

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ45

С-217

P9 - 11722

А.Н.Сафонов

4725/2-78

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЩЕЛИ
ЗАКРЫТОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА
В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ

1978

P9 - 11722

А.Н.Сафонов

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЩЕЛИ
ЗАКРЫТОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА
В СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ

Областной институт
ядерной физики
Библиотека

Сафонов А.Н.

Р9 - 11722

Расчет оптимального положения щели закрытого ионного источника в синхроциклотроне

Путем решения уравнений движения на ЭВМ проведен расчет траекторий протонов около цилиндрических источников диаметром 5 и 6 мм с дуантом без пуллера и антидуантом апертурой 5 см при ускоряющем напряжении от 12 до 24 кВ. Минимальное ускоряющее напряжение, при котором еще возможен обход источника диаметром 6 мм, равно $V_{ус} = 14$ кВ, а при диаметре 5 мм частицы обходят источник и при $V_{ус} = 12$ кВ. Из условия наибольшего диапазона начальных фаз протонов, обходящих источник на первом обороте, найдена зависимость оптимального азимутального положения щели источника от амплитуды ускоряющего напряжения. С увеличением ускоряющего напряжения оптимальное азимутальное положение щели смещается примерно от середины ускоряющего промежутка до 45° в сторону дуанта. Диапазон начальных фаз растет при этом от 40° до 120° .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

© 1978 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с предполагающимся испытанием закрытого ионного источника на синхроциклотроне ОИЯИ было необходимо выяснить, как меняется $\Delta\phi_{усн}$ - диапазон начальных фаз ионов, обходящих кожух источника на первом обороте, в зависимости от ϕ_0 - азимутальной координаты щели (места выхода ионов) при разных амплитудах ускоряющего напряжения V и диаметрах источника $2R_{и}$. Оптимальным будет такое положение щели, при котором диапазон начальных фаз $\Delta\phi_{усн}$ будет наибольшим при данном ускоряющем напряжении. Известно, что к концу времени захвата пространственный заряд пучка уменьшает напряженность ускоряющего поля вблизи щели источника^{/1/}, поэтому при окончательном выборе азимута щели необходимо учитывать ее оптимальное положение и при меньших ускоряющих напряжениях.

Из выполненных по программе POLSA^{/2/} для синхроциклотрона ОИЯИ расчетов первых оборотов (см. рис. 1) видно, что при апертуре дуанта 12 см и существующей геометрии центральной области с открытым источником^{/3/} шаг орбиты при рабочем ускоряющем напряжении 18 кВ мал для обхода закрытого ионного источника. Однако при уменьшении в 2-3 раза апертуры дуанта и ширины ускоряющего промежутка возможен обход источника диаметром около 6 мм даже без специальной "отсасывающей" оптики. Такое уменьшение апертуры на действующем синхроциклотроне можно осуществить путем установки соответствующих филеров на дуант и фокусирующие электроды (антидуант).

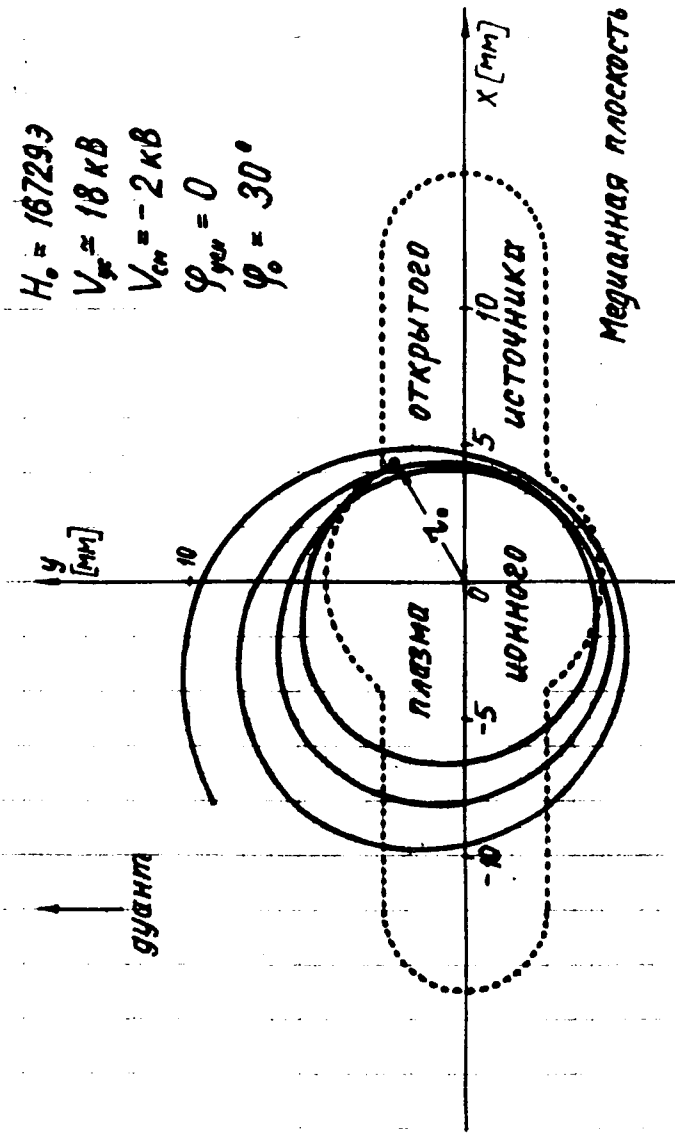


Рис.1. Форма траектории протона в центре синхроциклотрона ОИЯИ при апертуре дуанта 12 см с открытым источником.

Для расчетов в данной работе была принята апертура 5 см, соответствующая первоначальному варианту геометрии центра сооружаемого сильноточного фазотрона (см. рис. 2). Траектории протонов в подобной геометрии

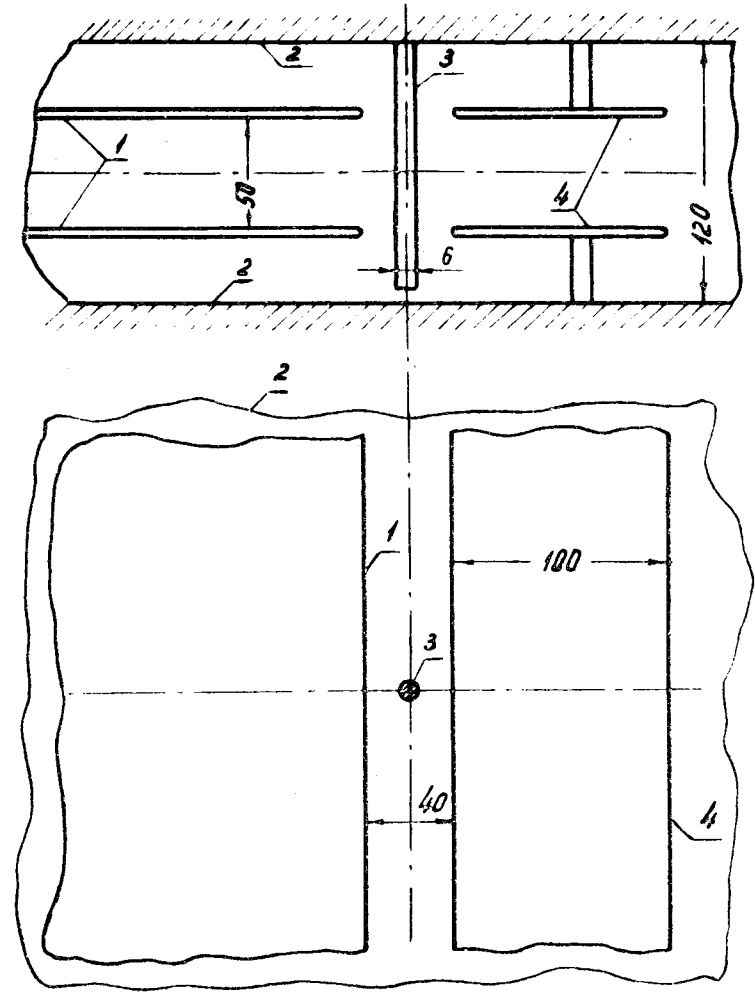


Рис.2. Схематический чертеж центральной области фазотрона: 1 - дуант, 2 - крышки камеры, 3 - ионный источник, 4 - антидуант.

с фиксированным положением щели источника рассчитывались ранее^{/4/} для изучения фазового движения при подаче положительного потенциала на кожух источника.

Расчеты оптимального положения щели источника целесообразно провести для диаметров кожуха источника 5 и 6 мм, так как диаметры меньше этих ненадежны по конструктивным соображениям, а при больших — сильно уменьшается число частиц, обходящих источник при существующих напряжениях на дуанте.

Задача решалась путем расчета траекторий ионов на первых оборотах при помощи ЭВМ CDC-6500.

2. РАСЧЕТЫ ТРАЕКТОРИЙ ИОНОВ

Для расчета траекторий использовалась система дифференциальных уравнений второго порядка с выделенными старшими производными в цилиндрической системе координат r, ϕ, z ^{/3,5/}. За независимую переменную принята имеющая размерность азимутальной координаты в радианах величина $\omega_0 t$, где ω_0 — круговая частота обращения протонов в центре ускорителя, а t — время. Система уравнений решалась по программе АССЕВМ^{/6/} методом Рунге-Кутты с постоянным шагом 0,05 рад.

Зависимость компонент магнитного поля от координат задавалась аппроксимационными формулами для азимутально однородного магнитного поля синхротрона ОИЯИ с полем в центре $H_0 = 16729 \text{ Э/в}$.

Форма эквипотенциалей в медианной плоскости для изображенной на рис. 2 системы электродов показана на рис. 3. Это распределение описывается с погрешностью в несколько процентов аналитическими выражениями, которые позволяют получить зависимость относительных компонент электрического поля от координат при помощи программы ДИАРОЗ, являющейся также частью программы АССЕВМ (приложения 5 и 8 работы^{/6/}).

Компоненты электрического поля имеют вид:

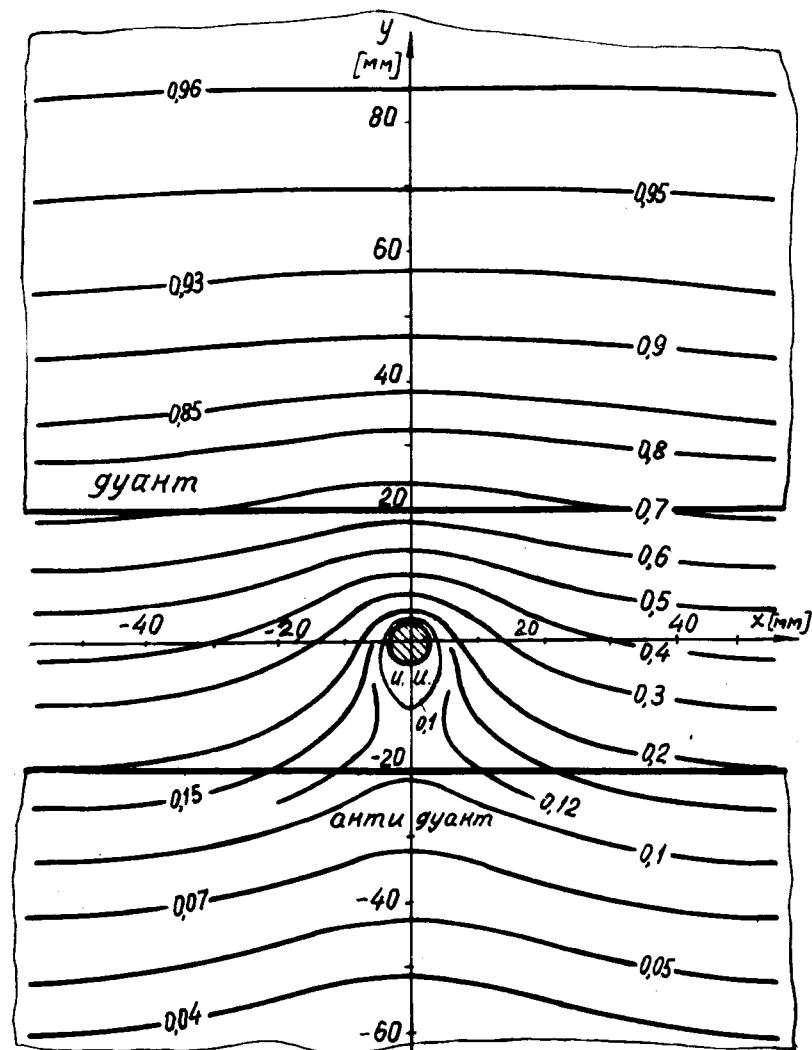


Рис.3. Форма эквипотенциалей в медианной плоскости фазотрона.

$$E_r = -(V_{yc} \cos \phi_{yc} + V_{cm}) \frac{d\psi}{dr},$$

$$E_\phi = -\frac{1}{r} (V_{yc} \cos \phi_{yc} + V_{cm}) \frac{d\psi}{d\phi},$$

$$E_z = -(V_{yc} \cos \phi_{yc} + V_{cm}) \frac{d\psi}{dz},$$

где $\phi_{yc} = (1 + \Delta) [1 - \gamma \omega_0 (t + t_n)] \omega_0 (t - t_n) + \phi_{ycn}$ - фаза ускоряющего напряжения, причем $\phi_{yc} = \phi_{ycn}$ в начальный момент времени $t = t_n$; Δ характеризует отличие частоты ускоряющего напряжения при $t = t_n$ от частоты обращения протонов в центре, а γ пропорциональна производной частотной программы¹³; V_{yc} и V_{cm} - ускоряющее напряжение и смещение на дуанте, ψ - относительный потенциал, а $\frac{d\psi}{dr}$, $\frac{1}{r} \frac{d\psi}{d\phi}$ и $\frac{d\psi}{dz}$ - относительные компоненты электрического поля при подаче на дуант единичного потенциала и при заземленных источнике и антидуанте. Шаги численного дифференцирования ψ в блоке ДИАРОЗ были выбраны равными: при расчете трехмерного движения в режиме с двойной точностью $dr = 0,005$ см, $d\phi = 0,01$ рад, а при расчете движения только в медианной плоскости в режиме с обычной точностью $dr = 0,018$ см и $d\phi = 0,024$ рад. Расчеты траекторий проводились для следующего набора начальных условий (точкой обозначено дифференцирование по $\omega_0 t$):

$$\begin{aligned} r_0 &= 0; \quad r_0 = 0,26; 0,31 \text{ и } 0,32 \text{ см;} \\ \dot{\phi}_0 &= 1; \quad \phi_0 = \pm 0,78; \pm 0,52; \pm 0,26; 0; 1,05; 1,57 \text{ рад;} \\ \dot{z}_0 &= 0; \quad z_0 = 0; 0,25; 0,5 \text{ см;} \quad \Delta = 0; \quad \gamma = 0,33 \cdot 10^{-6}; \\ \phi_{ycn} &= 0; \quad \pm 0,26; \pm 0,52; \pm 0,78; \pm 1,05; \pm 1,57 \text{ рад.} \end{aligned}$$

$t_n = 0$, так как расчеты проводились без учета пространственного заряда пучка и форма траекторий на первом обороте в начале и в конце времени захвата практически одинакова. По условиям определения компонент электрического поля начальный радиус траектории r_0 должен превышать радиус кожуха источника на 0,1 мм при расчете движения только в медианной плоскости и на 0,2 мм при трехмерном движении, а время обсчета одного оборота составляет 4 и 200 с соответственно.

В медианной плоскости было рассчитано более 900 траекторий и определены оптимальные ϕ_0 для семи значений V_{yc} от 12 до 24 кВ при $r_0 = 2,6$ и 3,1 мм. При анализе рассчитанных траекторий критерием оптимальности ϕ_0 служит максимальная величина $\Delta \phi_{ycn}$ для каждого V_{yc} . Для иллюстрации зависимости формы траекторий от ϕ_{ycn} - начальной фазы ускоряющего напряжения - на рис. 4 изображены три траектории (на краях и в середине фазового диапазона) при оптимальном значении азимута выхода частиц из источника $\phi_0 = 15^\circ$ для рабочего напряжения на дуанте $V_{yc} = 18$ кВ. На том же рисунке показано, что подразумевается под величинами r_1 (минимальная радиальная координата траектории протона на первом обороте), ϕ_0 (начальная угловая координата траектории - азимут щели) и $\Delta \phi_{ycn}$ (диапазон начальных фаз ускоряющего напряжения, при которых протон обходит источник). На рис. 5 изображены графики изменения r_1 в зависимости от ϕ_{ycn} при $V_{yc} = 18$ кВ, $R_{и} = 3$ мм и разных ϕ_0 . Видно, что диапазоны начальных фаз $\Delta \phi_{ycn}$ ограничены уменьшением r_1 до радиуса источника.

Изменение формы траекторий в зависимости от величины ускоряющего напряжения при оптимальных ϕ_0 для начальных фаз ϕ_{ycn} в середине фазового диапазона показано на рис. 6. Влияние на форму траекторий постоянного смещения на дуанте не рассматривалось, и все расчеты проводились для значения $V_{cm} = -1,8$ кВ, используемого в синхроциклотроне ОИЯИ.

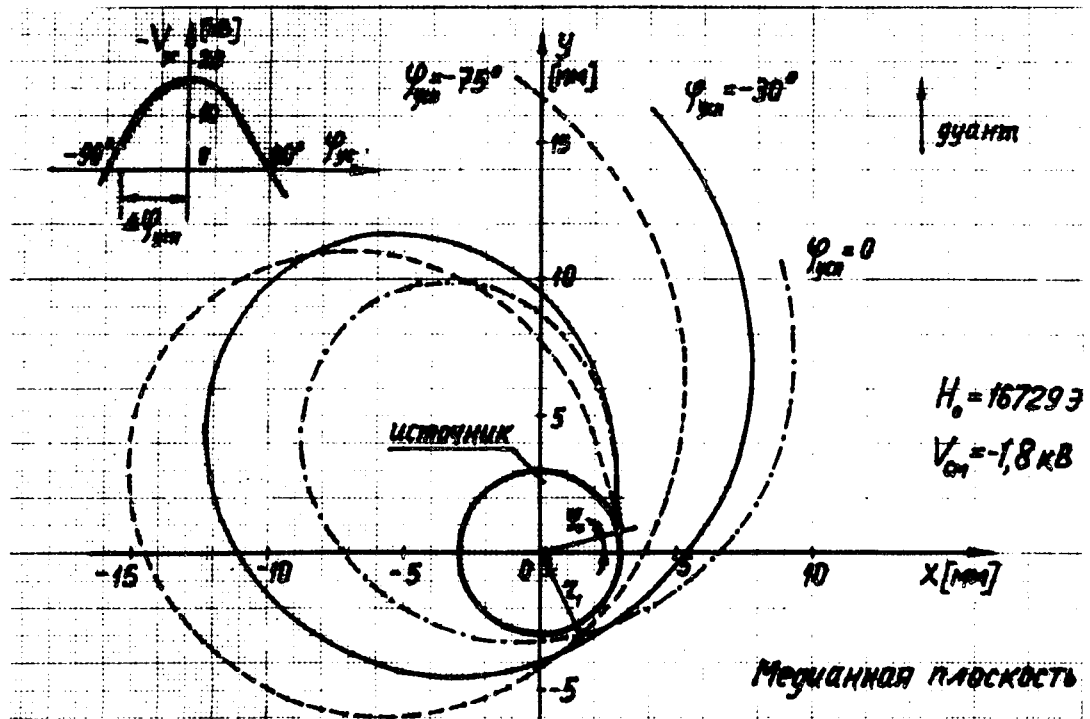


Рис.4. Форма траекторий на краях и в середине диапазона начальных фаз для $V_{\text{ус}} = 18 \text{ кВ}$ и $\phi_0 = 15^\circ$.

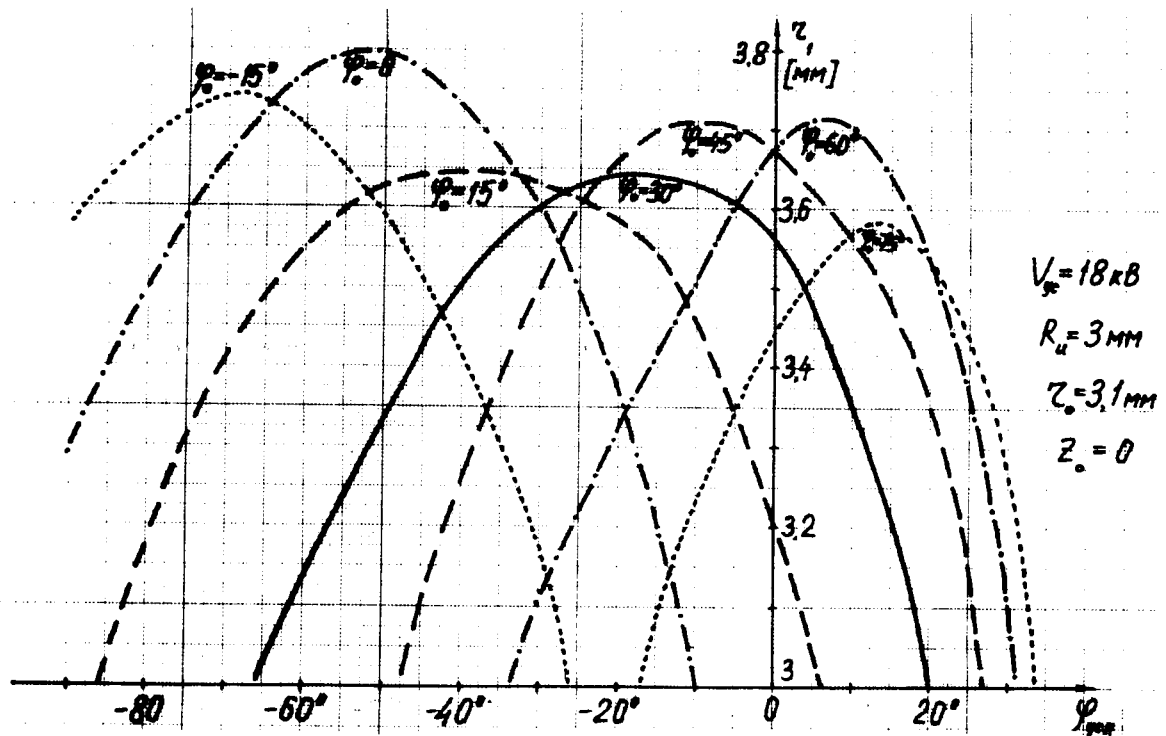


Рис.5. Влияние начальной фазы ускоряющего напряжения на минимальный радиус на первом обороте r_1 при разных азимутах щели ϕ_0 .

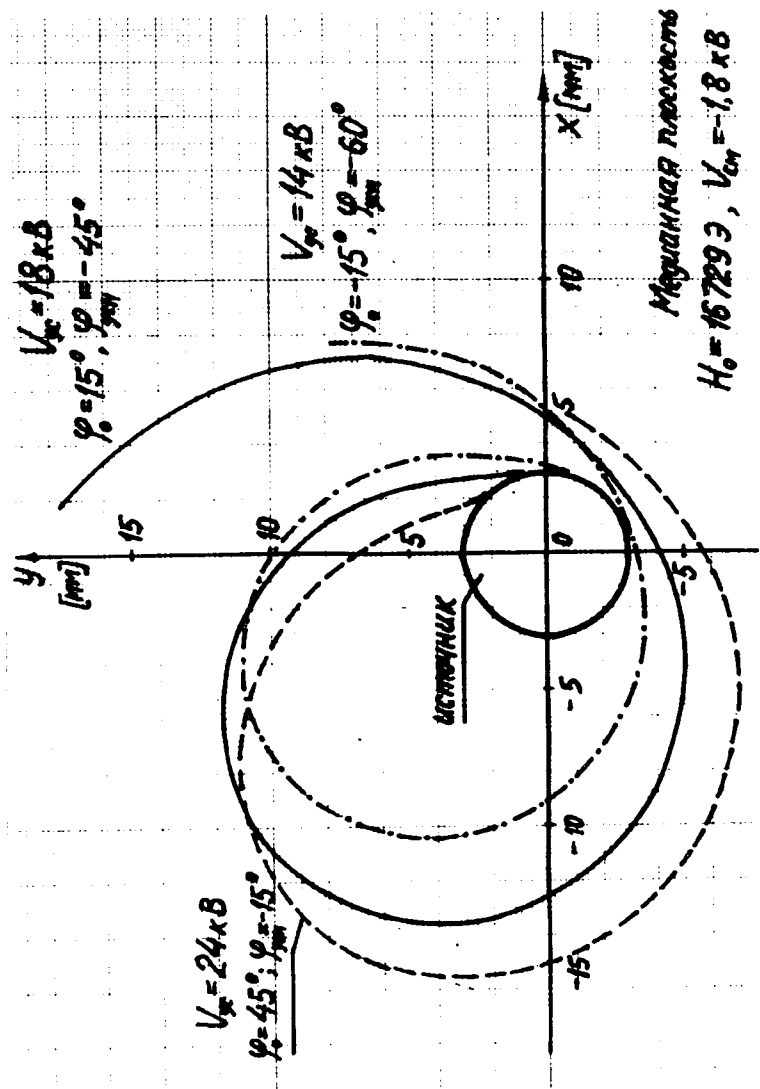


Рис.6. Форма траекторий при разных $V_{ус}$ для оптимальных ϕ_0 .

Оптимальные и близкие к оптимальным положения щели источника ϕ_0 при разных $V_{ус}$ для $R_{и} = 2,5$ и 3 мм даны в табл. 1 и 2, где для приведенных зна-

Таблица 1

Зависимость диапазона фаз $\Delta\phi_{усн}$ и τ_1 от ускоряющего напряжения и ϕ_0 при $z_0 = 0$, $r_0 = 2,6$ мм, $R_{и} = 2,5$ мм (движение в медианной плоскости)

$V_{ус} / \text{кВ}$	$\phi_0 / \text{град}$	$\tau_1 / \text{мм}$	$\phi_{усн} / \text{град}$	$\Delta\phi_{усн}$
12	- 30	2,71	-90+ -50	40
	- 15°	2,74	-85+ -35	50°
14	- 15	3,02	-90+ -20	70
	0°	2,96	-85+ -5	80°
	15	2,87	-70+ 10	80
16	0	3,28	-90+ -5	85
	15°	3,16	-85+ 10	95°
	30	3,23	-70+ 20	90
18	15	3,46	-90+ 8	98
	30°	3,53	-80+ 20	100°
	45	3,59	-65+ 32	97
20	15	3,77	-90+ 16	106
	30	3,84	-85+ 22	107
	45°	3,87	-70+ 37	107°
22	15	4,08	-90+ 20	110
	30	4,16	-90+ 24	114
	45°	4,16	-83+ 33	116°
24	15	4,38	-90+ 22	112
	30	4,48	-90+ 26	116
	45°	4,44	-85+ 35	120°

Таблица 2

Зависимость $\phi_{\text{усн}}$ и γ_1 от $V_{\text{ус}}$ и ϕ_0 при $z_0=0$,
 $r_0=3,1$ мм, $R_{\text{и}}=3$ мм (движение в медианной плоскости)

$V_{\text{ус}}$ /кВ/	ϕ_0 /град/	γ_1 /мм/	$\phi_{\text{усн}}$ /град/	$\Delta\phi_{\text{усн}}$
12	нет обхода источника ни при каких ϕ_0 и $\phi_{\text{усн}}$			
14	- 30	3,15	- 90 + - 53	37
	- 15°	3,13	- 83 + - 40	43°
	0	3,18	- 63 + - 30	33
16	- 15	3,42	- 90 + - 30	60
	0°	3,48	- 85 + - 15	70°
	15	3,35	- 70 + 0	70°
18	0	3,8	- 90 + - 10	80
	15°	3,64	- 86 + 6	92°
	30	3,64	- 65 + 20	85
20	0	4,08	- 90 + - 10	80
	15°	3,95	- 90 + 5	95°
	30	3,93	- 72 + 23	95°
22	15	4,25	- 90 + 7	97
	30°	4,24	- 83 + 22	105°
	45°	4,31	- 67 + 37	104°
24	15	4,55	- 90 + 16	106
	30	4,55	- 86 + 23	109
	45°	4,61	- 73 + 37	110°

чений ϕ_0 указаны также величины γ_1 , границы диапазона начальных фаз $\phi_{\text{усн}}$ и величина диапазона $\Delta\phi_{\text{усн}}$. Из таблиц видно, что наилучшее положение щели источника изменяется с ростом $V_{\text{ус}}$ от $\phi_0=-15^\circ$ при $V_{\text{ус}}=12$ и 14 кВ до $\phi_0=45^\circ$ при $V_{\text{ус}}=24$ кВ. На рис. 7 изображено, как меняются в зависимости от ускоряющего напряжения оптимальное азимутальное положение щели источника ϕ_0 , а также $\Delta\phi_{\text{усн}}$ и значение γ_1 при оптимальных ϕ_0 .

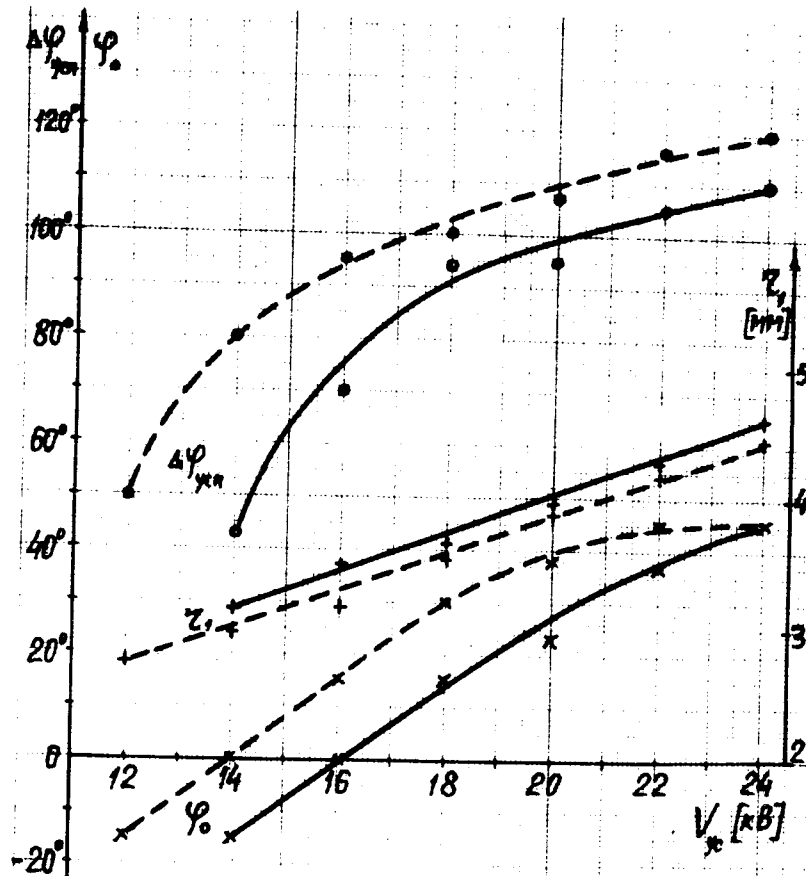


Рис.7. Зависимости ϕ_0 , γ_1 и $\Delta\phi_{\text{усн}}$ от ускоряющего напряжения при $R_{\text{и}}=2,5$ (---) и 3 (—) мм.

При трехмерном движении определение оптимального ϕ_0 производилось только для $V_{\text{ус}}=18$ кВ, $r_0=3,2$ мм и $z_0=2,5$ и 5 мм. $\phi_{\text{усн}}$, $\Delta\phi_{\text{усн}}$ и максимальные значения γ_1 приведены в табл. 3 в зависимости от ϕ_0 и z_0 , а проекция траектории на медианную плоскость для $z_0=5$ мм и оптимального ϕ_0 изображена на рис. 8. Как видно из таблицы, оптимальные ϕ_0 растут с z_0 , что можно объяснить увеличением электрического поля с высотой.

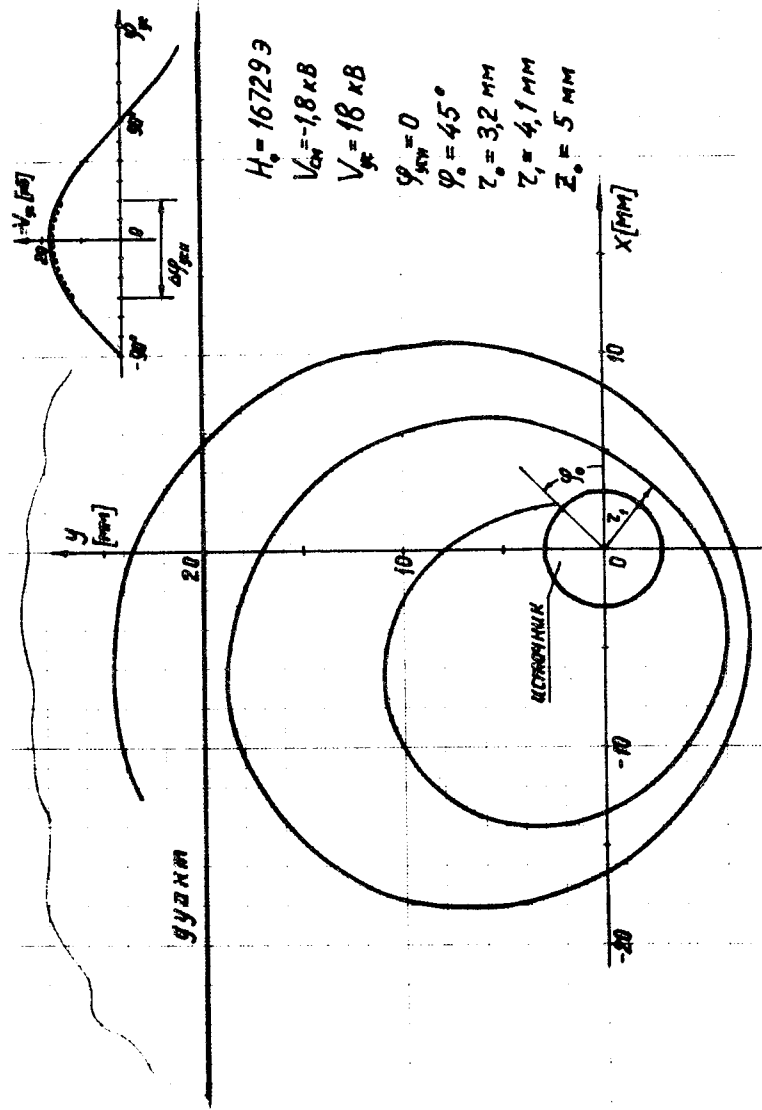


Рис. 8. Траектория протона около источника при трехмерном движении.

Таблица 3

Зависимость $\Delta\phi_{\text{усн}}$ - диапазона начальных фаз и минимального радиуса на первом обороте r_1 от азимута щели ϕ_0 и начальной вертикальной координаты z_0 для трехмерного движения при $V_{\text{ус}} = 18 \text{ кВ}$, $R_{\text{и}} = 3 \text{ мм}$, $r_0 = 3,2 \text{ мм}$.

z_0 /мм/	φ_0 /град/	z_1 /мм/	$\varphi_{\text{усн}}$ /град/	$\Delta\varphi_{\text{усн}}$
2,5	- 45	4,07	- 90 + - 53	37
	- 30	4,05	- 90 + - 23	67
	- 15°	4,06	- 83 + - 10	73°
	0	4,02	- 53 + 6	59
5	15	4,04	- 66 + 7	73
	30	4	- 63 + 37	100
	45°	4,08	- 53 + 53	106°
	60	4,17	- 32 + 62	94

3. ВЫВОДЫ

А. Расчеты движения ионов на первом обороте в медианной плоскости показали, что:

1. Без специальных отсасывающих электродов при апертуре дуанта и антидуанта 5 см и расстоянии между ними 4 см минимальное ускоряющее напряжение, при котором еще возможен обход источника диаметром 6 мм, равно 14 кВ, а при диаметре 5 мм частицы обходят источник и при $V_{\text{ус}} = 12 \text{ кВ}$.
2. Диапазон начальных фаз $\Delta\phi_{\text{усн}}$ с $V_{\text{ус}}$ растет от 40-50° сначала быстро, а затем плавно приближается к значению 110-120° при $V_{\text{ус}} = 24 \text{ кВ}$.

3. Минимальная радиальная координата на первом обороте r_1 растет примерно линейно с ростом V_{yc} от $r_1=2,7$ и $3,2$ мм при $V_{yc}=12$ и 14 кВ до $r_1=4,4$ и $4,6$ мм при $V_{yc}=24$ кВ.

4. Зависимости $\Delta\phi_{yш}$ от азимута щели источника ϕ_0 имеют плоский максимум. Оптимальные ϕ_0 при рабочем $V_{yc}=18$ кВ находятся вблизи $\phi_0 \approx 30^\circ$ при диаметре источника 5 мм и вблизи $\phi_0 \approx 15^\circ$ при диаметре источника 6 мм. Если учесть уменьшение напряженности ускоряющего поля около источника к концу времени захвата из-за влияния пространственного заряда пучка $1/\gamma$, то за оптимальные следует выбрать несколько меньшие значения азимутов щели ($\sim 15^\circ$ и $\sim 7^\circ$ соответственно).

Б. Расчеты трехмерного движения показали, что при выборе азимута и формы щели следует учитывать смещение оптимального ϕ_0 в сторону больших значений с увеличением начальной вертикальной координаты z_0 .

В данной работе не изучалось, как меняется в течение времени захвата диапазон начальных фаз вследствие возврата ионов к центру при первом фазовом колебании или вследствие выпадения их из режима автофазировки.

При необходимости такое исследование, аналогичное выполненному ранее ^{3/} для апертуры дуанта 12 см и открытого ионного источника, можно проделать и для рассматриваемой конфигурации центральной области совместно с анализом вертикального движения.

В заключение автор благодарит Е.И.Розанова за постановку задачи и неоднократные полезные обсуждения и Э.А.Полферова за критические замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафонов А.Н., Шехтман Л.А. Исследование распределения потенциала в двумерной модели ускоряющего промежутка синхроциклотрона при наличии пространственного заряда. ОИЯИ, Р9-3639, Дубна, 1967.

2. Данилов В.И. и др. Программы POLSA и ZAIN для расчета траекторий в синхроциклотроне. ОИЯИ, Б1-9-9201, Дубна, 1975.
3. Данилов В.И. и др. Изменение фазового диапазона в течение времени захвата в синхроциклотроне. ОИЯИ, Р9-9200, Дубна, 1975.
4. Замолодчиков Б.И., Новиков Д.Л., Шакун Н.Г. Фокусировка в центральной области фазотрона при положительном потенциале на разрядной камере источника ионов. ОИЯИ, Р9-9284, Дубна, 1975.
5. Сафонов А.Н. Программа для расчета движения поляризованных протонов через тракт аксиального инжектора. ОИЯИ, Б1-9-11328, Дубна, 1978.
6. Сафонов А.Н. Определение компонент магнитного и электрического полей в ускорителях циклотронного типа. ОИЯИ, Б1-9-9739, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июля 1978 года.