

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

5261 / 2-80

3/41-80

P9-80-549

Г.Г.Гульбемян, А.М.Мордуев, Ю.Сура

ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ  
В ЦЕНТРЕ ЧЕТЫРЕХМЕТРОВОГО  
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА ОИЯИ  
Часть 1

1980

Получение в циклотронах высокоинтенсивных ионных пучков хорошего качества затруднено процессами, происходящими в центральной области, так как именно в центре циклотрона ионы приобретают сохраняющиеся в дальнейшем амплитуды радиальных и вертикальных колебаний /1/. При этом к описанию распределения электрического потенциала в центральной области подходят разными путями /2-4/:

- полагают однородным распределение электрического поля в пределах ускоряющего промежутка /5/,
- используют решение уравнения Пуассона для заданной геометрии ускоряющей структуры,
- находят реальное распределение на модели центральной области в электролитической или магнитной ванне /6-9/,
- используют аналитическое приближение реального распределения электрического поля /10/.

Первый из указанных путей представляет собой слишком грубое допущение. Второй дает достаточно точное распределение потенциала, однако требует значительного объема счетного времени на ЭВМ. Третий путь дает искомую картину электрического поля, но связан с созданием стенда измерений и проведением большого объема измерительных работ с последующей обработкой громадного количества данных. Как и в предыдущем случае, существенные временные затраты не позволяют проводить быстрое сравнение различных вариантов геометрии центральной области циклотрона.

При расчете движения ионов в центре изохронного циклотрона У-400 для описания горизонтальной компоненты электрического поля в ускоряющем зазоре мы использовали гауссовское распределение потенциала, принятое в работе /10/.

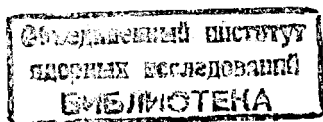
Для ускоряющей структуры /рис.1а/ выражение компоненты электрического поля имеет вид:

$$E_x = \frac{V_D}{2(2\pi)^{1/2}} \frac{1}{\Delta y} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\Delta y}\right)^2\right] \cos[n\omega(t-t_0)],$$

где  $\Delta y = 0,2HDD + 0,4GD$ , а для структуры, представленной на рис.1б,

$$E_y = \frac{V_D}{(\pi/2)^{1/2}} \frac{1}{\Delta y} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\Delta y}\right)^2\right] \cos[n\omega(t-t_0)],$$

где  $\Delta y = 0,2HD + 0,8G$ .



Численное интегрирование уравнений движения проводилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка на ЭВМ CDC-6500 по программе, написанной на Фортране.

При этом были сделаны два упрощающих предположения: 1/ магнитное поле однородно, т.к. в области первых оборотов еще слабо сказывается действие секторов, и оно равно полю в центре циклотрона  $H_0$ , 2/ действие пространственного заряда не учитывается. В расчетах использовались следующие исходные данные:

амплитуда напряжения на дуанте $V_D$ , кВ	- 80
тепловая энергия ионов $V_0$ , В	- 15
значение магнитного поля в центре циклотрона $H_0$ , кЭ	- 21,39
Угловая протяженность дуантов $\alpha_D$ , град., угловое положение источника /задано конструктивными особенностями горизонтального варианта источника/,	- 45
$\alpha_{ист.}$ , град.	- 71
зазор источник-пуллер G, мм	- 5
горизонтальный размер щели пуллера HD, мм	- 6
величина ускоряющего промежутка GD, мм	- 40
величина просвета дуантов HDD, мм	- 60
ускоряемая частица A/Z	- 10
номер гармоники ускоряющего напряжения, n	- 2

Как следует из результатов работы <sup>11/</sup> величина радиуса установки источника должна составлять приблизительно 0,5 от радиуса первого оборота. Для У-400  $R_{ист.} = 50$  мм.

На первых оборотах при наборе частицей энергии существенное влияние оказывает величина ускоряющего зазора GD. Влияние величины просвета дуантов вчетверо меньше /рис.2/.

В качестве одной из определяющих характеристик при выборе геометрии ускоряющей системы рассматривалось движение частицы в вертикальной плоскости. Геометрия, обеспечивающая максимальный набор энергии, не создает достаточной электрической фокусировки на первых оборотах /рис.3/ /на кривых вертикального движения отмечены только характерные точки перегиба траектории/. Уменьшение величины просвета дуантов позволило улучшить вертикальное движение для ускоряемого диапазона фаз /рис.4/ при незначительном проигрыше в энергии /рис.2/. На рис.5 представлены кривые вертикального движения в окончательном варианте геометрии ускоряющей структуры для центральной и крайних стартовых фаз частиц, имеющих начальную координату движения  $Z = 3$  мм и начальный угол вылета  $20^\circ$  для ускоряющего зазора источник-пуллер  $G = 5$  мм и  $G = 10$  мм. Изменение G в 2 раза не приводит к заметному изменению огибающей пучка в вертикальной плоскости.

Уменьшение ускоряющего зазора привело к увеличению угловой протяженности дуантов до  $54^\circ$  /рис.6/. После 6 оборотов, когда частица приобретает достаточную энергию и пролетное время не играет уже столь существенной роли, осуществляется плавный переход к  $45^\circ$  дуанту с увеличением ускоряющего зазора и просвета дуантов до проектных.

За время одного полного оборота частицы точка, изображающая мгновенный центр кривизны траектории, описывает параллелограмм. Расстояние от центра циклотрона до точки пересечения диагоналей параллелограмма /назовем ее центром ускорения/ принималось нами как характеристика качества центровки частицы на первых оборотах. Картина центровки пучка в зависимости от геометрии ускоряющей структуры показана на рис.7. Рис.8а характеризует изменение центровки при уменьшении и увеличении радиуса установки источника. При завышении или занижении ускоряющего напряжения наблюдается дрейф центра ускорения /рис.8б/.

На рис.9 представлено движение мгновенных центров кривизны траектории частицы и дрейф центров ускорения в пределах 12 оборотов для центральной и крайних стартовых фаз диапазона, захватываемого в ускорение.

Линии, соединяющие центры ускорения для вариантов с неизменным радиусом установки источника и изменяющимся радиусом установки пуллера /рис.10а/, а также для вариантов с изменяющимся радиусом установки источника при  $R_{ист.} = R_{пулл.}$  /рис.10б/ сохраняют свою форму, начиная со второго оборота, и асимптотически приближаются к центру циклотрона. Исходя из этого, мы ограничились рассмотрением трех оборотов частицы в циклотроне. Подбирая соответствующую величину радиуса установки источника и меняя угол поворота источника  $\alpha$  путем изменения  $R_{пулл.}$  относительно  $R_{ист.}$ , можно добиться почти идеальной центровки траектории уже после третьего оборота /рис.10в/. Чем лучше сцентрирован пучок, тем ближе фигура, описываемая точкой, изображающей мгновенный центр кривизны траектории пучка, приближается к ромбу /рис.11а/. Это свидетельствует об одинаковом наборе ионом энергии на каждом ускоряющем зазоре, т.е. о лучшем качестве ускорения. Чувствительность системы к углу поворота источника резко зависит от величины ускоряющего зазора источник-пуллер. При изменении радиуса установки источника для  $R_{ист.} = R_{пулл.}$  эта зависимость носит менее выраженный характер /рис.11а,б/. На рис.11в показан разброс центров ускорения для центральной и крайних стартовых фаз при  $G = 5$  мм и  $G = 10$  мм.

Диапазон фаз ионов, отличающихся по энергии не более чем на 10%, составляет величину  $\Delta\phi_{старт.} = 60^\circ$  /рис.2/.

Фаза иона как функция числа ускорений представлена на рис.12 для случаев зазора источник-пуллер 5 и 10 мм. Увеличение G в 2 раза приводит за счет увеличения времени пролета к некоторой фазовой группировке.

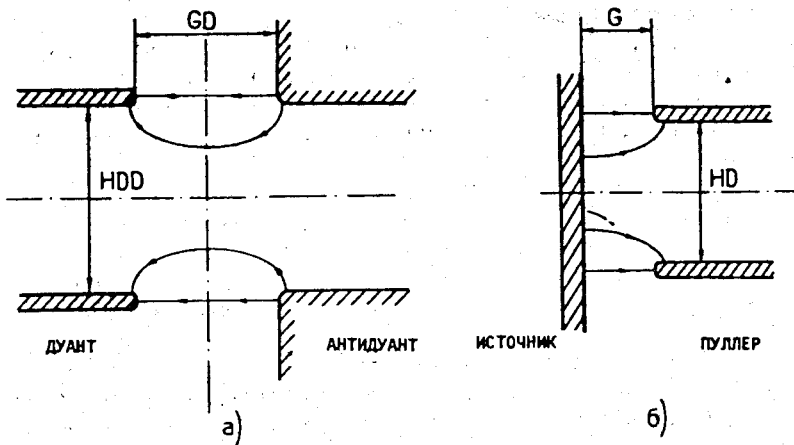


Рис. 1. Схема линий электрического поля: а/ дуант-антидуант, б/ источник-пуллер.

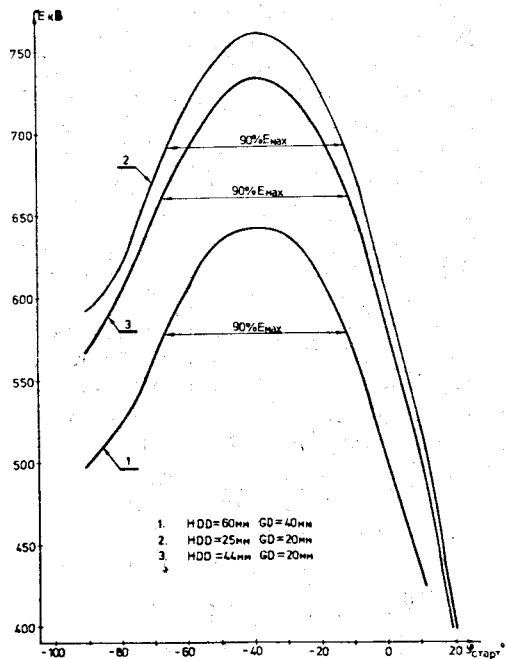


Рис. 2. Величина набора энергии в зависимости от стартовой фазы для трех вариантов геометрии ускоряющей структуры:  $N = 21,39$  кЭ;  $V_D = 80$  кВ;  $\alpha_{ист.} = 71$  град.

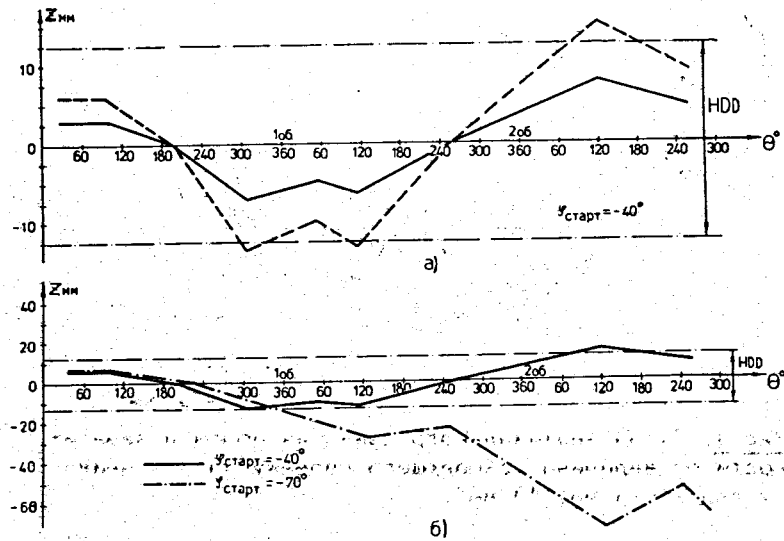


Рис. 3. Схема вертикального движения ионов для:  $HDD = 25$  мм;  $GD = 20$  мм;  $N_0 = 21,39$  кЭ;  $V_D = 80$  кВ;  $\alpha_{ист.} = 71$  град.

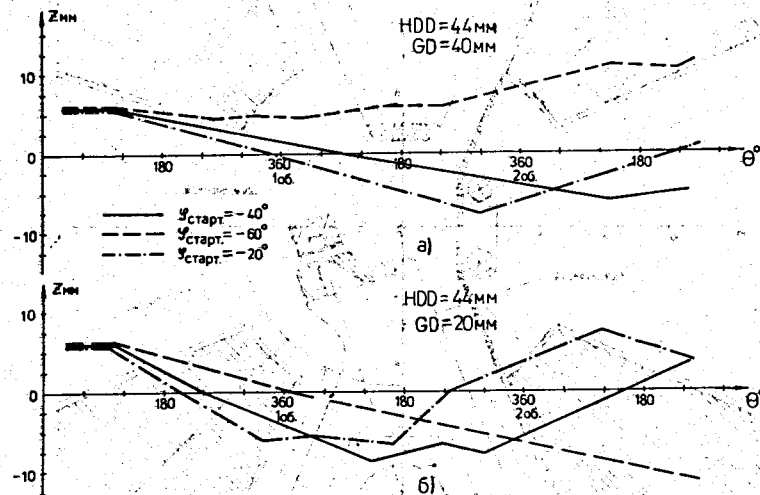


Рис. 4. Схема вертикального движения ионов для центральной и крайних стартовых фаз: а/  $HDD = 44$  мм;  $GD = 40$  мм, б/ окончательный вариант геометрии ускоряющей структуры -  $HDD = 44$  мм;  $GD = 20$  мм;  $N_0 = 21,39$  кЭ;  $\alpha_{ист.} = 71$  град;  $V_D = 80$  кВ.

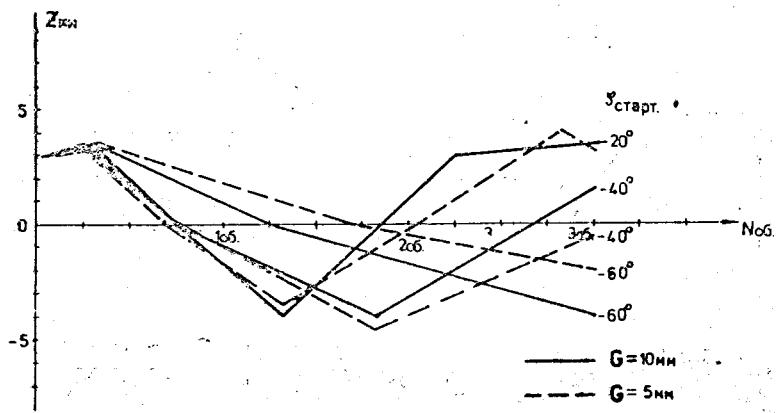


Рис. 5. Схема вертикального движения ионов в зависимости от величины ускоряющего промежутка источник-пуллер / $G = 5$  мм; 10 мм/.

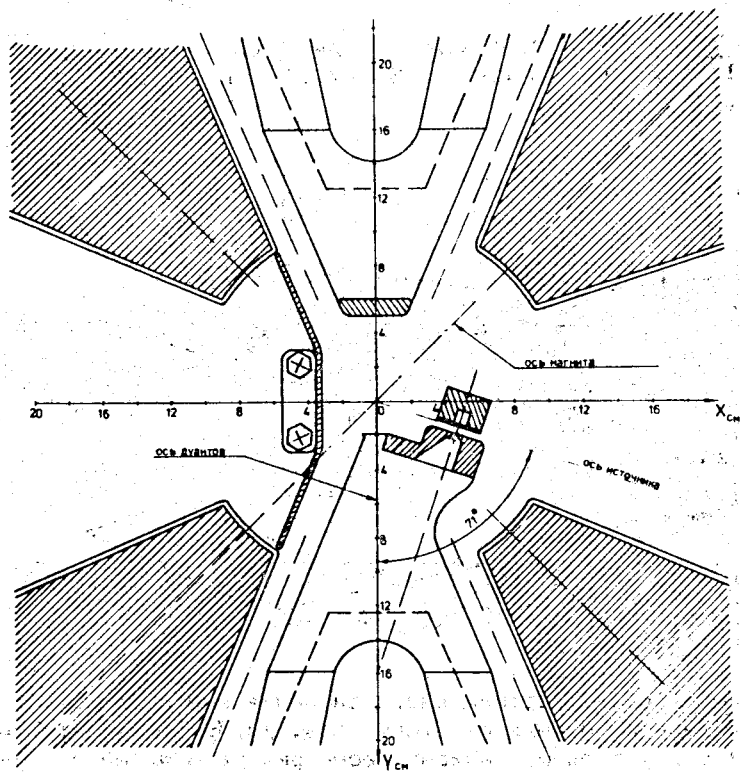


Рис. 6. План центральной области изохронного циклотрона У-400.

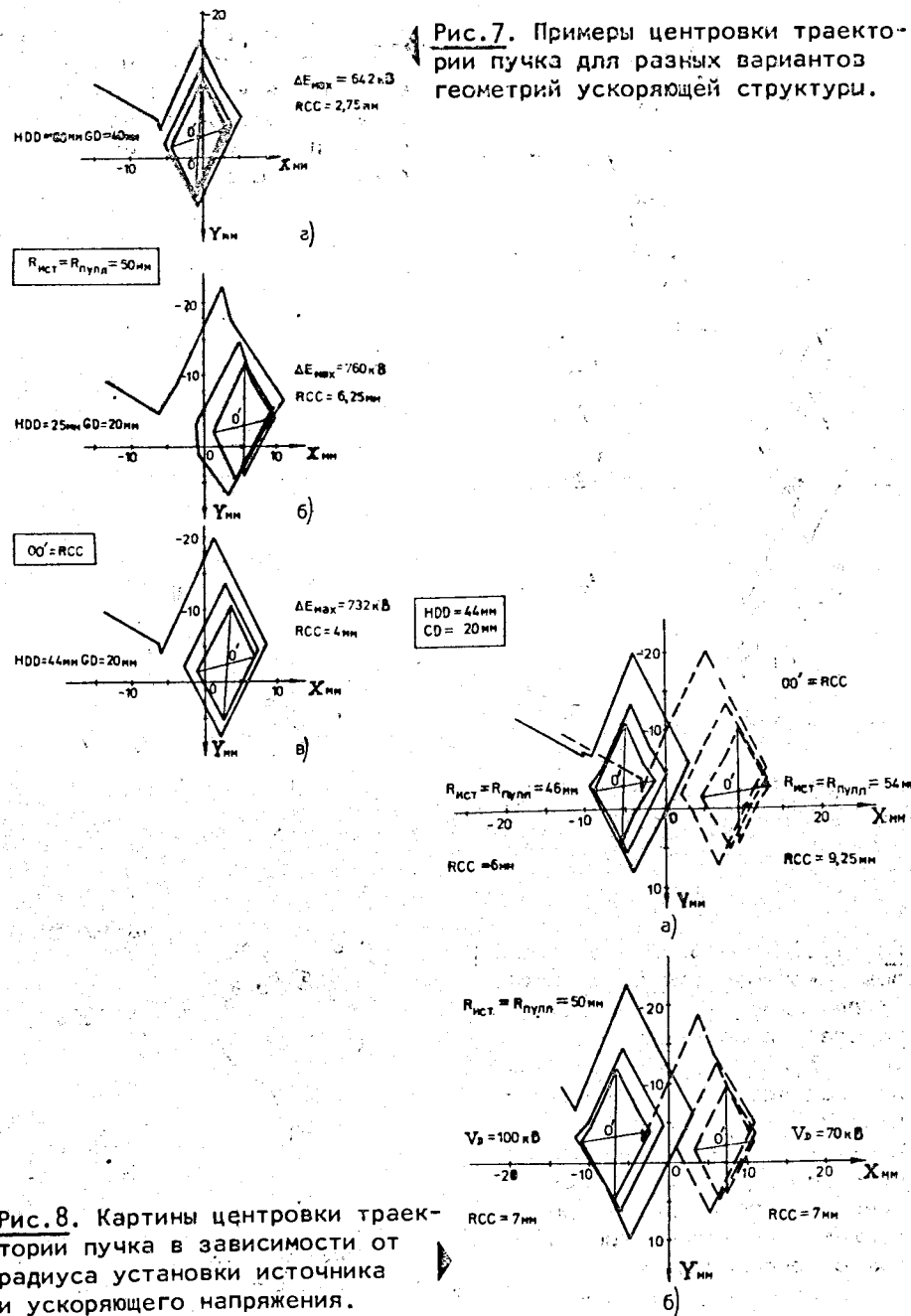


Рис. 7. Примеры центровки траектории пучка для разных вариантов геометрии ускоряющей структуры.

Рис. 8. Картины центровки траектории пучка в зависимости от радиуса установки источника и ускоряющего напряжения.

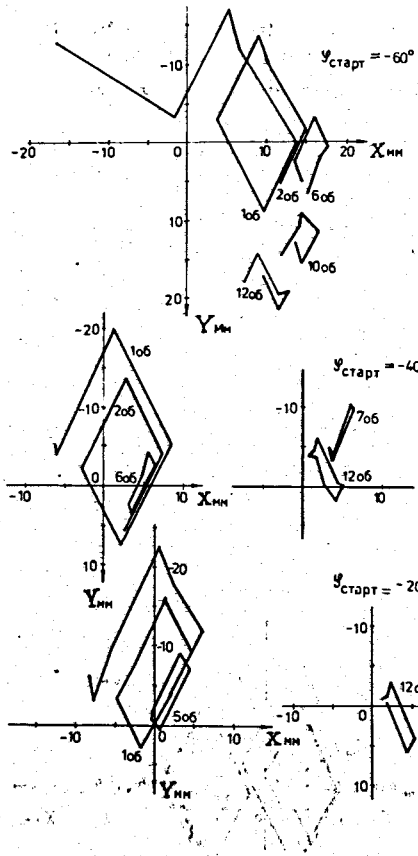


Рис.9. Схема движения мгновенных центров кривизны и дрейфа центров ускорения в пределах 12 оборотов для центральной и крайних стартовых фаз.

Рис.10. Схема положения центров ускорения для 5 оборотов: а/ при изменении угла поворота  $\gamma$  в случае постоянного  $R_{ист.}$ ; б/ при изменении радиуса установки источника ( $R_{ист.} = R_{пулл.}$ ) в случае постоянного угла поворота источника  $\gamma = 0$ ; в/ совмещенная картина, характеризующая качество центровки при одновременном изменении радиуса установки и угла поворота источника.

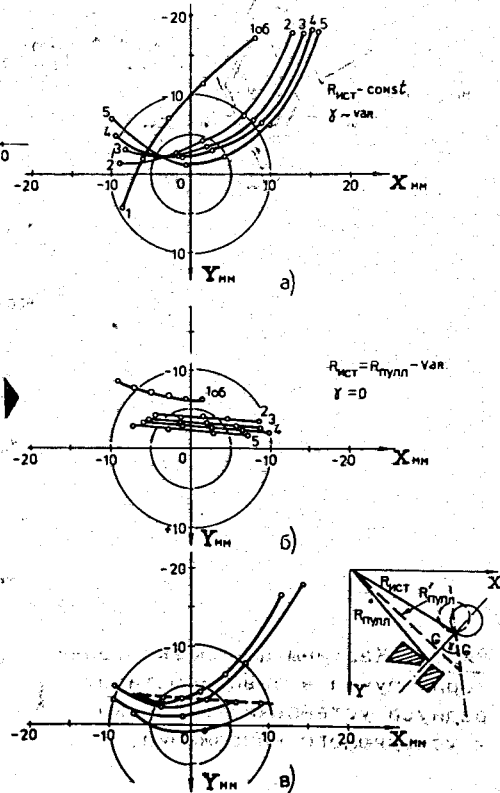


Рис.11. Схема изменения положения центров ускорения для двух значений величины ускоряющего промежутка источник-пуллер  $G = 5$  мм; 10 мм; а/  $R_{ист.} = const.$ , вариация  $\gamma$ . б/ вариация  $R_{ист.} = R_{пулл.}$ ,  $\gamma = 0$ . в/  $\phi_{старт} = 60$  град;  $-40$  град,  $-20$  град.

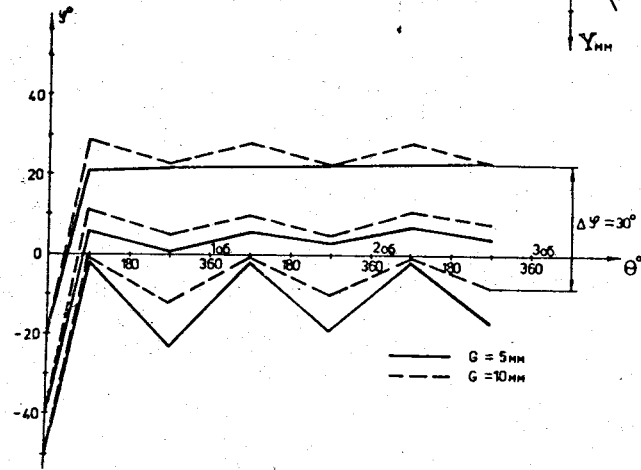
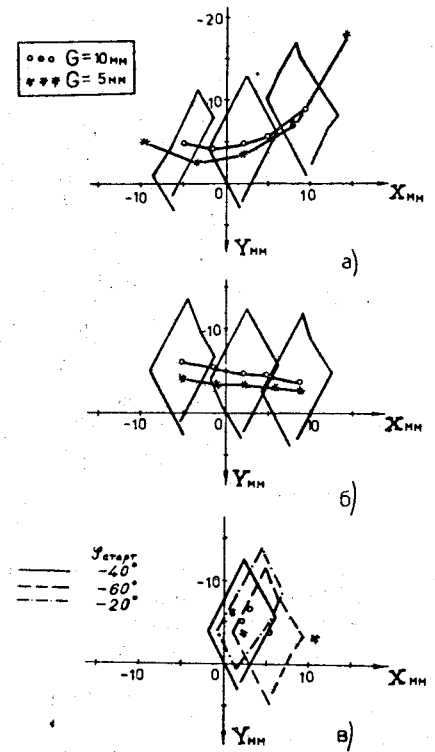


Рис.12. Фаза иона как функция числа ускорений в зависимости от величины ускоряющего промежутка источник-пуллер /  $G = 5$  мм; 10 мм/ / фаза иона определяется относительно середины первого дуанта/.

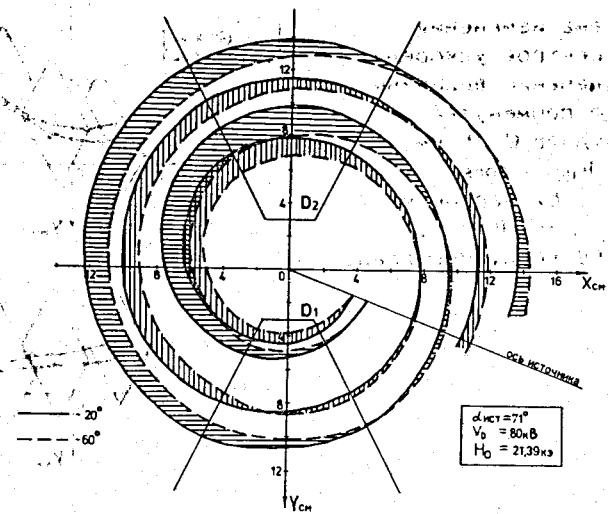


Рис. 13. Траектории движения ионов для крайних фаз ускоряемого диапазона /  $H_0 = 21,39$  кЭ;  $V_D = 80$  кВ;  $\alpha_{ист} = 71$  град/: - горизонтальная штриховка  $A/Z = 10$ ;  $R_{ист} = R_{пулл.} = 50$  мм. - вертикальная штриховка  $A/Z = 6,72$ ;  $R_{ист} = R_{пулл.} = 41$  мм.

На рис. 13 представлены траектории движения частиц с разными значениями  $A/Z$  для крайних фаз ускоряемого диапазона. Зная ширину пучка на известном азимуте, можно, установив ограничивающие щели на первых оборотах, избежать захвата в ускорение ионов с нежелательными начальными фазами, а значит, уменьшить величину амплитуды радикальных колебаний.

Таким образом, в результате выполненных расчетов были выбраны параметры геометрии ускоряющей структуры четырехметрового изохронного циклотрона, обеспечивающие хорошее качество пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Blosser H.G. IEEE Trans., 1966, NS-13, No.3, p.1.
2. Willax H.A., Garren A.A. Nucl. Instr. and Meth., 1962, 18, 19, p.347.
3. Blosser H.G., Gordon M.M., Reiser M. CERN, 63-19, 193, 1963.
4. Van Nieuwland J.M., Hazewindus N. IEEE Trans., 1969, NS-16, 3, p.454.
5. Козлов С.И. и др. ОИЯИ, Р-2854, Дубна, 1966.

6. Индреаш Г., Шелаев И.А. ОИЯИ, 2164, Дубна, 1965.
7. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-5032, Дубна, 1970.
8. Van Nieuwland J.M. et al. Rev.Sci.Instr., 1968, 39, p.1054.
9. Hazewindus N. et al. Nucl.Instr. Meth., 1974, 118, p.125.
10. Nieuwland J.M., Hazewindus N. Philips, Res., Repts., 1974, 29, p.528-559.
11. Reiser M. Nucl.Instr.Meth., 1962, 18, 19, p.370.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 августа 1980 года.