

С 345.И

Г-524

22/xii-6

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-3017-1



А.А. Глазов, Т.П. Кочкина, Д.Л. Новиков,  
Л.М. Онищенко

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ  
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО  
ЦИКЛОТРОНА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

1966

P9-3017-1

А.А. Глазов, Т.П. Кочкина, Д.Л. Новиков,  
Л.М. Онищенко

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ  
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО  
ЦИКЛОТРОНА

дм 1/059н  
4650

В работе /1/ был проведен детальный теоретический анализ движения ионов в медианной плоскости релятивистского циклотрона (РЦ) на первых десяти оборотах. Экспериментальная проверка выбранной системы отбора ионов, осуществленная на 120 см модели РЦ /2/, показала соответствие экспериментальных и теоретических результатов. Однако полученная картина движения ионов является неполной ввиду отсутствия расчета вертикального движения ионов в выбранной системе отбора.

Приведенные в работах /3,4,5/ методы расчета вертикального движения ионов, основанные на ряде упрощений, не могут быть использованы для анализа оптимальной конфигурации области отбора: "ионный источник - пуллер", которая является в значительной мере определяющей для дальнейшего движения ионов. В настоящей работе вертикальное движение иона на первых пяти оборотах рассчитывалось на электронной счетной машине М-20 путем решения следующих уравнений движения:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= a [1 - b(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)]^{1/2} [E_x(1 - b\dot{x}^2) |\cos(r+a)| - E_z b \dot{x} \dot{z} \cos(r+a)] \\ \ddot{z} &= a [1 - b(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)]^{1/2} [E_z(1 - b\dot{z}^2) \cos(r+a) - E_x b \dot{x} \dot{z} |\cos(r+a)|], \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$a = \frac{e E_0}{m_0 \omega_0^2} = 16,781674 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$\frac{e}{m_0}$  - отношение заряда к массе покоя протона,

$\omega_0$  - частота ускоряющего поля,

$E_0$  - энергия покоя протона,

$b = \frac{\omega_0^2}{c^2} = 6,351322 \cdot 10^2 \text{ м}^{-2}$ , точкой обозначено дифференцирование по  $t = \omega_0 t$ .

$a$  - начальная фаза иона.

В уравнениях движения (1) учтено только действие электрического поля ускоряющей системы дуантов. Действием спадающего магнитного поля, формируемого в центре ускорителя, и вариацией магнитного поля при расчете вертикального движения на первых пяти оборотах можно пренебречь, так как связанные с ними силы много меньше эффективных сил электрического поля. Методика решения уравнений (1) аналогична методике решения уравнений движения в медианной плоскости работы<sup>/1/</sup>. Уравнения (1) решались совместно с уравнениями движения в медианной плоскости, откуда фазовое движение переносилось в (1) при каждом последующем шаге интегрирования. При определении фазового движения учитывалось действие спадающего магнитного поля, сформированного для компенсации введенного сдвига фазы в пуллере. В таблице 1 приводятся значения фазы на каждой последующей ускоряющей шели для всех исследуемых ионов с начальными фазами от  $+10^{\circ}$  до  $-90^{\circ}$ .

Т а б л и ц а 1

$\begin{matrix} N \\ a \end{matrix}$ / $\begin{matrix} \text{уск.} \\ \text{ш.} \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7
$+10^{\circ}$	$46^{\circ}$	$32^{\circ}$	$23^{\circ}$	$25^{\circ}$	$18^{\circ}$	$20^{\circ}$	$15^{\circ}$
$0^{\circ}$	$36^{\circ}$	$26^{\circ}$	$22^{\circ}$	$21^{\circ}$	$17^{\circ}$	$16^{\circ}$	$14^{\circ}$
$-20^{\circ}$	$21^{\circ}$	$12^{\circ}$	$8^{\circ}$	$7^{\circ}$	$7^{\circ}$	$2^{\circ}$	$3^{\circ}$
$-45^{\circ}$	$1,5^{\circ}$	$-8^{\circ}$	$-5^{\circ}$	$-10^{\circ}$	$-9^{\circ}$	$-13^{\circ}$	$-12^{\circ}$
$-60^{\circ}$	$-9^{\circ}$	$-16^{\circ}$	$-14^{\circ}$	$-18^{\circ}$	$-17^{\circ}$	$-21^{\circ}$	$-20^{\circ}$
$-90^{\circ}$	$-21^{\circ}$	$-24^{\circ}$	$-22^{\circ}$				

Значения компонент электрического поля  $E_x$  и  $E_z$  при решении уравнений (1) находились в таблице, составленной по картине распределения поля, полученной на электролитической ванне. Макет дуантной системы для электролитической ванны выполнялся в масштабе 1:1, макет ионного источника и пуллера в масштабе 2:1. На рис. 1 а) показано, как изменяется вертикальная компонента электрического поля дуанта  $E_z$  с расстоянием ( $x$ ) от осевой линии дуантов при различных расстояниях  $z$  от медианной плоскости. На рис. 1 б) построена зависимость  $E_z = f_1(z)$  для  $x = 3$  см, откуда видно, что линейность зависимости  $f_1(z)$  нарушается при  $z = 1,5$  см, полная апертура дуанта в этом случае равна 5 см. Прямая линия на рис. 1 б) проведена по формулам работы<sup>/6/</sup>.

Вертикальное движение было рассчитано для двух конфигураций системы отбора ионов. На рис. 2 показана первая конфигурация начальной области ускорения (ионный источник-пуллер) и распределение в ней электрического поля, снятое на ванне. На рис.3 приведена зависимость вертикальной компоненты электрического поля  $E_z = f_2(x)$  в этой системе для крайней стартовой координаты  $z = 0,5$ , при которой частица беспрепятственно проходит через пуллер. Движение рассчитывалось для всей области начальных фаз  $-60^\circ < \alpha < 10^\circ$ , при которой ионы проходят через систему отбора в медианной плоскости. Стартовые координаты  $z_0$  задавались с интервалом 0,1 см от 0,1 см до 0,5 см. С тем чтобы выяснить жесткость исследуемой системы при вертикальном движении ионов, в начальных условиях можно было задавать произвольные углы влета иона, которые могут возникнуть в результате рассеяния ионов на молекулах газа, либо в результате действия собственного пространственного заряда пучка. Траектории ионов с начальными условиями  $\dot{z}_0 = 0$  и  $z_0 = 0,1; 0,2; 0,5$  см показаны на рис. 4, 5 и 6. Как видно из рис. 4, частицы, вышедшие из ионного источника в стартовой координате  $z_0 = 0,1$ , проходят без потерь все пять оборотов (1 оборот соответствует № = 12) по всему диапазону начальных фаз  $-45^\circ - +10^\circ$ . С увеличением стартовой координаты  $z_0$  до 0,2 см на дуанте теряется частица с начальной фазой  $\alpha = -20^\circ$  (рис. 5), при дальнейшем увеличении эта участь постигает частицы с начальными фазами  $+10^\circ$  и  $0^\circ$ , в то же время беспрепятственно проходят до конца пятого оборота частицы с фазами  $\alpha = -20^\circ$  и  $-45^\circ$  (рис. 6). Задавая в начальных условиях положительный угол влета (наиболее вероятный угол отклонения при учете действия пространственного заряда), получим, что для тех же начальных стартовых координат ионы теряются на дуантах за меньшее число оборотов. И, наоборот, при задании отрицательного угла влета, большинство ионов проходит до конца пятого оборота без потерь. Это наводит на мысль, что в области, прилегающей к пуллеру, частицы недостаточно фокусируются, что приводит к значительному отклонению частиц от медианной плоскости и в дальнейшем к их потере на элементах ускоряющей системы. Анализ распределения вертикальной компоненты поля в области пуллер-ионный источник подтвердил это предположение.

После этого по известной методике<sup>17/</sup> была рассчитана конфигурация насадки ионного источника и пуллера, которая должна обеспечивать минимальную расходимость частиц при их выходе из пуллера. На рис.7 приводится эта система отбора ионов, здесь же показано распределение поля, полученное на электролитической ванне. Для сравнения с первым вариантом пуллера на рис.3 изображена зависимость  $E_z = f_2(x)$  для стартовой координаты  $z_0 = 0,5$  (кривая II рис. 3).

Траектории ионов в плоскости  $xz$  при использовании второй системы отбора приведены на рисунках 8-13. На каждом из этих рисунков показано движение иона с фиксированной начальной фазой  $\alpha$  и набором стартовых координат  $z_0$  от 0,1 до 0,5 см. Если сравнить траектории частиц, показанные на рис. 8-13, с тем, что имело

место при использовании первого варианта центральной оптики, то вполне очевидны преимущества второй системы. Для выбранного диапазона начальных фаз  $-45 \pm 10^\circ$  практически все частицы со стартовыми координатами  $0 < z_0 \leq 0,5$  см совершают полных пять оборотов и вступают в ту область ускорения, где начинают действовать фокусирующие силы магнитного поля. Задание начальных углов влета  $\alpha_0 = \pm 0,1$  не приводит к потере частиц. Все ионы, вступающие в ускорение с  $\alpha$  в границах  $+10^\circ \div -45^\circ$  и начальными углами влета разного знака, фокусируются и беспрепятственно совершают пять оборотов. Для примера на рис. 14 показаны траектории ионов с различными начальными углами влета  $\alpha = 0^\circ$  и  $z_0 = 0,4$  см.

Использование в релятивистском циклотроне центральной системы отбора ионов подобной конфигурации, по-видимому, улучшит фокусировку и формирование пучка на начальном участке ускорения.

#### Л и т е р а т у р а

1. А.А. Глазов, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко, Т.П. Кочкяна. Препринт ОИЯИ, 1841, Дубна 1964.
2. А.А. Глазов, А.А. Кропин, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко. Препринт ОИЯИ Р-2199, Дубна 1965.
3. W.I.V. Smith, Nucl. Instr., 9, 49 (1960).
4. Н.И. Веников. Диссертация (1964).
5. H. G. Blosser, M. M. Gordon, M. Reiser, CERN - 63-19, 193 (1963).
6. R. L. Murray, L. T. Rathner, Journ. of Appl. Phys., 24, 67 (1953).
7. J. R. Pierce, Theory and design of electron Beams (1954).

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 ноября 1966 г.

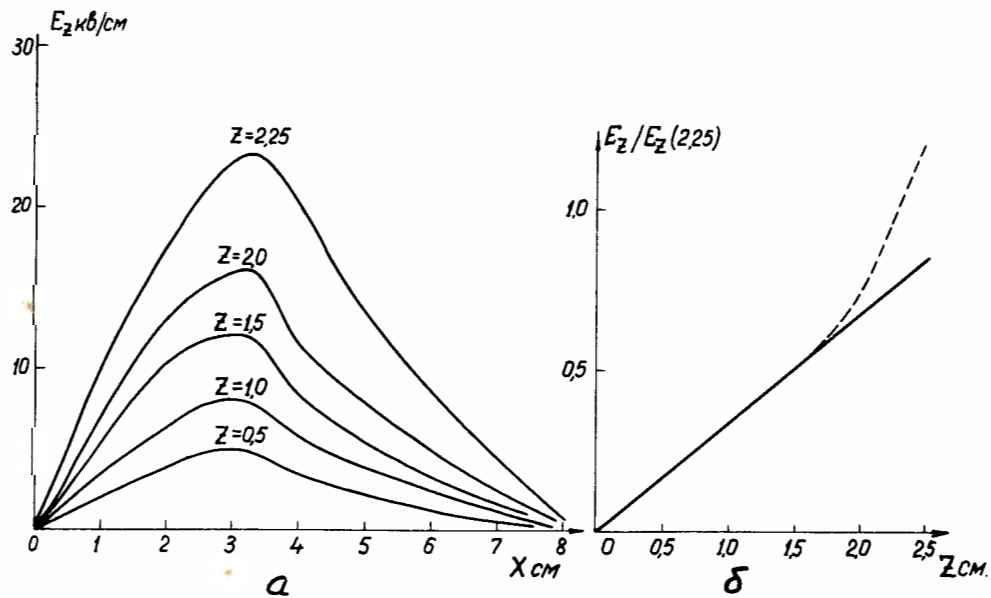


Рис. 1. Распределение вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$  в дуантной системе.

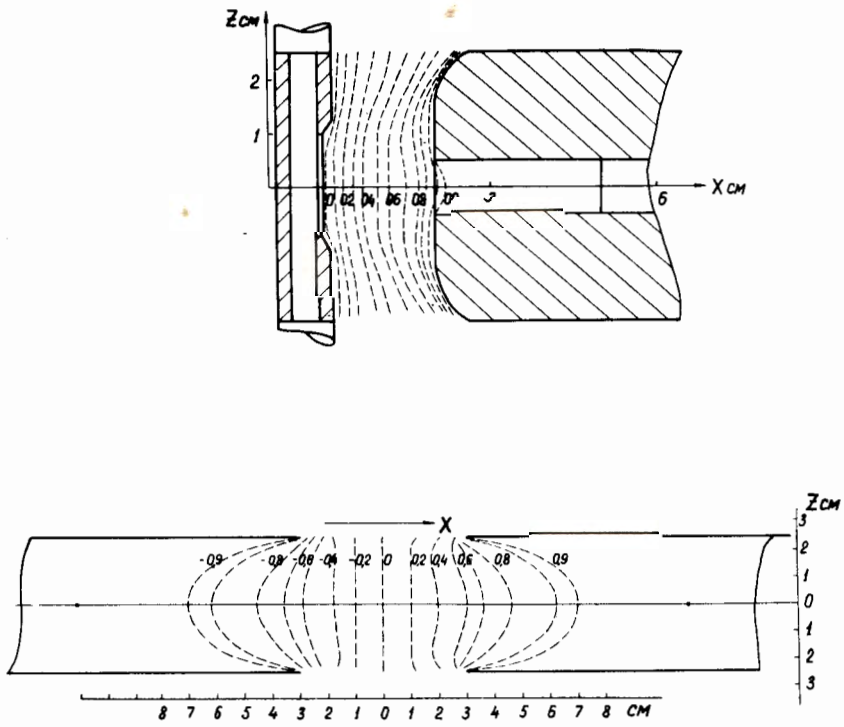


Рис. 2. Распределение поля между конным источником и пуллером.



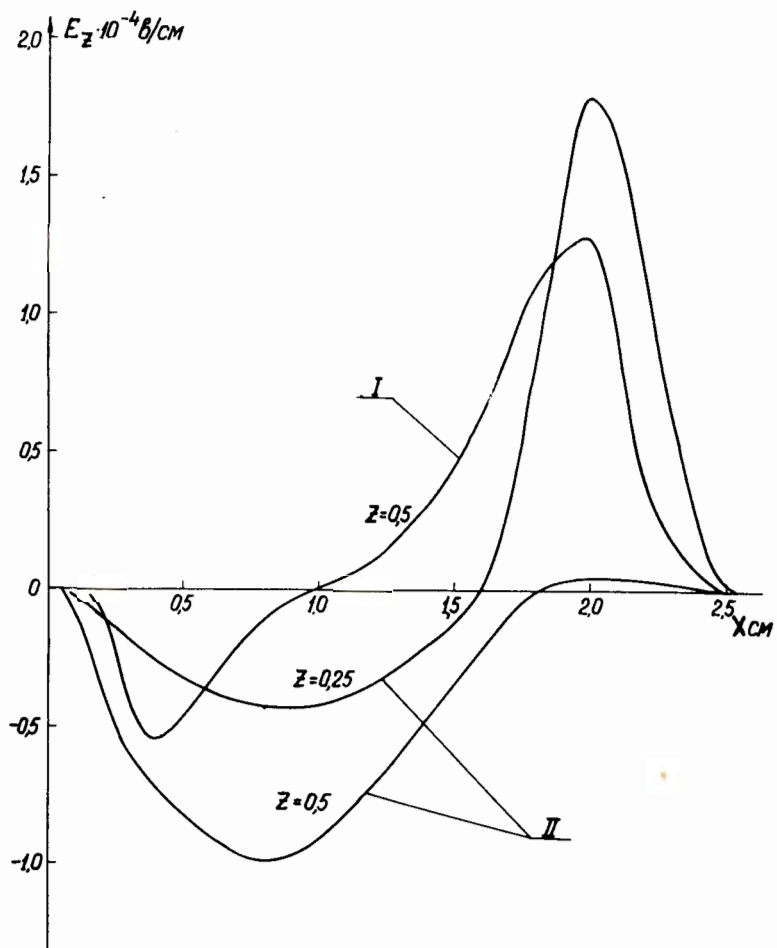


Рис. 3. Распределение вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$  между зонным источником и пуллером I – первый вариант; II – второй вариант.

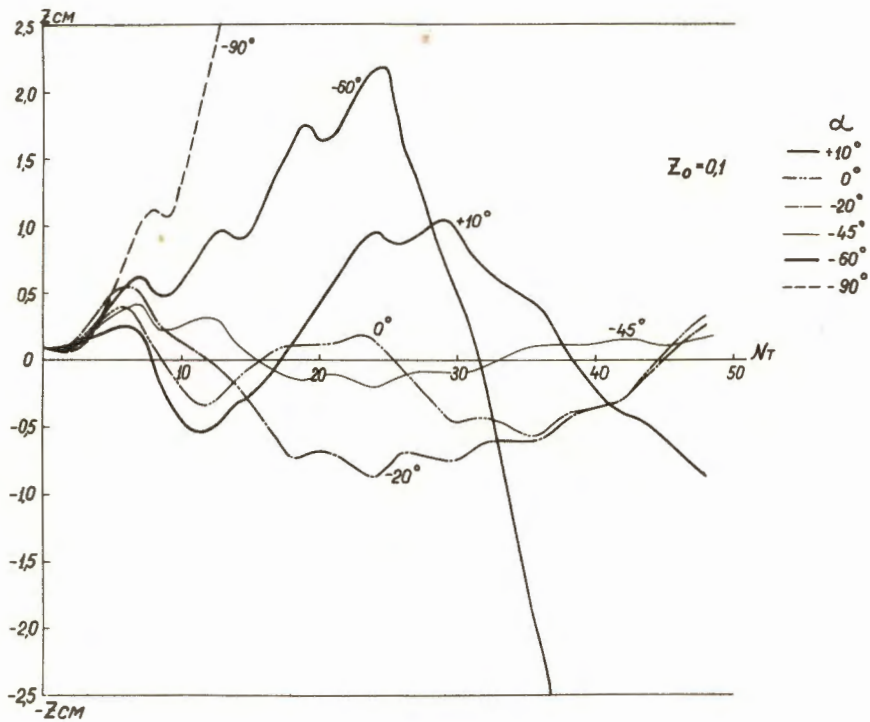


Рис. 4. Траектории ионов  $\dot{z}_0 = 0$   $z_0 = 0,1$ .

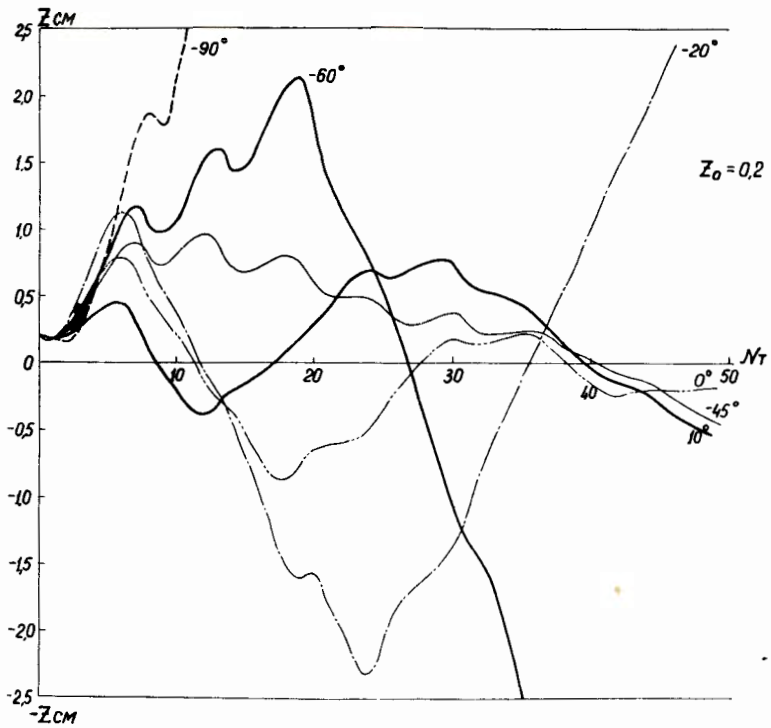


Рис. 5. Траектории ионов  $z_0 = 0,2$ .

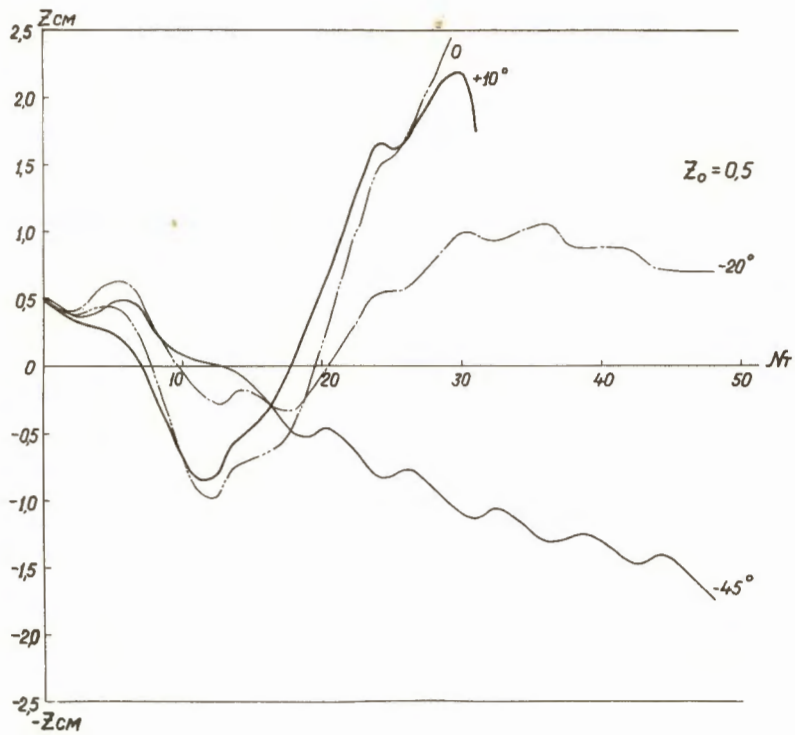


Рис. 6. Траектории ионов  $z_0 = 0,5$ .

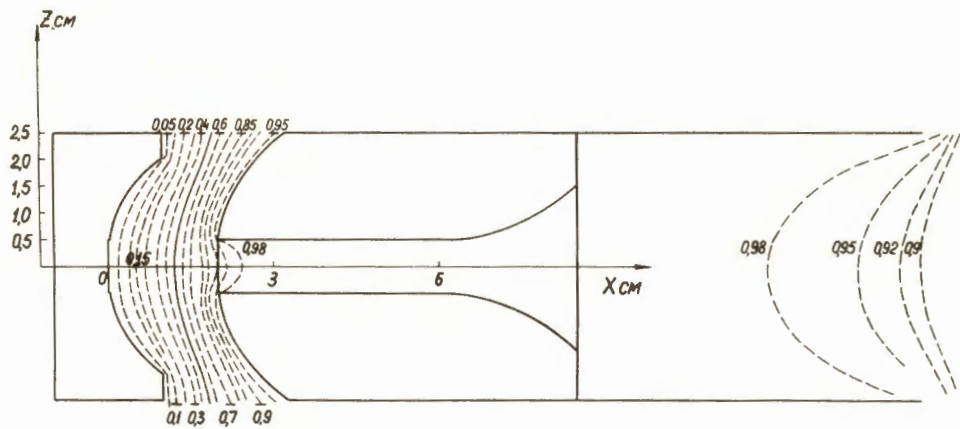


Рис. 7. Распределение поля во втором варианте системы отбора ионов.

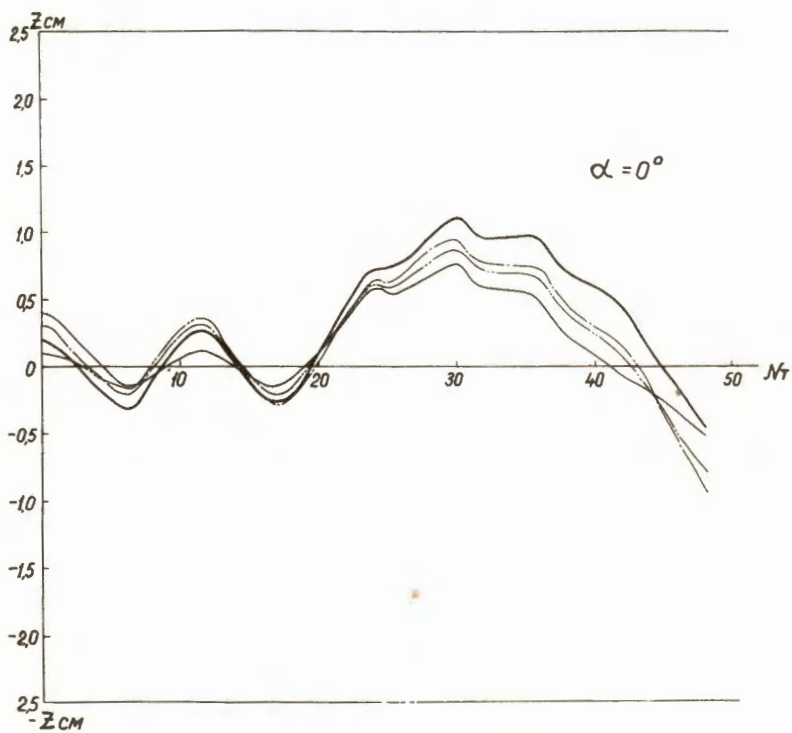


Рис. 8. Траектории ионов  $\alpha = 0$ .

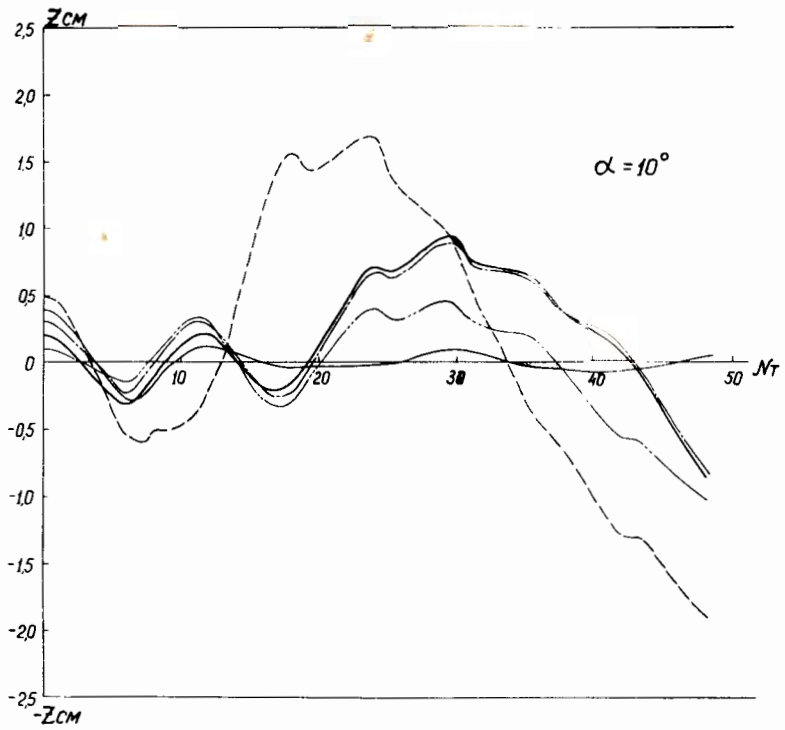


Рис. 9. Траектории ионов  $\alpha = +10^\circ$ .

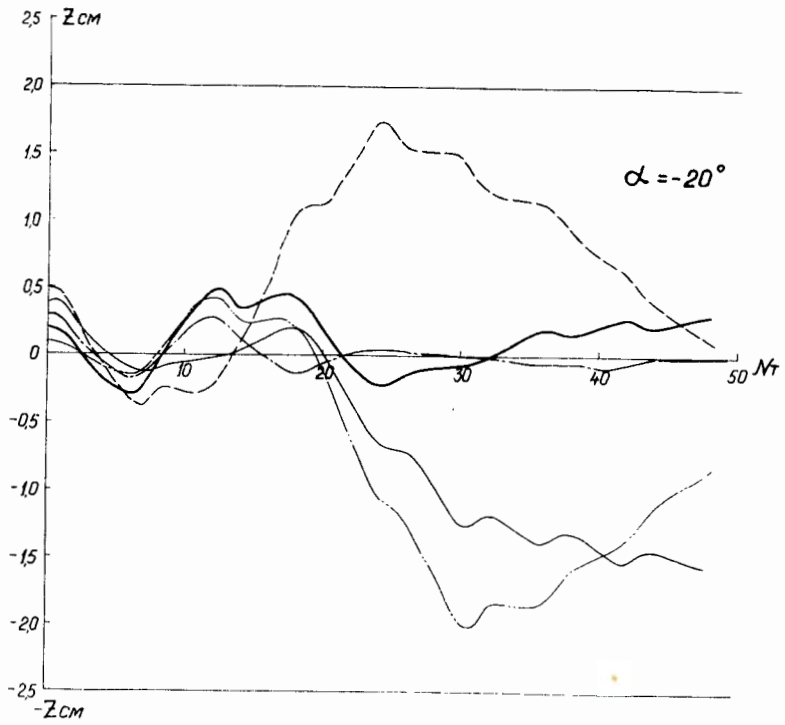


Рис. 10. Траектории ионов  $\alpha = -20^\circ$ .

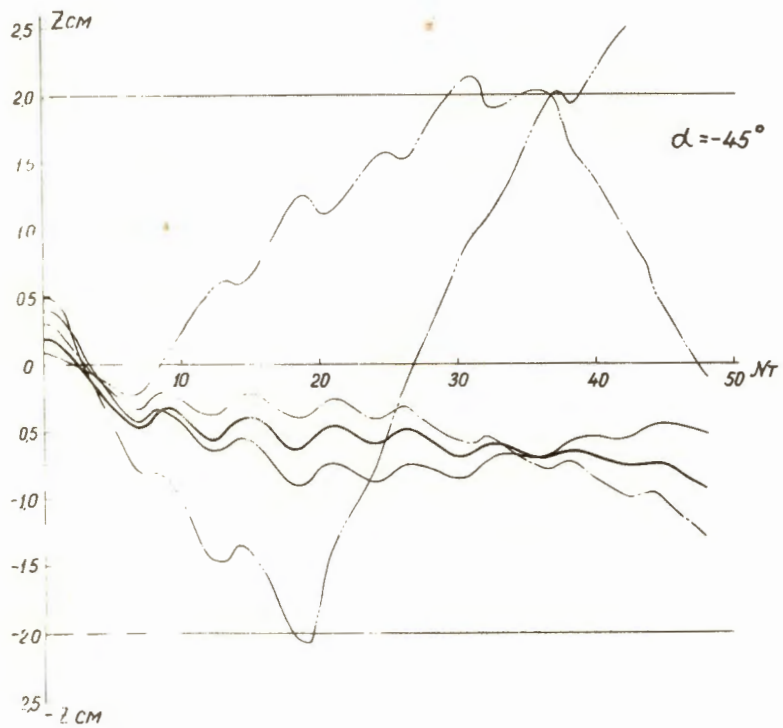


Рис. 11. Траектории ионов  $\alpha = -45^\circ$ .



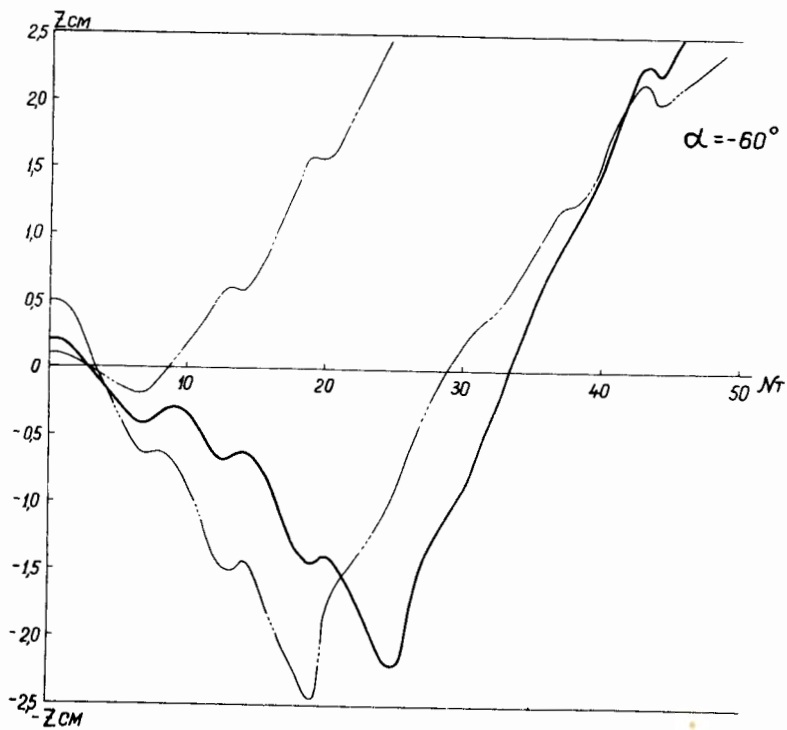


Рис. 12. Траектории ионов  $\alpha = -60^\circ$ .

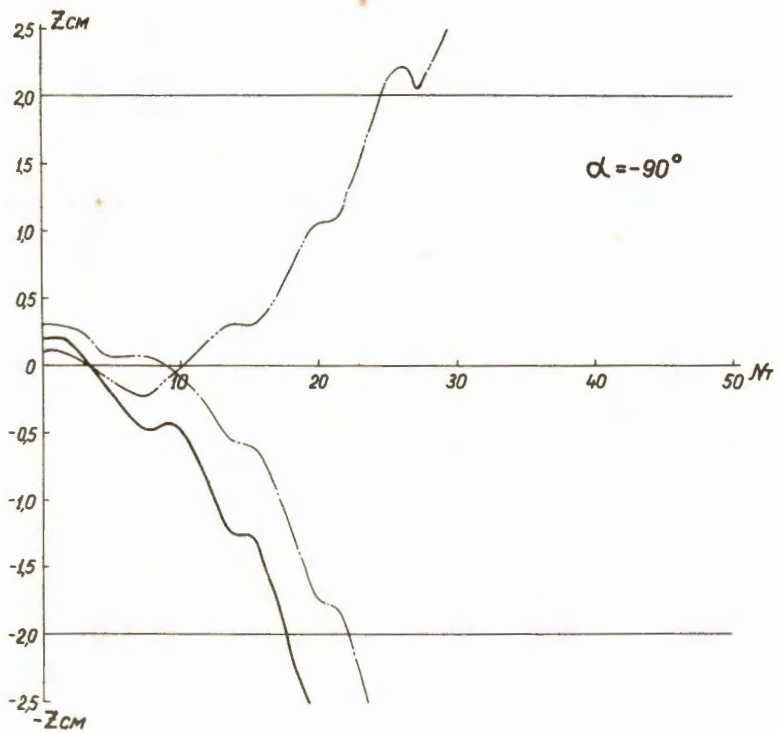


Рис. 13. Траектории ионов  $\alpha = -90^\circ$ .

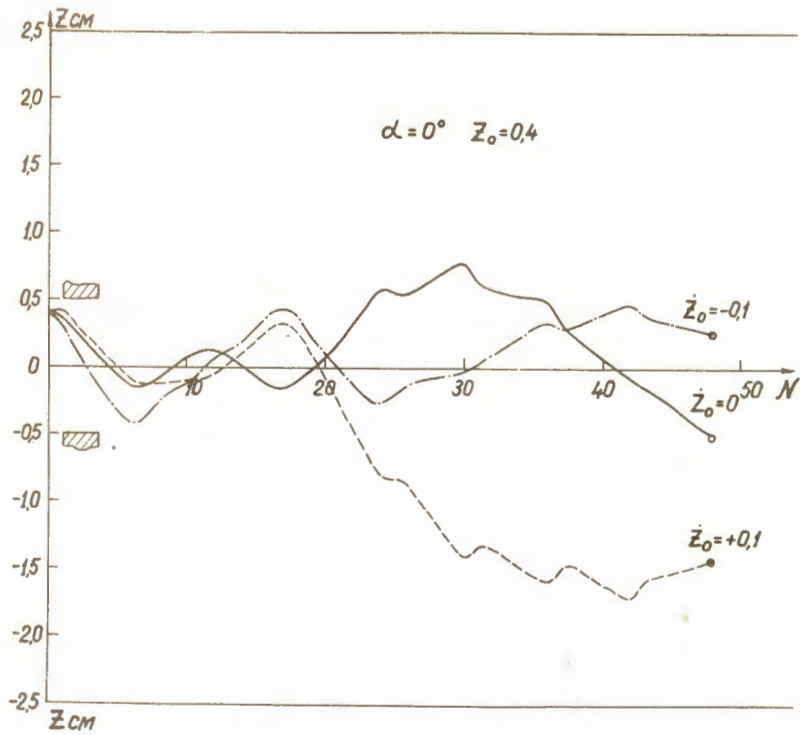


Рис. 14. Траектории ионов  $\alpha = 0, \dot{z}_0 = 0, 0.1; -0.1, z_0 = 0.4$ .