Ф. Пульги. Ведущим инженером-радиостом являлся старший инженер А.Л. Савенков. Инженер А.Н. Сафонов произвел расчеты режимов ускорения (глава I отчета). Старший инженер Е.И. Розанов и инженер Д.Л. Новиков проводили измерения интенсивности пучка. В подготовке радиотехнических устройств и аппаратуры, а также в проведении экспериментов на ускорителе участвовали: инженер И.Б. Енчевич (Болгария), старшие техники Б.Н. Марченко, Д.В. Максимов, Н.П. Свеченов, старшие механики Б.И. Ключин, А.В. Писулин.

Разработка конструкции радиотехнических устройств, размещенных в камере была выполнена старшим инженером конструкторского бюро И.Х. Ноздриным. Механические и монтажные работы на ускорителе были выполнены группой рабочей экспериментально-механических мастерских под руководством начальника производственно-технического отдела К.А. Байчера.

Л и т е р а т у р а

1. Р.Келлер, М.Фидекаро и М.Барбье.  
Расчет орбит в синхроциклотроне по техническим данным при учете пространственного заряда - аналогия с ангармоническим осциллятором.  
Отчет ЦЕРН а № 57-45 (1957).
2. Р.Келлер и К.Шлиттер.  
Накопление пучка при помощи стохастического ускорения и повышение интенсивности в синхроциклотроне.  
Отчет ЦЕРН а № 58-13 (1958).
3. Р.Келлер.  
Эксперименты на стохастическом ускорителе.  
Доклад на Женевской конференции (1959).
4. J. R. Richardson, B. T. Wright, E. J. Lofgren and B. Peters. Циклотрон с модуляцией частоты.  
*Rhys. Rev.* **73**, 424 (1948).
5. А.И.Гринберг.  
Методы ускорения заряженных частиц.  
ГИИТЛ (1950).
6. K. R. Symon, A. M. Sessler; *Methods of radio-frequency accelerating. CERN Symposium, 1956, (Volum 1, p 44).*
7. Р.А.Мещеров, Е.С.Миронов, Л.М.Неменов, С.Н.Рыбин, Д.А.Холмовский. Ускорение ионов в циклотроне с азимутальной вариацией магнитного поля.  
Атомная энергия, т.8, вып.3 (1960).
8. Ф.Крофорд. Разрушение накопленного в циклотроне пучка из-за кулоновского рассеяния. *UCRL-3464.*  
Отчет Радиационной лаборатории Калифорнийского университета (1956).

9. А.В.Беклемшев . Меры и единицы физических величин.  
ГИТТЛ (1954).
10. К.М. Terwilliger, L.W. Jones and C.H. Prewett  
Beam Starking Experiments.  
Rev. Sc. Inst. 28, 987
- II. Пистолькорс, Антенны.
12. Bohm D. and Foldy L.L.  
Phys. Rev. 72, 649 (1947)