

С 345 е 1

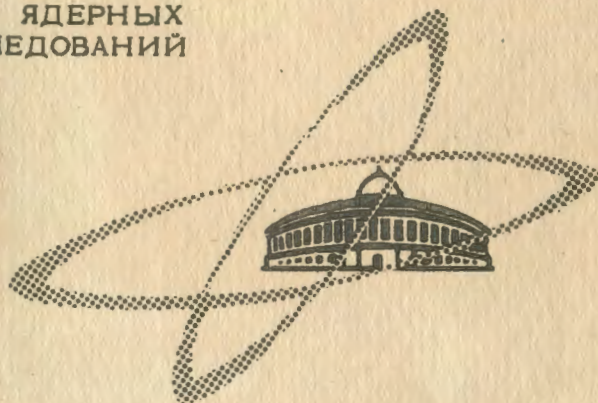
Д - 183

20/8

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

Р-2912



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.И. Данилов, И.В. Пузынин,  
А.Н. Сафонов, Б.В. Феоктистов

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА ПУЧКА  
ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ЗАРЯДОМ  
В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ОИЯИ

1966

P-2012

В.И. Давылов, И.В. Пузынина,  
А.Н. Сафонов, Б.В. Феоктистов

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА ПУЧКА  
ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ЗАРЯДОМ  
В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ОИЯИ

УС 33/1, 2Ф.

## 1. Процесс формирования пучка в синхротроне

Для изучения влияния, которое оказывает пространственный заряд в центре синхротрона на предельно достижимую интенсивность, необходимо знать, как изменяются геометрические размеры сгустка в течение времени захвата. Экспериментальное определение формы пучка представляет значительные трудности. Однако картину формирования пучка в первом приближении можно получить из анализа радиально-фазовых траекторий, получаемых из решения уравнений движения частиц с помощью электронной вычислительной машины (ЭВМ).

Эти уравнения движения для плоскости  $z = 0$  имеют вид <sup>/1/</sup>:

$$\ddot{r} = A_0 (1 - \beta^2)^{3/2} [A_0 (1 - \dot{r}^2) - A_r \dot{r} \dot{\alpha}] + \frac{a^2}{r}, \quad (1)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{r} \{ A_0 (1 - \beta^2)^{3/2} [A_\phi (1 - a^2) - A_r \dot{r} \dot{\alpha}] - \frac{2a\dot{r}}{r} \},$$

где

$$A_0 = \frac{e}{m_0 c^2}, \quad a = r \dot{\phi},$$

$$A_r = E_r + a B_z \cdot Z_0,$$

$$A_\phi = E_\phi - \dot{r} B_z \cdot Z_0,$$

$m_0$  — масса покоя протона,  $\beta = \frac{v}{c}$  — его относительная скорость,  $Z_0$  — импеданс свободного пространства, здесь точкой обозначено дифференцирование по  $ct$ .

Решая уравнения движения частиц для электромагнитного поля синхротрона ОИЯИ при различных начальных условиях, можно найти совокупность радиальных и фазовых траекторий  $r = r(t)$  и  $\Delta\phi = \Delta\phi(t)$  и на основе их дать в первом приближении картину изменения геометрических размеров пучка в центральной области ускорителя. При нахождении фазовых траекторий  $\Delta\phi = \Delta\phi(t)$  принималось, что

$\Delta\phi$  — это фаза частиц по отношению к фазе ускоряющего в.ч. поля, определяемая соотношением

$$\Delta\phi = \int_0^t \omega_2 dt - \phi, \quad (2)$$

где  $\omega_2$  - круговая частота генератора,  $\phi$  - фаза частицы в момент времени  $t$ . В работе [2] подробно описана методика задания магнитного и электрического полей в синхротроне ОИЯИ и введение начальных условий. Так как целью указанной работы было изучение зависимости диапазона частот захвата от основных параметров ускорителя, то рассматривалась устойчивость траекторий, которые начинаются в один и тот же момент времени при  $t = t_0 = 0$ .

Отличие частоты в.ч. генератора от частоты обращения иона в центре задавалось для каждой частицы как

$$\Delta_{\text{нач}} = \frac{\omega_{\text{нач}} - \omega_0}{\omega_0} = \frac{f_{\text{нач}} - f_0}{f_0}. \quad (2')$$

Хотя в действительности частицы захватываются в течение некоторого интервала времени, а не в один момент, при линейной частотной программе можно задавать  $\Delta_{\text{нач}}$  не  $t_{\text{нач}}$ , так как это упрощает программирование и решение уравнений движения на ЭВМ (рис. 1).

Связь между  $\Delta_{\text{нач}}$  и  $t_{\text{нач}}$  выражается соотношением

$$\omega_0 t_{\text{нач}} = - \frac{\Delta_{\text{нач}}}{2\gamma}, \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{d\omega}{dt}$  характеризует наклон частотной программы [2]. При анализе радиальных и фазовых траекторий следует различать 3 группы траекторий:

- 1) траектории, соответствующие частицам, возвращающимся к центру ускорителя, и, следовательно, теряющимся при рассеянии на газе ( $r < r_{\text{нач}} = 1 \text{ см}$ );
- 2) траектории, соответствующие устойчивому ускорению частиц;
- 3) траектории, соответствующие частицам, выпадающим из области фазовой устойчивости ( $\Delta\phi < -\frac{\pi}{2}$ ). После того как рассчитаны радиальные и фазовые траектории  $r(t)$  и  $\Delta\phi(t)$  для значений  $\Delta_{\text{нач}}$ , перекрывающих область частот захвата, они должны быть построены на одном графике с учетом того, что частицы с разными  $\Delta_{\text{нач}}$  начинают движение в моменты времени  $t_{\text{нач}}$ , определяемые по формуле (3). Имея достаточное число таких траекторий, можно получить огибающие радиальных и угловых размеров пучка, найти с хорошей точностью время захвата, а также получить информацию о форме пучка в различные моменты времени.

На рис. 2. показаны радиальные и фазовые траектории, рассчитанные для параметров ускорителя, близких к рабочим параметрам синхротрона ОИЯИ

$$(V_0 = 18 \text{ кв}, \quad \gamma = 0,5 \cdot 10^{-6}, \quad l^2 = 28 \text{ см}^2).$$

Как видно из рисунка, время захвата составляет в этом случае примерно 38 мксек.

На рис. 3. показана экспериментально полученная зависимость интенсивности пучка синхротрона ОИЯИ от времени задержки включения генератора ускоряющего напряжения. Время, в течение которого захватывается основная часть пучка, составляет 40 мксек.

Последовательные изменения формы пучка в медианной плоскости показаны на рис. 4.

Аналогичный расчет был проведен для двух других частотных программ с  $\gamma = 1 \cdot 10^{-6}$  и  $\gamma = 1,667 \cdot 10^{-6}$ .

На рис. 5 и 6 изображено изменение формы пучков для этих случаев. При расчете и построении радиальных и фазовых траекторий  $\Delta\phi_{\text{нач}}$  - начальный сдвиг фазы иона относительно фазы ускоряющего - поля принимался равным нулю [3]. Это означает, что форма пучка в другие моменты времени (см. рис. 4, 5 и 6) дается при максимуме ускоряющего напряжения, которое меняется по закону

$$V(t) = V_0 \cos \int_0^t \omega_2 dt.$$

Частицы, выпадающие из области фазовой устойчивости, образуют сплошной вращающийся цилиндр, ось которого совпадает с осью ускорителя, а радиус уменьшается по мере удаления частоты генератора от  $\omega_0$ . Так как время жизни частиц на радиусах до 5 см меньше 10 мсек [4], то при частоте модуляции 120 гц к началу следующего цикла ускорения эти частицы рассеются на атомах остаточного газа. При частоте включения генератора, большей частоты захвата, частицы, не попадающие в процесс ускорения из-за возвращения к центру, образуют цилиндрический сектор, угол раствора которого меняется от  $170^\circ$  до  $130^\circ$  при изменении  $\gamma$  от  $0,5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,667 \cdot 10^{-6}$ . Цилиндр из выпадающих из ускорения частиц и цилиндрический сектор изображены на рис. 4, 5 и 6 пунктиром.

Изменение высоты пучка происходит в соответствии с адиабатическим затуханием амплитуд вертикальных бетатронных колебаний [5] по закону

$$A_z = \text{const } B_z^{-\frac{1}{2}} \cdot n^{-\frac{1}{2}},$$

где  $B_z$  - осевая составляющая индукции магнитного поля,

$\mu$  - показатель неоднородности магнитного поля. Эта формула получена без учета пространственного заряда, влияние которого на вертикальное движение может быть учтено введением эффективного значения  $\mu_0$ . При достаточно большом пространственном заряде эффективное  $\mu_0$  может быть равным нулю или даже отрицательным, что, по-видимому, имеет место вблизи центра синхроциклотрона, так как в этой области  $\mu$  мало, а пространственный заряд велик. Поэтому огibaющая вертикальных колебаний на радиусах должна быть определена экспериментально. В случае предельно возможной интенсивности высота по крайней мере в течение времени захвата будет определяться апертурой дуанта.

Предположение о том, что на малых радиусах высота пучка равна апертуре дуанта, отвечает также физической картине действия пространственного заряда (большие дефокусирующие силы пространственного заряда при малых фокусирующих силах магнитного поля и относительно большое пребывание сгустка частиц в центральной области вследствие медленного роста набора энергии с радиусом). Из измерений было получено, что высота пучка на радиусе 50 см составляет 6,5 см, поэтому в первом приближении вертикальный размер пучка с уменьшением радиуса был взят увеличивающимся линейно до апертуры дуанта  $D = 12$  см.

Размеры пучка в различные моменты времени для значений

$\gamma = 0,5 \cdot 10^{-6}$ ;  $1 \cdot 10^{-6}$  и  $1,867 \cdot 10^{-6}$  приведены в таблице 1. На рисунке 7 показана типовая конфигурация и расположение координатных осей.

#### Ограничение тока пучка вследствие нарушения вертикальной устойчивости

Для последовательности конфигураций, приведенных в таблице 1 (случай  $\gamma = 0,5 \cdot 10^{-6}$  - наиболее соответствующий реальным условиям ускорения) были рассчитаны функции, характеризующие зависимость от радиуса сил пространственного заряда  $eE_{r \text{ кул}}$ ,  $eE_{z \text{ кул}}$ ,  $eE_{\phi \text{ кул}}$  (где  $E_{r \text{ кул}}$ ,  $E_{z \text{ кул}}$  и  $E_{\phi \text{ кул}}$  - составляющие напряженности поля пространственного заряда). Расчет производился на ЭВМ по следующим формулам /5/.

Вертикальная составляющая поля ( в системе СИ)

$$E_z = -\frac{\delta v}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \left[ \frac{\partial U_0(\rho, r, z+h, a)}{\partial z} - \frac{\partial U_0(\rho, r, h-z, a)}{\partial z} \right] \Big|_{a=0}^{a=\phi+\phi_0} + \left[ \frac{\partial U_0(\rho, r, z+h, a)}{\partial z} - \frac{\partial U_0(\rho, r, h-z, a)}{\partial z} \right] \Big|_{a=0}^{a=\phi-\phi_0} \right\} \Big|_{\rho=R_1}^{\rho=R_2} \quad (4)$$

где

$$\frac{\partial U_0}{\partial z} = \frac{\partial U_0}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial z};$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial \eta} = r \sin \alpha \operatorname{Arsh} \frac{\rho - r \cos \alpha}{\sqrt{\eta^2 + r^2 \sin^2 \alpha}} - \sqrt{(\rho+r)^2 + \eta^2} \cdot E(k, \psi) -$$

$$-\frac{r^2 + \eta^2 - \rho^2}{\sqrt{(\rho+r)^2 + \eta^2}} \cdot F(k, \psi) + \frac{\eta^2}{\sqrt{(\rho+r)^2 - \eta^2}} \left[ \frac{\sqrt{\eta^2 + r^2} + \rho}{\sqrt{\eta^2 + r^2} - r} \cdot \Pi(n_1, k, \psi) + \right.$$

$$\left. + \frac{\sqrt{\eta^2 + r^2} - \rho}{\sqrt{\eta^2 - r^2} + r} \Pi(n_2, k, \psi) \right]; \quad \psi = \frac{\alpha - \pi}{2}.$$

Радиальная составляющая поля:

$$E_r = -\frac{\delta v}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \left[ \frac{\partial U_0(\rho, r, z+h, a)}{\partial r} + \frac{\partial U_0(\rho, r, h-z, a)}{\partial r} \right] \Big|_{a=0}^{a=\phi+\phi_0} + \left[ \frac{\partial U_0(\rho, r, z+h, a)}{\partial r} + \frac{\partial U_0(\rho, r, h-z, a)}{\partial r} \right] \Big|_{a=0}^{a=\phi-\phi_0} \right\} \Big|_{\rho=R_1}^{\rho=R_2} \quad (5)$$

где

$$\frac{\partial U_0}{\partial r} = -\frac{r}{2} \sin 2\alpha \cdot \operatorname{Arsh} \frac{\eta}{\sqrt{\rho^2 + r^2 + 2\rho r \cos \alpha}} +$$

$$+ \eta \sin \alpha \operatorname{Arsh} \frac{\rho - r \cos \alpha}{\sqrt{\eta^2 + r^2 \sin^2 \alpha}} + \frac{r}{2} \cos 2\alpha \operatorname{arctg} \frac{\eta(\rho - r \cos \alpha)}{r \sin \alpha \sqrt{\rho^2 - r^2 + \eta^2} - 2\rho r \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{\eta \sqrt{(\rho+r)^2 + \eta^2}}{2r} \cdot E(k, \psi) - \frac{\eta(\eta^2 + r^2 + 2\rho^2)}{2r \sqrt{(\rho+r)^2 + \eta^2}} \cdot F(k, \psi) +$$

$$+ \frac{\eta(\rho-r)\rho^2}{2r(\rho+r)\sqrt{(\rho+r)^2 + \eta^2}} \cdot \Pi(n_3, k, \psi) -$$

$$- \frac{\eta r}{2\sqrt{(\rho+r)^2 + \eta^2}} \left[ \frac{\sqrt{\eta^2 + r^2} + \rho}{\sqrt{\eta^2 + r^2} - r} \Pi(n, k, \psi) + \frac{\sqrt{\eta^2 + r^2} - \rho}{\sqrt{\eta^2 + r^2} + r} \Pi(n_2, k, \psi) \right]. \quad (6)$$

Азимутальная составляющая поля:

$$E_{\phi} = -\frac{\delta v}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \{ f_0(\rho, r, z+h, \alpha) + f_0(\rho, r, h-z, \alpha) \} \quad (7)$$

$\left. \begin{array}{l} \alpha = \phi_0 + \phi \quad \rho = R_2 \\ \alpha = \phi_0 - \phi \quad \rho = R_1 \end{array} \right\}$

где

$$f_0(\rho, r, \eta, \alpha) = \frac{\eta}{2} \sqrt{\rho^2 + r^2 + \eta^2 - 2\rho r \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{\rho^2 - r^2 \cos 2\alpha}{2} \cdot \text{Arsh} \frac{\eta}{\sqrt{\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos \alpha}} +$$

$$+ r \cos \alpha \left[ \eta \text{Arsh} \frac{\rho - r \cos \alpha}{\sqrt{\eta^2 + r^2 \sin^2 \alpha}} - r \sin \alpha \arctg \frac{\eta(\rho - r \cos \alpha)}{r \sin \alpha \sqrt{\rho^2 + r^2 + \eta^2 - 2\rho r \cos \alpha}} \right]$$

В формулах (4), (5) и (6) обозначено

$$n_1 = \frac{2r}{\sqrt{\eta^2 + r^2} - r}, \quad n_2 = \frac{2r}{\sqrt{\eta^2 + r^2} + r}, \quad n_3 = \frac{2\rho r}{(\rho + r)^2},$$

$$k = \frac{4\rho^2}{(\rho + r)^2 + \eta^2}$$

$r$  - текущая координата,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$  - параметры, определяющие размеры конфигураций.

Расчет составляющих кулоновского поля пространственного заряда производился для максимальных значений, т.е. распределение  $E_{z \text{ кул}}$  определялось при  $z=h$  и  $\phi = 0$ , распределение составляющей  $E_{r \text{ кул}}$  при  $z=0$  и  $\phi=0$ ,

Расчет составляющих проводился с точностью до множителя  $\frac{\delta v}{\epsilon_0}$  с учетом влияния металлических поверхностей крышек дуанта и в свободном пространстве.

Так как в синхротроне ОИЯИ один дуант, при расчете ограничения тока пучка по азимутальной составляющей поля  $E_{\phi \text{ кул}}$ , функции, выражающие зависимость

$E_{\phi \text{ кул max}}$  от радиуса, брались как средние между функциями, рассчитанными с учетом влияния металлических поверхностей и без него. Расчет ограничения по вертикальным силам производился только с учетом влияния металлических поверхностей, поэтому предельные значения токов несколько занижены. Графики функций  $f_x$ ,  $f_r$ ,  $f_{\phi}$ , пропорциональных соответствующим составляющим поля, приведены на рисунках 8-16.

(Сплошные линии - с учетом металлических поверхностей, пунктирные - без учета).

Т а б л и ц а 1

γ	№№	t мксек	R <sub>1</sub> см	R <sub>2</sub> см	2h см	2φ <sub>0</sub> рад.	град.	Примечание
0,5·10 <sup>-6</sup>	1	-20	1	6,5	12	2,9	166	Возврат к центру
	2	-5	1	9	12	2,76	158	5 мксек после начала захвата в ускорение
	3	20	1	15	12	3,14	180	7,5 мксек до конца захвата
	4	27,5	1	17	12	3,7	212	конец захвата
	5	32,5	5	18	11	3,37	193	устойчивое ускорен.
	6	42,5	8	20	10	3,4	195	устойчивое ускорен.
	7	50	10	21	10	3,4	195	устойчивое ускорен.
	8	62,5	13	23	9	3,2	183	устойчивое ускорен.
	9	150	29	36	8	3,05	175	устойчивое ускорен.
	10	150	1	10	12	6,28	360 <sup>0</sup>	частицы выпали из области фазовой устойчив.
1·10 <sup>-6</sup>	1	-13	1	6	12	2,45	140	Возврат к центру
	2	-10	1	6	12	1,1	63	2 мксек после начала захвата
	3	-4	1	8,4	12	2,5	143	8 мксек после нач. захвата
	4	0	1	9,7	12	2,45	140	12 мксек после нач. захвата
	5	12	1	15	12	2,93	167	конец времени захв.
	6	14	4,5	16	12	3,12	179	устойчивое ускорен.
	7	20	9	19	11	2,4	138	устойчивое ускорен.
	8	70	28,4	34,4	8	2,56	144	устойчивое ускорен.
1.66·10 <sup>-6</sup>	1	-6	1	6,7	12	2,3	132	4 мксек после начала захвата
	2	6	1	14	12	2,35	134	конец захвата
	3	10	7	16,7	12	2,72	156	устойчивое ускорен.
	4	40	28	33	8	2,0	115	устойчивое ускорен.
	5	40	1	11	12	6,28	360	частицы выпали из области фазов. устойчивости.

Максимальный ток, удерживаемый в каждой конфигурации, подсчитывался из условия равенства вертикальных сил (сил кулоновского расталкивания и фокусирующих сил магнитного поля). Силы пространственного заряда и фокусирующие силы брались усредненными по горизонтальной поверхности рассматриваемой конфигурации.

Уменьшение вертикальной составляющей кулоновских сил к краям сгустка ( $\phi = \pm \phi_0$ ) не учитывалось.

Рассматривались следующие случаи фокусирующих сил:

- 1) только магнитная фокусировка (с кольцами, увеличивающими спад поля вблизи центра /7/, и без колец),
- 2) магнитная фокусировка и смещение на дуанте,
- 3) магнитная фокусировка, смещение на дуанте и дополнительная электростатическая фокусировка.

При помощи кривой спада магнитного поля и зависимости синхронной частоты от радиуса подсчитывалась зависимость величины  $\frac{F_m}{ez}$  от радиуса по формуле:

$$\frac{F_m}{ez} = -\omega B_z \eta, \quad (8)$$

где  $F_m$  [Н] - вертикальная магнитная фокусирующая сила,  $e$  [к] - заряд электрона,  $\omega$  [ $\frac{рад}{сек}$ ] - круговая частота обращения синхронной частицы,  $B_z$  [тл] - индукция магнитного поля,  $\eta$  - коэффициент неоднородности магнитного поля,  $Z$  [М] - расстояние от медианной плоскости.

Для нахождения электрических сил, обусловленных напряжением смещения и дополнительной электростатической фокусировкой /8/, производились измерения соответствующих вертикальных составляющих напряженности электрического поля  $E_z$  в электролитической ванне /9/. Составляющие электрического поля  $E_z$  от напряжения смещения находились при подаче напряжения только на дуант, а вертикальная составляющая от напряжения смещения на дуанте и дополнительной электростатической фокусировки определялась при подаче напряжения на дуант и фокусирующие электроды от делителя, так, чтобы напряжение смещения  $U_{сд} = 0,135 U_\phi$ , где  $U_\phi$  - напряжение на фокусирующих электродах. Такое соотношение между  $U_{сд}$  и  $U_\phi$  соответствует напряжениям, используемым на синхротронном ОИЯИ. При расчете фокусирующего действия от напряжения смещения и дополнительной фокусировки учитывалось только среднее поле. Графики, показывающие зависимость вертикальных фокусирующих сил от радиуса, приведены на рис. 17.

Предельная объемная плотность  $\delta_{vz} [\frac{k}{m^3}]$  определялась из следующих соотношений:

$$\bar{E}_z = -\bar{f}_z \cdot \frac{\sigma_{vz}}{\epsilon_0} = \frac{\bar{F}_m}{e}; \quad (9)$$

$$\bar{E}_z = -\bar{f}_z \cdot \frac{\sigma_{vz}}{\epsilon_0} = \frac{1}{e} [\bar{F}_{сд} + \bar{F}_m]; \quad (10)$$

$$\bar{E}_z = -\bar{f}_z \cdot \frac{\sigma_{vz}}{\epsilon_0} = \frac{1}{e} [\bar{F}_{сд\phi} + \bar{F}_m]; \quad (11)$$

где  $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} [\frac{ф}{м}]$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $F_{сд}$  [Н] - вертикальная составляющая поля напряжения смещения на дуанте,  $F_{сд\phi}$  [н] - вертикальная составляющая суммарной силы от напряжения смещения и дополнительной электростатической фокусировки. Черта обозначает усреднение по горизонтальной поверхности конфигурации.

Зная предельную плотность, можно найти максимальный ток для рассматриваемой конфигурации по формуле

$$I_{z \max} = \sigma_{vz} \cdot V \cdot F_m, \quad (12)$$

где  $I_{z \max}$  [а] - максимальный ток, удерживаемый вертикальными фокусирующими силами,  $V$  [м] - объем конфигурации,  $F_M$  [Гц] - частота модуляции,  $\sigma_{vz} [\frac{k}{m^3}]$  - предельная объемная плотность.

Результаты расчета для  $F_m = 120$  гц сведены в таблицу 2, а соответствующие графики приведены на рис. 18. Учет влияния напряжения смещения на дуанте и дополнительный электростатической фокусировки производился только для конфигураций 2,3 и 4 (в интервале времени захвата).

### 3. Ограничение тока пучка, вызываемое азимутальной составляющей пространственного заряда

Радиально-фазовое движение частиц в ускоряемом сгустке таково, что на одном краю сгустка ( $\phi = +\phi_0$ ) частицы увеличивают свою энергию, а на другом ( $\phi = -\phi_0$ ) уменьшают ее. Составляющая поля пространственного заряда  $E_{сд}$  кул на краю сгустка, где частицы ускоряются, направлена против ускоряющего поля, поэтому величина ускоряющего тока может быть ограничена величиной

азимутальной составляющей ускоряющего поля дуанта. Частицы, находящиеся на краю ступки, перестают ускоряться и могут быть потеряны при  $E_{\phi \text{ кул}} = E_{\phi \text{ уск}}$ .

Т а б л и ц а 2

№№ конф.	$\sigma_{\nu\kappa}$ маг. фок.		$\sigma_{\nu\kappa}$ маг. фок. + смещение		$\sigma_{\nu\kappa}$ маг. фок. + смеще-ние + 90 п. фок.		$I_{\text{макс}}$ маг. фок.		$I_{\text{макс}}$ маг. фок. + смещение		$I_{\text{макс}}$ маг. фок. + смещ. + доп. фок.		
	с коль-цами	без	с коль-цами	без	с коль-цами	без	с коль-цами	без	с коль-цами	без	с коль-цами	без	
		$\times 10^{-8}/\kappa/\text{м}^3/$				$\times 10^{-4}/\text{м}^3/$				$10^{-6}/\text{а}/$			
2.	8,7	7,5	II, I	9,9	I4,4	I3, I	I3,25	I,4	I,2	I,8	I,6	2,3	2,2
3.	I2, I	9,4	I2,8	I0,0	I5,7	I2,9	37,09	5,4	4,2	5,7	4,5	7,0	5,7
4.	I3,2	9, I	I3,7	9,6	I6,0	II,9	63,94	I0, I	7,0	I0,5	7,3	I2,3	9, I
5.	I9,8	I2,8					55,42	I3,2	8,5				
6.	26,8	I5,2					57, I2	I8,3	I0,4				
7.	32,6	I7,0					57,97	22,6	II,8				
8.	43,5	I9, I					5I,84	27,0	II,9				
9.	88,3	35,7					55,5I	58,8	23,8				

Азимутальная составляющая ускоряющего электрического поля определялась по картине эквипотенциальных линий дуанта в медианной плоскости, полученных на электролитической ванне. На рис. 19 приведена зависимость от радиуса азимутальной составляющей ускоряющего электрического поля  $E_{\phi \text{ уск}}$  (усредненной по азимутальному углу), где  $E_{\phi \text{ уск}} > 0,1 E_{\phi \text{ уск макс}}$ . Функции  $f_{\phi}$ , характеризующие зависимость кулоновских сил на краю ступки в медианной плоскости от радиуса, приведены на рисунках 8-16.

После усреднения по радиусу  $f_{\phi}$  и  $E_{\phi \text{ уск}}$  для каждой конфигурации можно рассчитать предельную плотность частиц и максимальный ток, ускоряемый при данном напряжении на дуанте. Расчетные формулы аналогичны формулам (6) и (7) и имеют вид

$$E_{\phi} = f_{\phi} \cdot \frac{\sigma_{\nu\kappa} \phi}{\epsilon_0} E_{\phi \text{ уск}}, \quad (4)$$

$$I_{\phi} = \sigma_{\nu\kappa} \phi \cdot V \cdot F_m, \quad (5)$$

где черта обозначает усреднение по радиусу в медианной плоскости вдоль края рассматриваемой конфигурации.

Результаты расчета сведены в таблицу 3, соответствующие графики приведены на рис. 18.

Т а б л и ц а 3

№№ конф.	$f_{\phi}$	$E_{\phi \text{ уск}}$	$\sigma_{\nu\kappa} \phi$	$I_{\phi \text{ макс}}$
2.	I,8	39	I8,9	3,0
3.	2,2	40,2	I6,9	7, I
4.	2,5	40,3	I4,2	I0,9
5.	2,3	42,2	I6,0	I0,7
6.	2, I	4I,40	I7,2	II,8
7.	2, I	40,8	I7,4	I2, I
8.	I,9	40	I8, I	II,3
9.	I,6	35,2	I9,7	I3, I

З а к л ю ч е н и е

В работе расчетным путем определены геометрические размеры пучка синхротрона ОИЯИ для нескольких моментов времени в начальной стадии ускорения. Тот факт, что расчетное время захвата частиц в устойчивый режим ускорения близко к экспериментально определенному, говорит о достаточной точности определения геометрических размеров пучка в медианной плоскости.

Произведенные расчеты указывают, что для существующих параметров синхротрона ОИЯИ можно надеяться получить токи до 10 мка при частоте модуляции  $F = 120 \text{ гц}$ .

Характерным является диапазон радиусов  $R = 0 - 10 \text{ см}$ , на которых из-за нарушения вертикальной устойчивости происходит ограничение тока ускоряемых ионов в синхротроне, в то время как на радиусах  $R = 25-30 \text{ см}$ , по-видимому, могут быть удержаны токи в десятки микроампер.

Отсюда ясно видно, что основное внимание при решении задач увеличения интенсивности должно быть уделено созданию больших фокусирующих вертикальных сил на малых радиусах в диапазоне  $R=0 - 10 \text{ см}$ . Следует отметить, что ограничение интенсивности в синхротроне, вызываемое азимутальной составляющей поля пространственного за-



ряда, дает по величине такие же токи, как и ограничение, вызываемое нарушением вертикальной устойчивости, поэтому получение токов величиной порядка 20 мка, по-видимому, удастся осуществить при условии двух-трехкратного увеличения напряженности высокочастотного поля (улучшение геометрии центральной части ускорителя и увеличение в.ч. напряжения на дуанте) с пропорциональным возрастанием частоты модуляции.

Подробного рассмотрения влияния на достигаемый ток в синхротроне радиальной составляющей поля пространственного заряда не проводилось. Однако оценки предельных объемных плотностей  $\sigma_{vz}$  на внутренней и внешней границах пучка в рассматриваемых конфигурациях показывает, что максимальные объемные плотности  $\sigma_{vz \max}$  на 3-4 порядка больше, чем соответствующие плотности  $\sigma_{vz \max}$  и  $\sigma_{v\phi \max}$ .

При расчете предельных значений плотностей  $\sigma_{vz}$ ,  $\sigma_{v\phi}$  и токов  $I_z$  и  $I_{\phi}$  предполагалось, что источник ионов в состоянии обеспечить число ионов, достаточное для заполнения рассматриваемых конфигураций.

Рассмотрение статической картины взаимодействия фокусирующих магнитных и электрических сил и дефокусирующих сил пространственного заряда, безусловно, является первым приближением. Подобный анализ предельной интенсивности, достигаемой в синхротроне, следует попытаться провести при учете динамики движения ускоряемых ионов.

Для синхротрона ОИЯИ максимально зарегистрированные токи за период 1960-1965 г.г. составляли на радиусе  $R = 60$  см  $I = 2,2$  мка без фокусировки и  $I = 4,6$  мка при электростатической фокусировке.

В заключение авторы выражают благодарность Т.В. Рыльцевой за помощь при расчетах на ЭВМ, В.И. Винокурову за измерение полей в электролитической ванне и Ю.В. Максимова за подготовку аппаратуры для измерения времени захвата.

#### Л и т е р а т у р а

1. С.П. Ломнев, Г.А. Тягунов. Ускорители, Атомиздат, 1960.
2. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Д.Л. Новиков, Э.А. Подферов, А.Н. Сафонов, Б.Ф. Феоктистов. Расчет начальной области устойчивых фазовых колебаний в синхротроне. Препринт ОИЯИ, Р-1448, Дубна, 1963.
3. D. Bohm, L.L. Foldy. Phys. Rev., **72**, 649 (1947).
4. И.Б. Енчевич, А.Л. Савенков, А.Н. Сафонов, М.Ф. Шульга. О возможности значительного увеличения интенсивности внутреннего пучка протонов в шестиметровом синхротроне. Б1-1514, Дубна, 1960.
5. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей. Физматгиз, Москва, 1962.
6. В.И. Данилов, И.В. Пузынин. Электростатическое поле равномерно заряженных объемов цилиндрической конфигурации. Препринт ОИЯИ, Р-2131, Дубна, 1965.

7. В.И. Данилов и др. Возможные пути повышения эффективности шестиметрового синхротрона. ОИЯИ, Б1-1515, Дубна, 1963.
8. А.Н. Сафонов, А.В. Шестов. Исследование электрического поля в центральной области синхротрона ОИЯИ при помощи электролитической ванны. ОИЯИ, Б1-1543, Дубна, 1963.
9. В.И. Данилов, И.Б. Енчевич, Б.Н. Марченко, Э.А. Подферов, А.И. Сафонов, А.В. Шестов. Увеличение тока внутреннего пучка синхротрона ОИЯИ введением дополнительной электростатической фокусировки. Препринт ОИЯИ, Р-1853, Дубна, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 августа 1966 г.

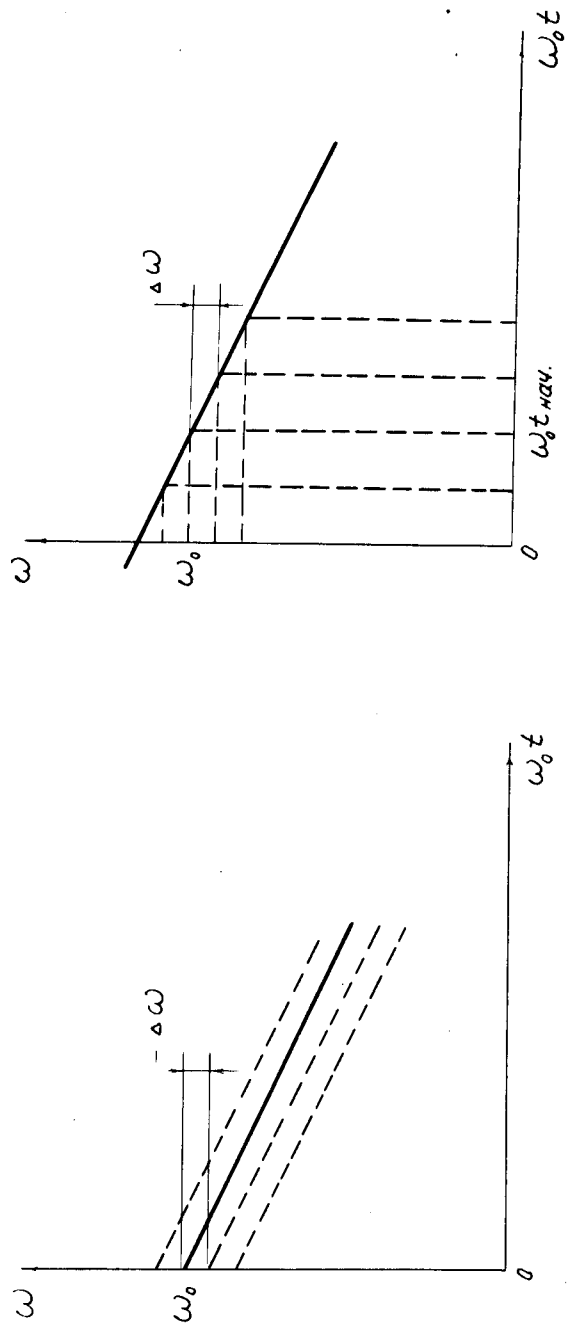


Рис. 1. Два способа задания начального отличия частоты генератора  $\omega$  от частоты обращения иона в центре  $\omega_0$ .

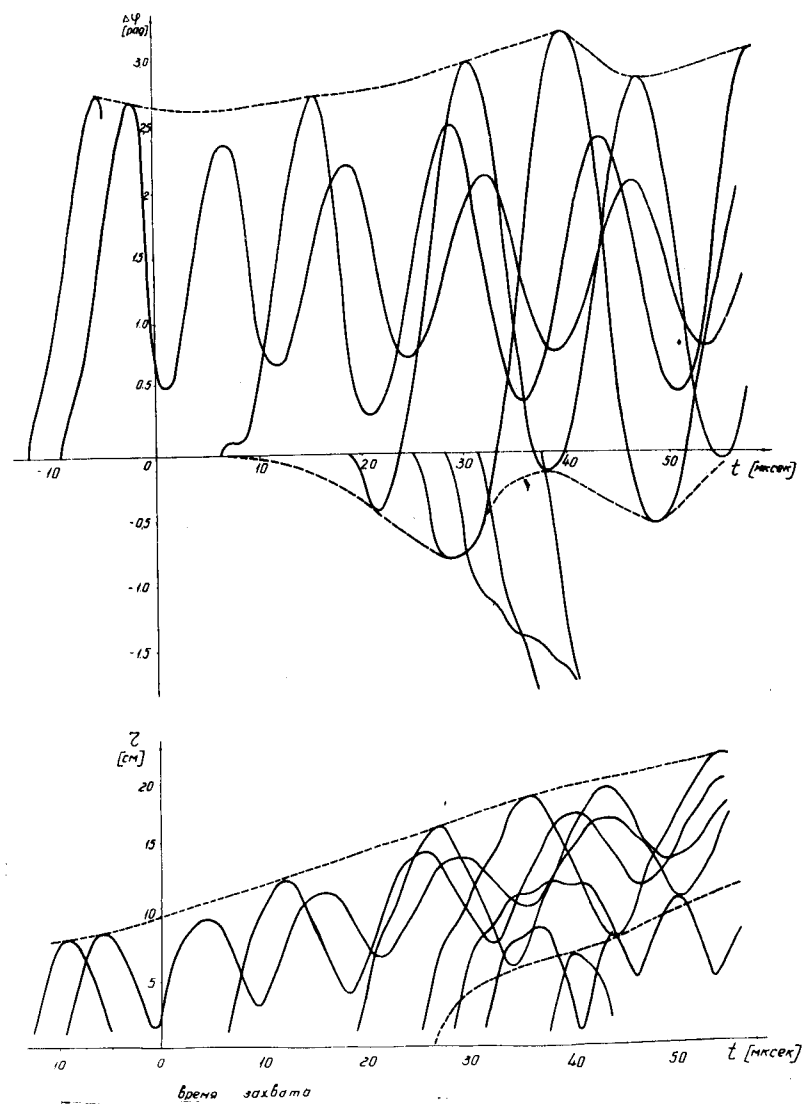


Рис. 2. Радиальные и фазовые траектории ( $\gamma = 0,510^{-6}$  и  $V_0 = 18$  кв)

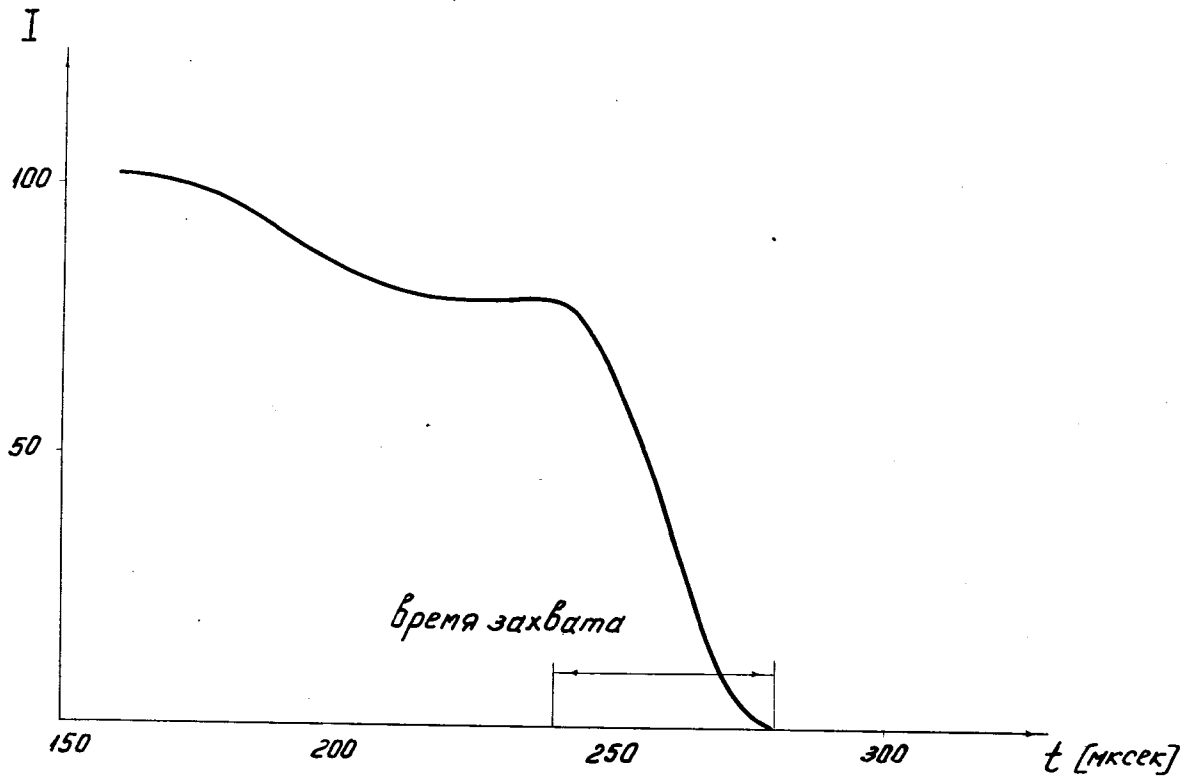


Рис. 3. Зависимость интенсивности от времени задержки включения в. ч. генератора в синхротроне ОИЯИ.

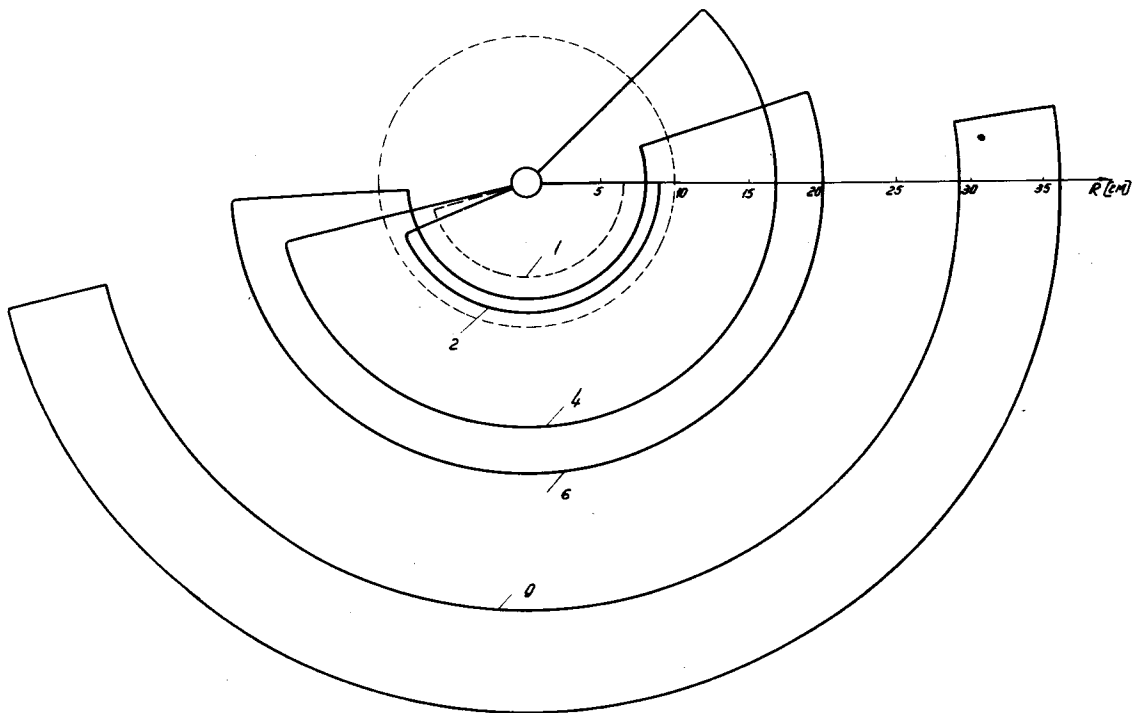


Рис. 4. Последовательные изменения формы пучка для  $\gamma = 0,5 \cdot 10^{-4}$  и  $V_0 = 18$  кв.

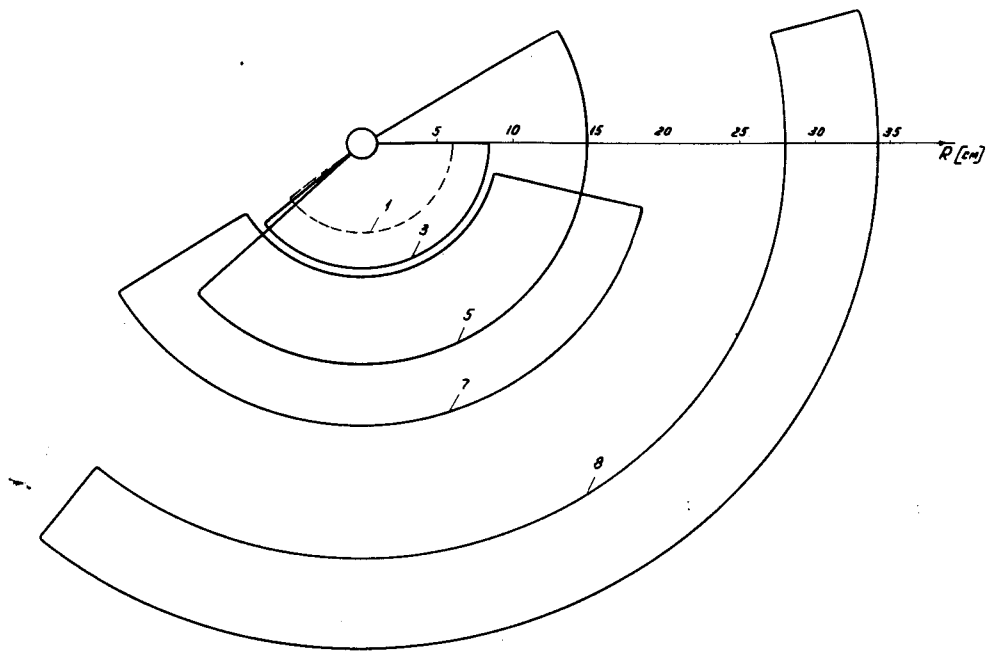


Рис. 5. Последовательные изменения формы пучка для  $\gamma = 1 \cdot 10^{-6}$  и  $V_0 = 18$  кв.

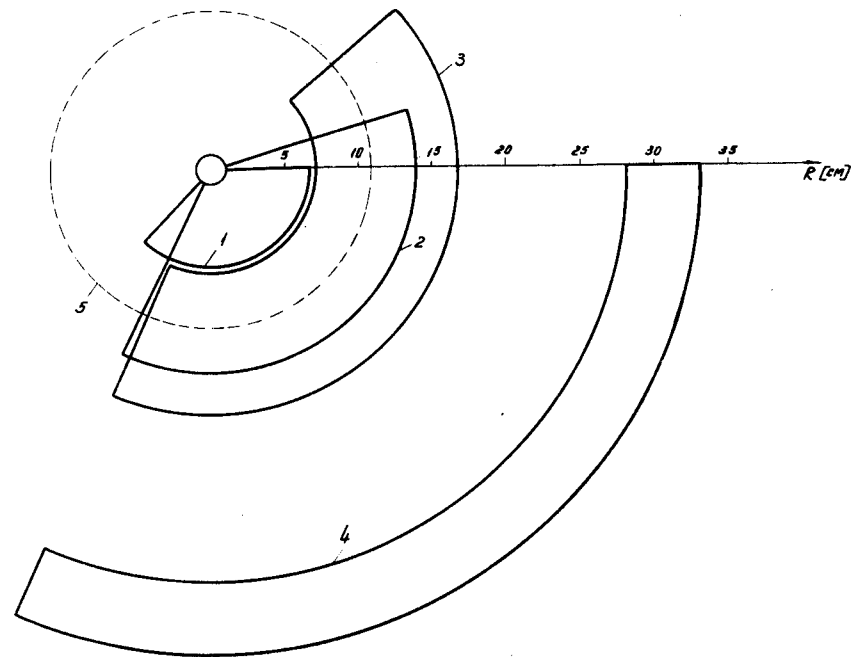


Рис. 6. Последовательные изменения формы пучка для  $\gamma = 1,667 \cdot 10^{-6}$  и  $V_0 = 18$  кв.

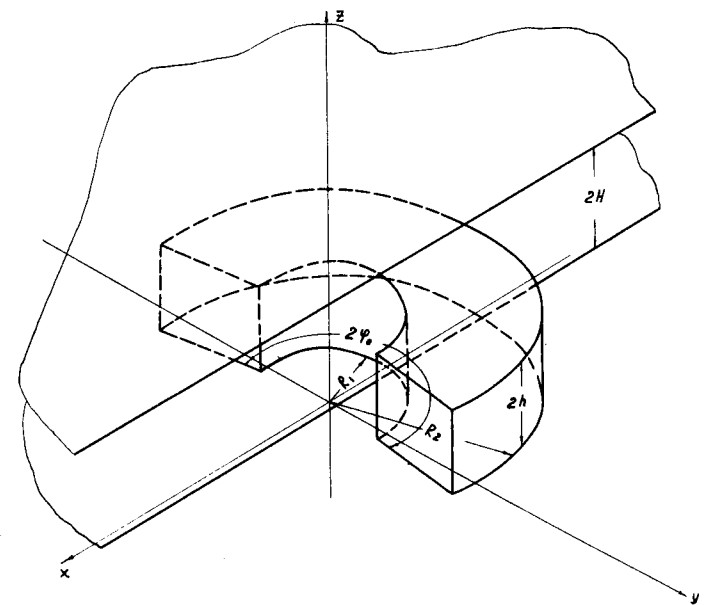


Рис. 7. Форма пучка.

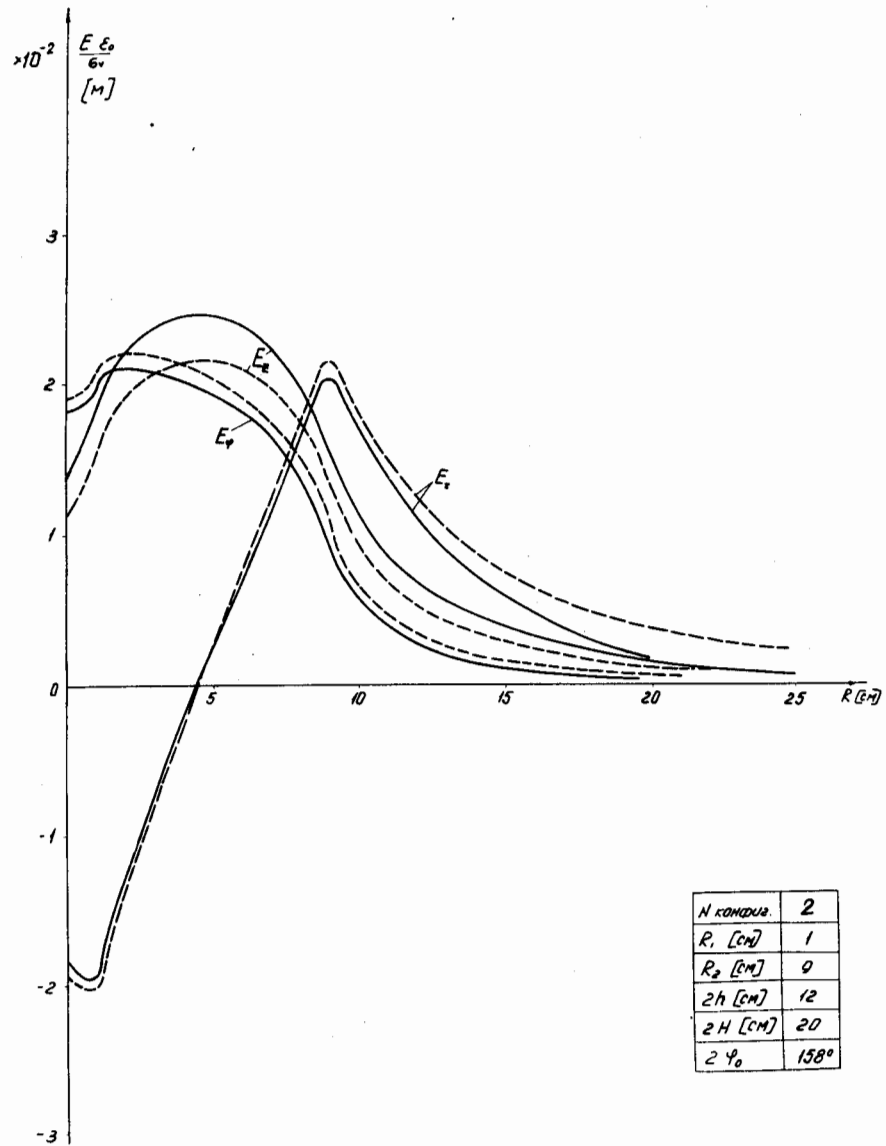


Рис. 8. Компоненты поля.

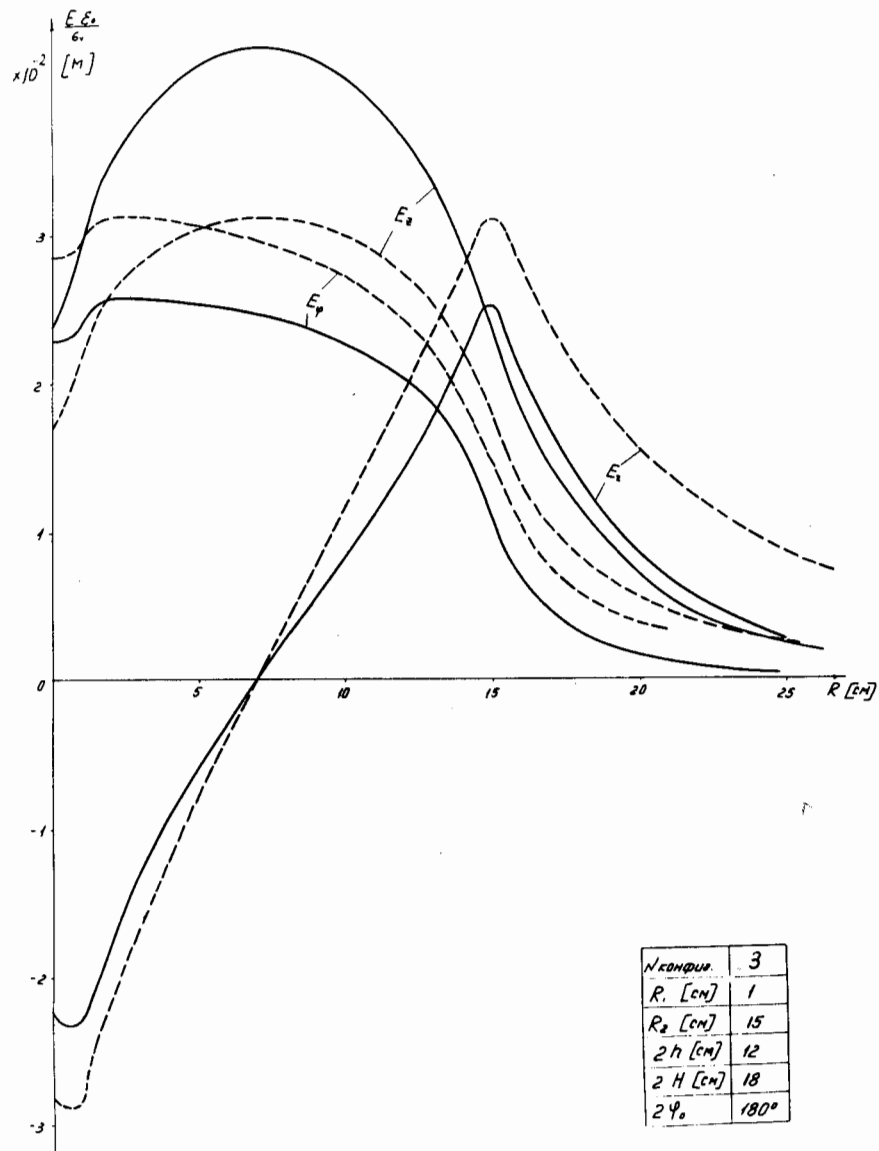


Рис. 9. Компоненты поля.

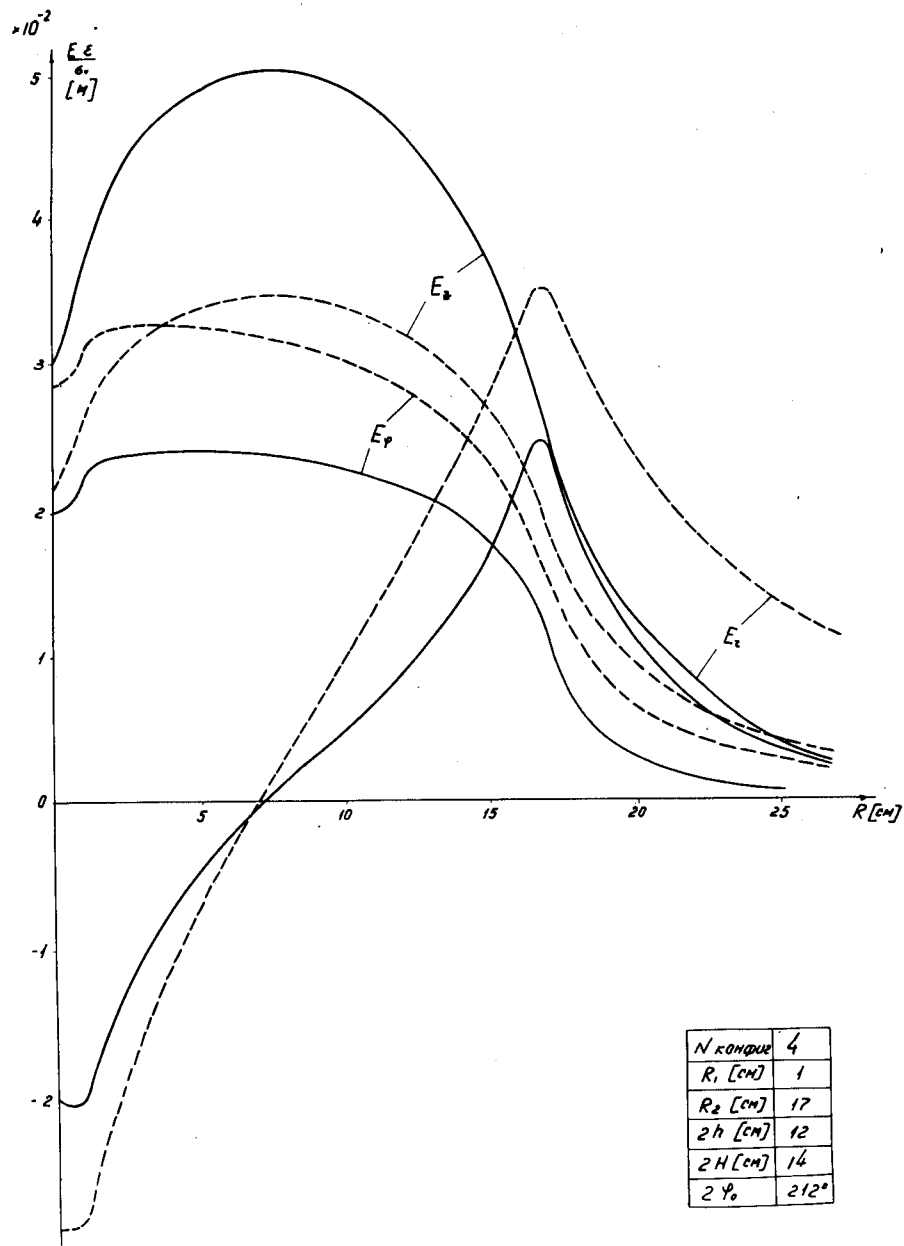


Рис. 10. Компоненты поля.

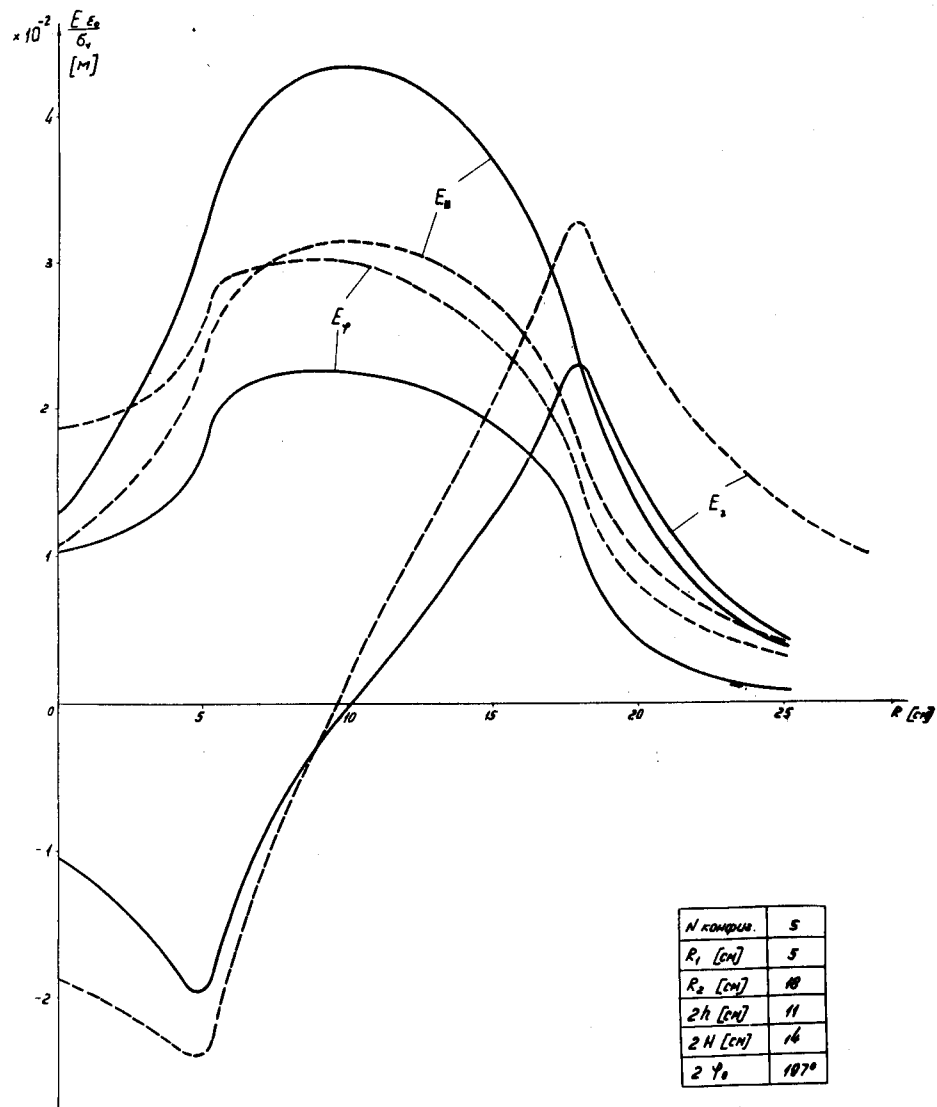


Рис. 11. Компоненты поля.

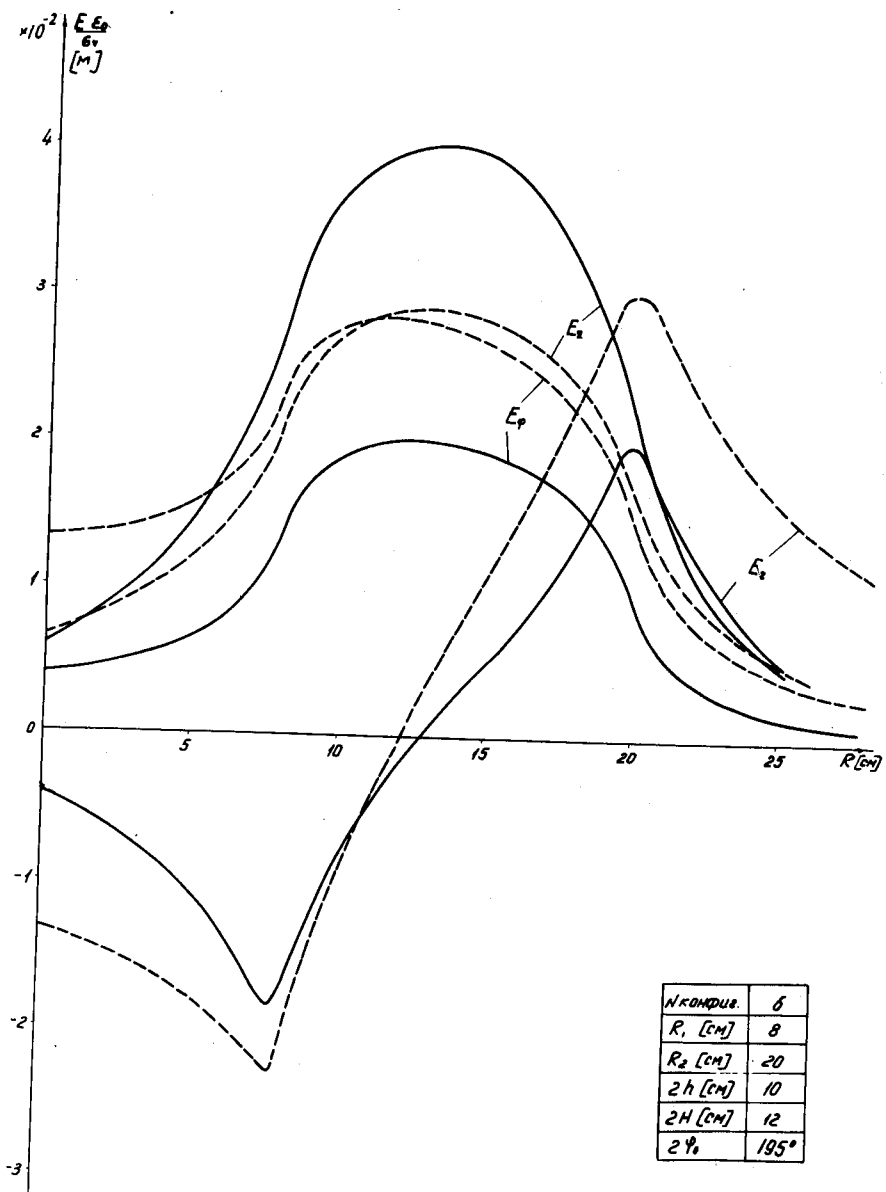


Рис. 12. Компоненты поля.

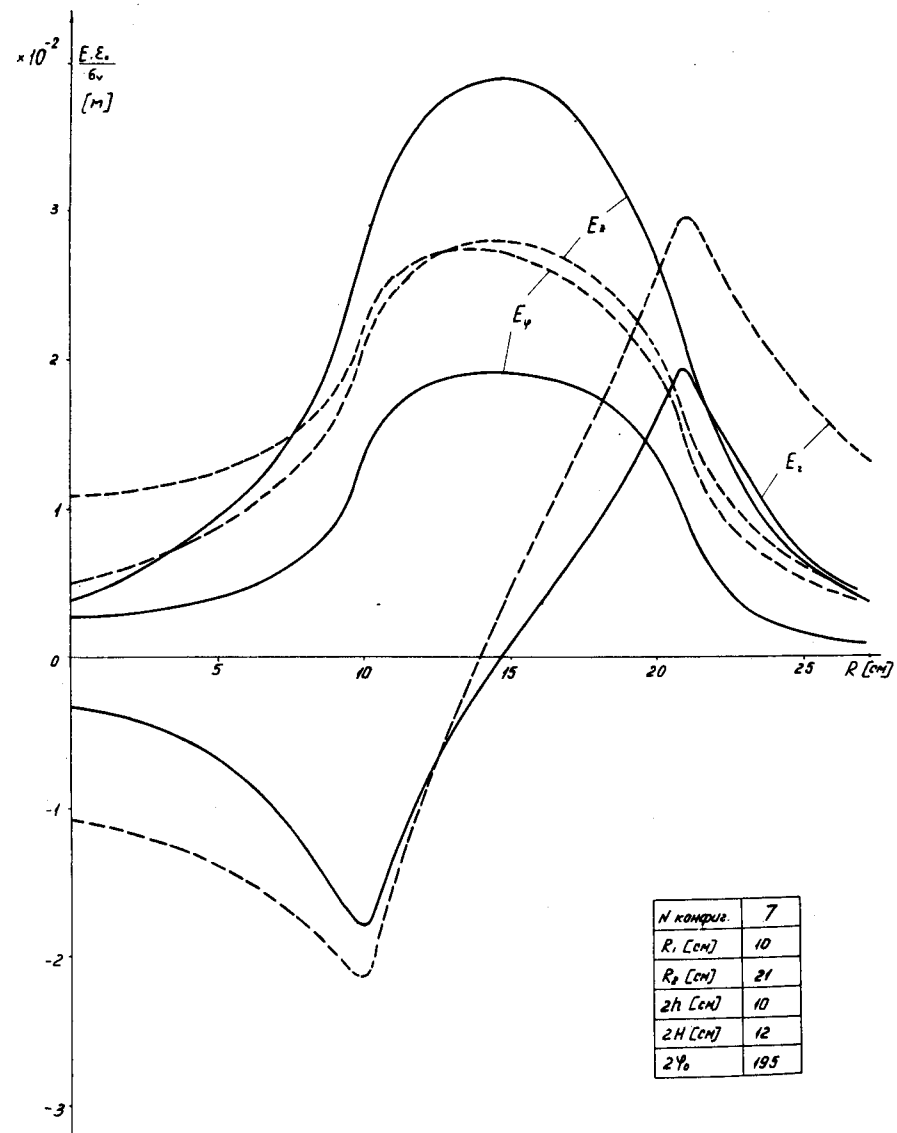


Рис. 18. Компоненты поля.

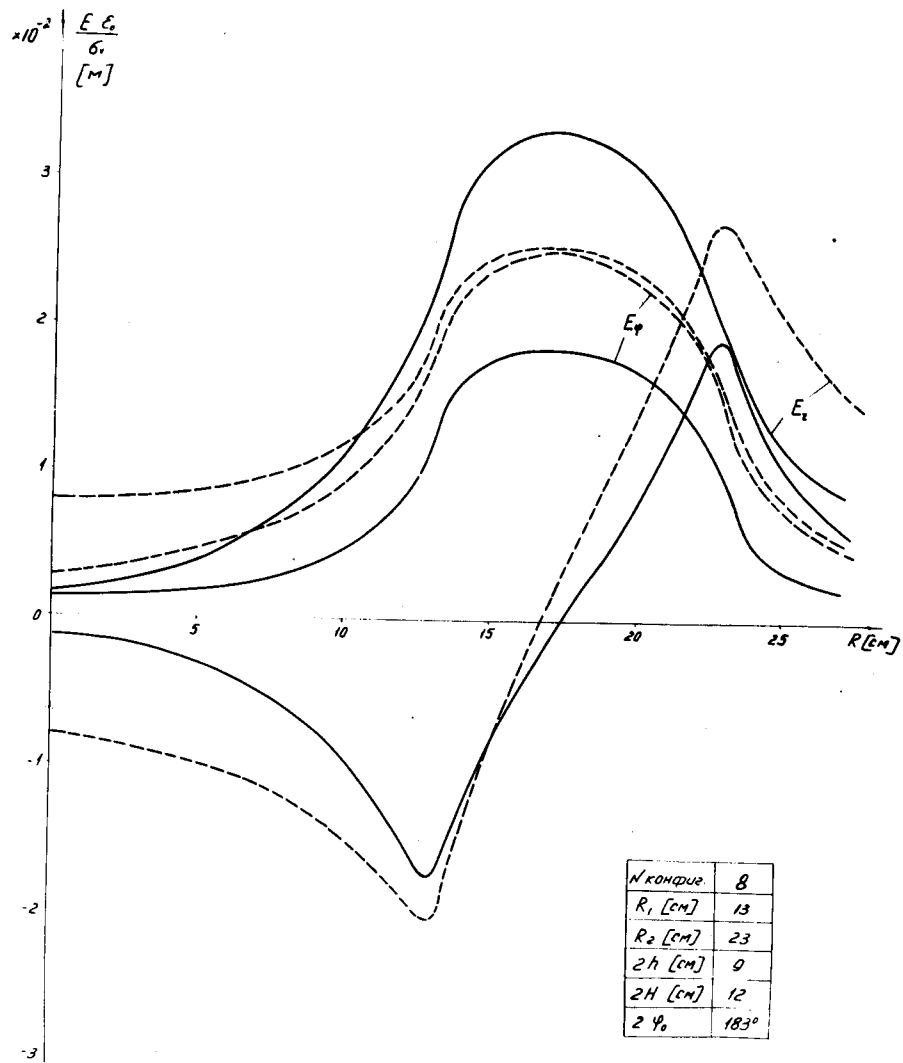


Рис. 14. Компоненты поля.

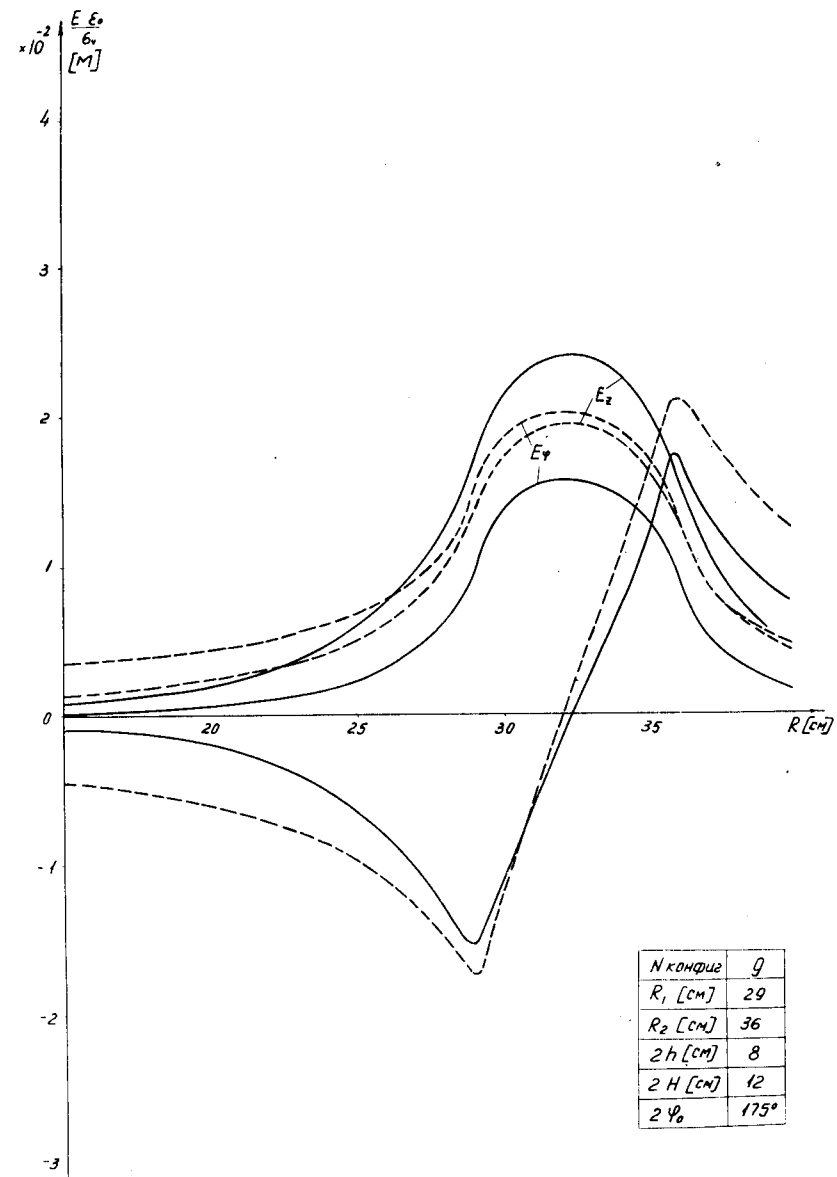
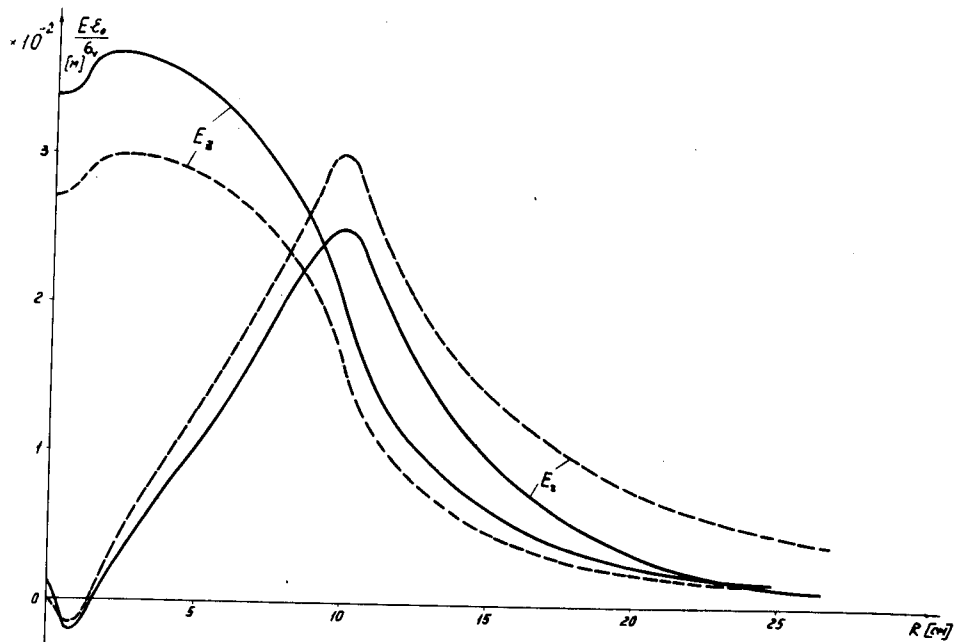


Рис. 15. Компоненты поля.





$N$ коллиз	10
$R_1$ [cm]	1
$R_2$ [cm]	10
$2h$ [cm]	12
$2H$ [cm]	20
$2\varphi_0$	$180^\circ$

Рис. 16. Компоненты поля.

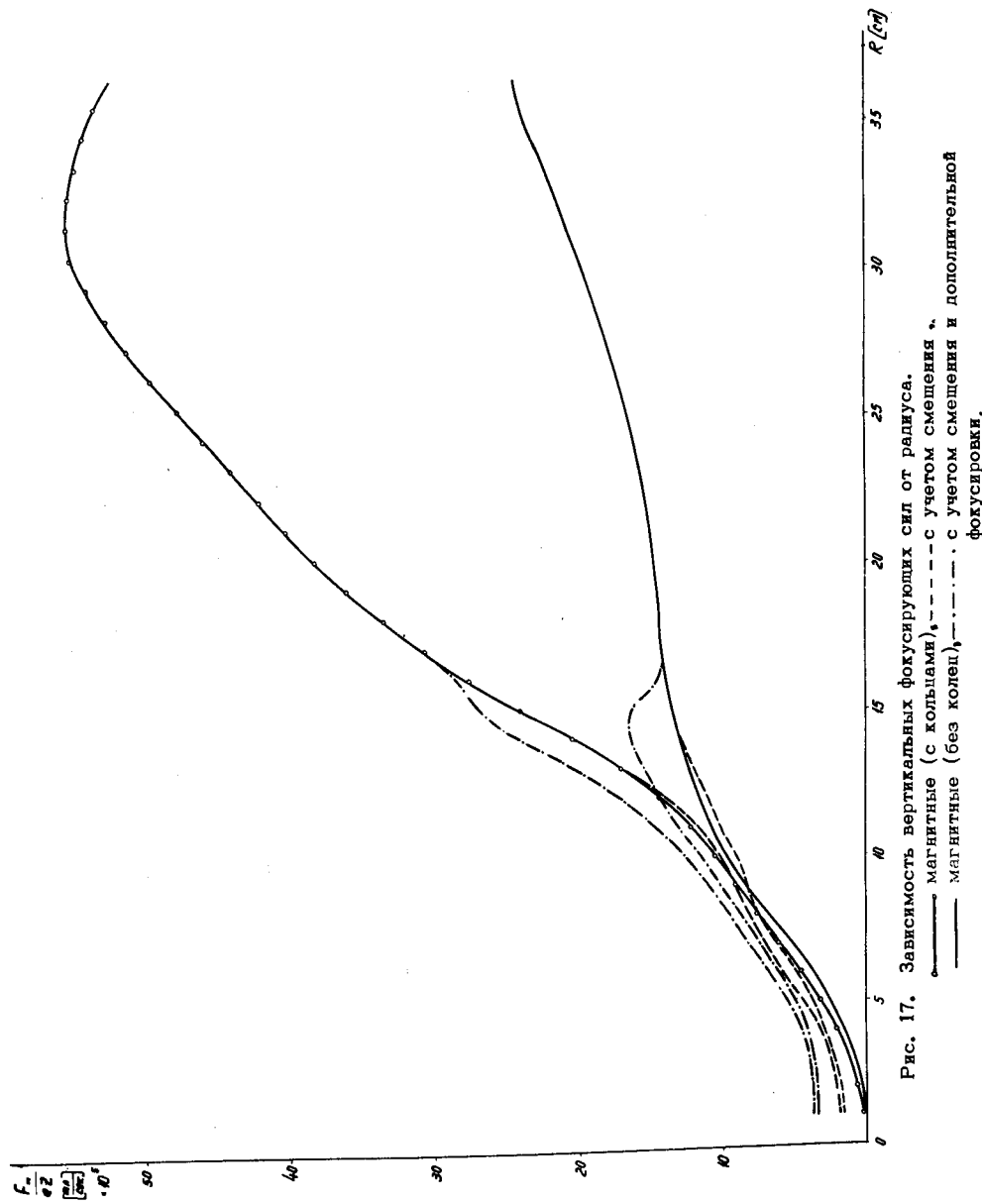


Рис. 17. Зависимость вертикальных фокусирующих сил от радиуса.  
 — магнитные (с кольцами), --- с учетом смещения,  
 — магнитные (без колец), - · - · с учетом смещения и дополнительной фокусировки.

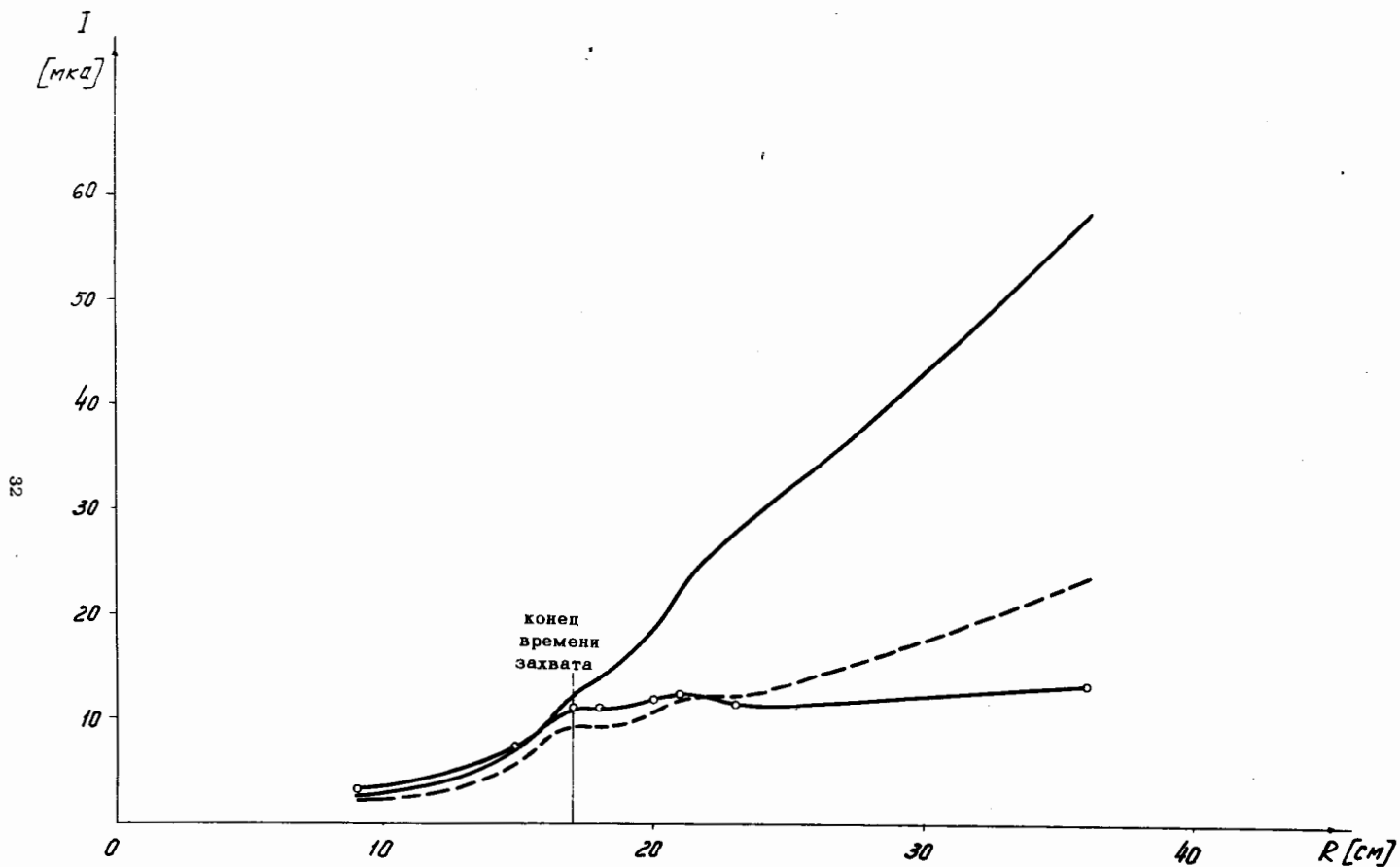


Рис. 18. Зависимость максимального удерживаемого тока от радиуса:  
 — вертикальное ограничение с кольцами,  
 - - - вертикальное ограничение без колец,  
 — продольное ограничение.

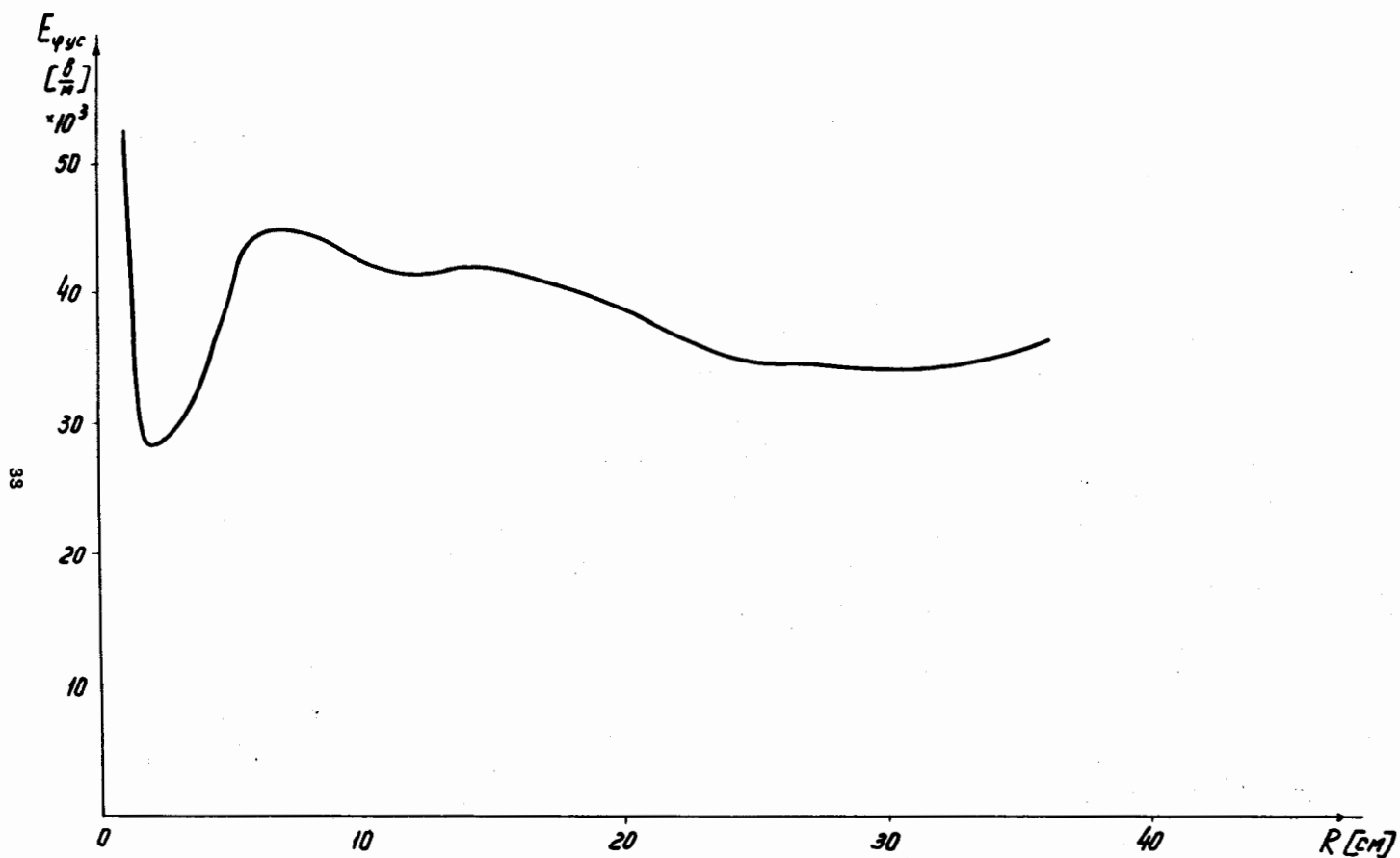


Рис. 19. Продольная составляющая ускоряющего поля, усредненная по азимутам, где  $E_{\phi \text{ ус}} > 0,1 E_{\phi \text{ ус. макс.}}$