

39  
**И Н С Т И Т У Т**  
**ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

**ПРЕПРИНТ 351**

**Б.И.Гришанов, А.В.Киселёв, А.П.Лысенко**

**СИСТЕМА БЫСТРОЙ КОММУТАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ  
ЧАСТИЦ УСТАНОВКИ СО ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ**

**Б-4 - ВЭПП-3**

**Новосибирск**

**1969**



Б.И.Гришанов, А.В.Киселев, А.П.Лысенко

СИСТЕМА БЫСТРОЙ КОММУТАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
УСТАНОВКИ СО ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ Б-4 - ВЭПП-3

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана система быстрой коммутации заряженных частиц установки Б-4 - ВЭПП-3. Приведены расчётные соотношения и числовые параметры рабочих режимов. Рассмотрены другие варианты.



Система коммутации пучков заряженных частиц первой очереди установки ВЭПП-3 /1/ предназначена для выполнения следующих задач:

1. Однооборотный выпуск электронов с максимальной энергией 500 Мэв из синхротрона Б-4 без существенного увеличения фазового объема.

2. Инжекция этих частиц в накопитель с жесткой фокусировкой ВЭПП-3 с последовательным разложением их по сепаратрисам.

3. Инжекция позитронов, получаемых из 500 Мэв электронов после конверсии, с вдвое меньшей энергией и максимально возможным фазовым объемом.

4. Выпуск электронов и позитронов на предельной для ВЭПП-3 энергии 3,75 Бэв.

В качестве вероятного в будущем варианта предполагаются также опыты по ускорению и накоплению протонов с использованием магнитных систем Б-4 до энергии 125 Мэв и ВЭПП-3 до максимальной энергии 2,8 Бэв, так что одновременно рассматриваются и эти возможности.

#### Выпуск из Б-4

Однооборотная коммутация пучков Б-4 и ВЭПП-3 производится при помощи отклоняющих систем со встречной бегущей волной, выполненных в виде согласованных на конце отрезков симметричных полосковых линий.

Вид вакуумной дорожки Б-4 в плане и её поперечное сечение приведены на рис.1. На рис.2 показаны положение пучка перед выпуском и его траектория после удара дефлектора. Движе-



ние частиц в дефлекторе и квадранте после удара описывается соответственно уравнениями:

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} - \frac{2Ee}{\varepsilon} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2 Z}{dx^2} + \alpha_z^2 \omega_c^2 Z = 0 \quad (2)$$

где  $Z$  - отклонение частицы от равновесной орбиты выпуска,

$X$  - расстояние по кривой вдоль траектории движения частицы,

$E$  - напряженность поля в дефлекторе,

$\varepsilon$  - энергия частиц,

$\alpha_z \omega_c = \sqrt{n} \omega_c$  - частота вертикальных бетатронных колебаний в квадранте.

Обозначим

$$\frac{2Ee}{\varepsilon} = A_z, \quad \frac{\alpha_z \omega_c}{c} = \beta_z$$

тогда после удара дефлектора частицы будут иметь следующие координаты.

На выходе дефлектора длиной  $l_d$ , расположенного симметрично по азимуту относительно оси квадранта:

$$\alpha_{1z} = \alpha_{0z} + A_z l_d \quad (3)$$

$$Z_1 = Z_0 + \alpha_{0z} l_d + A_z \frac{l_d^2}{2} \quad (4)$$

На входе в квадрант:

$$\alpha_{2z} = \alpha_{1z} \quad (5)$$

$$Z_2 = Z_1 + \alpha_{1z} \Delta l \quad (6)$$

где  $\Delta l = \frac{l_{np} - l_d}{2}$   
 $l_{np}$  - длина промежутка.

В конце квадранта у выпускного зуба:

$$\alpha_{вып} = \alpha_{2z} \cos \beta_z l_{кв} - \beta_z Z_2 \sin \beta_z l_{кв} \quad (7)$$

$$Z_{вып} = \frac{\alpha_{2z}}{\beta_z} \sin \beta_z l_{кв} + Z_2 \cos \beta_z l_{кв}, \quad (8)$$

где  $l_{кв}$  - длина квадранта по орбите выпуска.

Для оси пучка  $\alpha_{0z} = 0$ ,  $Z_0 = 0$ , тогда

$$\alpha_{вып} = A_z l_d \cos \beta_z l_{кв} - \beta_z A_z l_d \left( \frac{l_d}{2} + \Delta l \right) \sin \beta_z l_{кв} \quad (9)$$

$$Z_{вып} = A_z \frac{l_d}{\beta_z} \sin \beta_z l_{кв} + A_z l_d \left( \frac{l_d}{2} + \Delta l \right) \cos \beta_z l_{кв} \quad (10)$$

Необходимый заброс

$$\delta = Z_{вып} = a_{zn} + h + \Delta Z_n + \frac{\Delta a_{zn}}{2} \quad (11)$$

где  $a_{zn}$  - вертикальный размер пучка перед выпуском,

$h$  - толщина ножа выпускного магнита,

$\Delta Z_n$  - нестабильность положения пучка перед выпуском,

$\Delta a_{zn}$  - увеличение вертикального размера пучка после удара за счёт неоднородности поля в дефлекторе и подъёма вершины импульса дефлектора.

Рабочая апертура дефлектора

$$\delta_{z\partial} = a_{zn} + \delta_{z\partial} + \Delta Z_n \quad (12)$$

$\delta_{z\partial}$  - заброс пучка в дефлекторе.

Коэффициент выпуска при распушенном пучке /2/



$$K_{\text{вып}} = 1 - \frac{h}{\delta} \frac{2\ell\partial}{cT_0} \quad (13)$$

Ниже приведены расчётные параметры выпуска при энергии 500 Мэв.

Максимальные размеры пучка перед ударом дефлектора

$$a_{zn} \text{ см } 1,5$$

$$a_{zd} \text{ см } 0,7$$

Радиус орбиты выпуска

$$R_{\text{вып}} \text{ см } 108,2$$

Заброс пучка у ножа выпускного магнита

$$\delta \text{ см } 1,1$$

Угол выпуска

$$L_{\text{вып}} 3,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Напряженность поля в дефлекторе } E \text{ в/см } 6,5 \cdot 10^4$$

$$\text{Рабочая апертура дефлектора } a_{zd} \text{ см } 1,0$$

$$a_{zd} \text{ см } 1,6$$

$$\text{Длина дефлектора } \ell\partial \text{ см } 28$$

$$\text{Напряжение на шинах дефлектора } U_0 \text{ в } 3,25 \cdot 10^4$$

$$\text{Волновое сопротивление дефлектора } \rho\partial \text{ ом } 2 \times 50$$

Часть пригодной для ускорения площади апертуры, занятая дефлектором и выпускным магнитом

$$\sim 0,3$$

Коэффициент выпуска распущенного пучка

$$K_{\text{вып}} 0,98$$

Неоднородность поля в рабочей апертуре дефлектора

$$\left| \frac{\Delta E_z}{E_{zcp}} \right| \leq 0,1$$

$$\left| \frac{E_z}{E_{zcp}} \right| \leq 0,1$$

Подъём вершины импульса дефлектора

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{max}}} \leq 0,1$$

Увеличение размеров пучка на выпуске

$$\frac{\Delta a_{zn}}{a_{zn}} \leq 0,1$$

$$\frac{\Delta a_{zd}}{a_{zd}} \leq 0,2$$

Заброс пучка в конце дефлектора

$$\delta_{zd} \text{ см } 0,1$$

Допустимая нестабильность положения пучка перед ударом

$$\Delta Z_n \text{ см } 0,1$$

Толщина ножа выпускного магнита

$$h \text{ см } 0,2$$

Зарядное напряжение генератора

$$U_3 \text{ в } \pm 6,5 \cdot 10^4$$

Введение пучка в дефлектор по радиусу производится за счёт расширения орбиты после выключения ускоряющего ВЧ напряжения на резонаторе.

Если при достижении энергии  $E$  ускоряемых частиц на заднем склоне магнитного поля  $B(t)$  выключить напряжение ВЧ на резонаторе, орбита будет изменяться следующим образом /3/:

$$\left( \frac{R}{R_0} \right)^{1-n} = \frac{1 - \alpha_{изл}(E)t}{\cos \omega_B t - \beta_B \sin \omega_B t} \quad (14)$$

Обозначения:

$\alpha_{изл}(E) \approx 3,15 \cdot 10^{-6} E^3 / \text{Мэв}^3$  - коэффициент, учитывающий потери на излучение.

$$\beta_B = \sqrt{\left( \frac{B_{\text{max}}}{B_{\text{вкл}}} \right)^2 - 1}$$

$B(t) = B_{\text{max}} \cos(\omega_B t + \varphi_{\text{вкл}})$  - закон изменения магнитного поля



$B_{\text{выкл}} = B_{\text{макс}} \cos \varphi_{\text{выкл}}$  - поле, при котором выключается ВЧ.

При  $R_0 = 101$  см,  $n = 0,4$ , получим с хорошим приближением

$$\dot{R}_t = \frac{R_0}{1-n} (\omega_B \beta_B - du_{\text{изл}}) \approx 1,7 \cdot 10^2 (\omega_B \beta_B - du_{\text{изл}}) \quad (15)$$

На рис.3 приведены кривые изменения положения пучка после выключения ВЧ от времени при различных  $B_{\text{выкл}}/B_{\text{макс}}$ , когда  $B_{\text{макс}}$  соответствует энергии  $E_{\text{макс}} = 500$  Мэв, а на рис.4 - зависимость энергии пучка на орбите выпуска от  $B_{\text{выкл}}/B_{\text{макс}}$  для того же случая. Потери на излучение приводят к тому, что при  $E_{\text{макс}} = 500$  Мэв и  $B_{\text{выкл}}/B_{\text{макс}} = 0,9 - 0,98$   $E_{\text{вып}}$  практически не зависит от последней величины и составляет  $0,9 E_{\text{макс}} = 450$  Мэв. С точки зрения стабильности момента пересечения пучком орбиты выпуска после выключения ВЧ выгоднее работать при меньших значениях  $B_{\text{выкл}}/B_{\text{макс}}$ .

При  $E_{\text{макс}} = 500$  Мэв,  $B_{\text{выкл}}/B_{\text{макс}} = 0,9$  и неустойчивости положения пучка в дефлекторе  $\Delta Z_n \approx \pm 0,7$  мм при фиксированной задержке выпуска после выключения ВЧ  $t_{\text{зад}} \approx 7,5 \cdot 10^{-5}$  сек требуется стабильность  $B_{\text{макс}}$  не хуже  $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ .

Подведение пучка к выпускному зубу по вертикали осуществляется перед выпуском коррекцией равновесной орбиты. Если на орбите ввести местное возмущение поля на длине  $l_{\text{кор}}$ , то воздействие такого возмущения на пучок можно аппроксимировать последовательностью трапециoidalных импульсов с периодом  $T_{\text{о кор}}$ , равном периоду обращения частиц, фронтами  $\tau_{\text{ф кор}}$  и длительностью на половине высоты  $\tau_{\text{и кор}} = l_{\text{кор}}/c$ . Результат такого воздействия при вертикальной коррекции [3]

$$Z = Z_0 + \sum_{k=1}^{\infty} 2Z_0 S_k \frac{1}{1-\gamma_k^2} \cos 2\pi k \frac{t}{c T_{\text{о кор}}} \quad (16)$$

где  $Z_0$  - смещение орбиты под действием постоянной составляющей возмущения,

$l$  - расстояние вдоль по равновесной орбите от центра возмущения,

$S_k$  - огибающая относительных амплитуд гармоник возмущения,

$$\gamma_k = \frac{k\omega_0}{\omega_z}$$

$$\text{Для } k < 0,25 \frac{T_{\text{о кор}}}{\tau_{\text{и кор}}} \quad 0,9 < S_k < 1 \quad (17)$$

Для очень быстрой коррекции можно применить электрическое поле

$$Z_0 = \frac{e E_0 c^2}{\epsilon \omega_z^2} \cdot \frac{\tau_{\text{и кор}}}{T_{\text{о кор}}} \approx \quad (18)$$

$$\approx 2 \cdot 10^{-2} \frac{E_0 \left(\frac{\text{В}}{\text{см}}\right)}{\epsilon (\text{МэВ})} \cdot \frac{\tau_{\text{и кор}}}{T_{\text{о кор}}} = 6 \frac{H_0 (\text{Э})}{E (\text{МэВ})} \frac{\tau_{\text{и кор}}}{T_{\text{о кор}}}$$

где  $E_0$  и  $H_0$  - поле коррекции.

Таблица 1

$K$	$\gamma_{kz}$	$(1-\gamma_{kz}^2)^{-1}$
1	1,41	- 1
2	2,82	- 0,143
3	4,23	- 0,059
4	5,64	- 0,032

Из таблицы 1 видно, что вклад гармоник в результат быстро падает с ростом  $K$ . Для коррекции в промежутке по формуле (16) принимая приближение (17) и данные таблицы 1, получим:

$$\frac{Z}{Z_0} \approx - 1,47 \quad (19)$$

в промежутке коррекции, и

$$\frac{Z}{Z_0} \approx + 2,77 \quad (20)$$

в противоположном промежутке.



Обозначим:

$Z_{кор}$  - величина коррекции в промежутке выпуска,  
 $Z_1$  - то же в противоположном промежутке.

Тогда при  $\mathcal{E} = 500$  Мэв,  $Z_{кор} = 2,6$  см и  $\rho_{кор} = \rho_{пр}$  для

коррекции в промежутке, противоположном выпускному, из (18), (19) и (20) получим:

$$Z_0 = 1,0 \text{ см}, \quad Z_1 = -1,5 \text{ см}, \quad H_0 \approx 1,6 \cdot 10^3 \text{ э.}$$

Дефлектор расположен в промежутке  $I$  (рис.1а) смещен относительно оси камеры на 1,2 см, вверх и наклонен к ней под углом

$$\alpha_0 \approx 2\pi \frac{Z_{кор} - Z_0}{cT_0} \approx 10^{-2} \quad (21)$$

Если коррекцию производить в промежутке выпуска:

$$Z_0 = -1,9 \text{ см}, \quad Z_1 = -5,3 \text{ см}, \quad H_0 \approx 3,1 \cdot 10^3 \text{ э.}$$

При этом  $Z_1 > \frac{a_{zk}}{2} = 4$  см, пучок садится на стенку камеры.

Допустимая нестабильность поля коррекции от импульса к импульсу

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} = \frac{\Delta Z_n}{Z_{кор}} \quad (22)$$

При нестабильности положения пучка перед выпуском у выпускного зуба за счёт нестабильности поля коррекции  $\Delta Z_n = \pm 0,25$  мм требуется  $\frac{\Delta H_0}{H_0} \leq \pm 1 \cdot 10^{-2}$ . При этом в дефлекторе  $\Delta Z_n = \pm 0,18$  мм. Чтобы при движении пучка от края дефлектора до орбиты выпуска его положение по  $Z$  изменялось не больше чем на  $\Delta Z_n$ , длительность импульса коррекции по основанию должна быть не меньше

$$\tau_{и н кор} = \frac{\Delta \varphi_0}{V_0} \cdot \frac{\pi}{\arcsin n \left(1 - \frac{\Delta Z_n}{Z_0}\right)} \quad (23)$$

если поле коррекции изменяется по закону

$$H_{кор} = H_{макс} \sin \omega_{кор} t \quad (24)$$

$\Delta \varphi_0$  - путь, проходимый пучком в дефлекторе от края до орбиты выпуска.

$V_0$  - скорость расширения орбиты в дефлекторе, определяется из рис.3.

Для  $\Delta Z_n = 0,5$  мм требуется  $\tau_{и н кор} \geq 5 \cdot 10^{-5}$  сек при  $V_{выкл}/V_{макс} = 0,9$ , при  $V_{выкл}/V_{макс} = 0,95$

$$\tau_{и н кор} \geq 10^{-4} \text{ сек.}$$

Наряду с описанным вариантом выпуска рассмотрены для сравнения и другие варианты. За критерий качества выпуска принята величина тока, выпущенного за один оборот без заметного увеличения углового разброса пучка

$$I_{вып} = I_{ускор} \cdot K_{вып}. \quad (25)$$

Для получения максимального значения  $I_{ускор}$ , дефлектор и выпускной магнит не должны занимать заметную часть апертуры, пригодной для ускорения. Для получения  $K_{вып} \approx 1$  согласно (13) дефлектор должен занимать по азимуту малую часть оборота. Согласование дефлектора упрощает схему генератора и облегчает режим работы изоляторов по сравнению с несогласованным вариантом, поскольку импульсы проходят только один раз. В конечном счёте повышается надёжность системы.

Выпуск в вертикальной плоскости требует меньшего напряжения на шинах дефлектора, т.к.:

1. В вертикальном направлении пучок имеет меньшую жесткость ( $n = 0,4$ ), и для одинаковых забросов по  $Z$  и по  $Z'$  требуется

$$E_z = 1,2 E_{z'} \quad (26)$$

2. Необходимый заброс пучка согласно (11)

$$\delta_z = 2 \delta_{z'} \quad (27)$$

т.к.  $a_{zn} \approx 2 a_{zn'}$

3. Рабочая апертура дефлектора равна апертуре камеры  $a_0 = a_k$ , если удар производить по всей апертуре или определяется из (12) для местного удара. Т.к.  $a_{zn} \approx 2 a_{zn'}$ ,

$a_{zk} = 1,75 a_{zk'}$  для создания одинаковой напряженности поля потребуется напряжение на пластинах дефлектора

$$V_{z0} \approx (1,75 - 2) V_{z0'} \quad (28)$$



Правда, при радиальном выпуске дефлектор может иметь большее отношение зазора к ширине пластины, т.е. большее волновое сопротивление, и применяя согласующий трансформатор можно иметь большее напряжение на дефлекторе при том же зарядном напряжении или энергии импульса. Однако, для получения достаточно однородного поля в заданной апертуре, определяемой  $a_{zn}$  и  $A_{zn}$ , ширину пластин приходится увеличивать, и большого выигрыша не получается. Если сравнивать эти варианты по зарядному напряжению генераторов, из (20), (21), (22) получим: радиальный выпуск потребует в 3-4 раза большего напряжения, т.е. в 10-15 раз большую импульсную мощность генератора питания дефлектора, по сравнению с выпуском по Z. Поэтому в дальнейшем рассмотрены только возможные варианты вертикального выпуска с дефлекторами, расположенными в промежутках. Размещение дефлекторов в квадрантах технически менее удобно.

Для выпуска по Z на рис.5 приведены траектории равновесной частицы на фазовой плоскости после удара дефлектора (или двух дефлекторов). Дефлекторы размещены в промежутках. Результаты расчётов сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Вариант	Дефлектор I		Дефлектор II		$\frac{A_2}{A_1}$	$\pm V_{зар} \text{ кв} / 1 \text{ см заброса}$	
	Промежуток	Направление удара	Промежуток	Направление удара		$a_z^0 = 1 \text{ см}$	$a_z^0 = 8 \text{ см}$
1	I	Вверх	-	-	-	52	416
2	I	Вниз	IУ	Вверх	2	26	208
3	I	Вниз	III	Вверх	1,82	28	224
4	I	Вверх	II	Вверх	1,68	31	248
5	I	Вниз	через I оборот	Вверх	1,56	33	264

Рабочая длина дефлектора  $l_d = 28 \text{ см}$ . Зарядные напряжения приведены для заброса электронов с энергией 500 Мэв на 1 см на максимуме бетатронного колебания в предположении равенства волновых сопротивлений дефлектора и зарядных линий генератора. Цифры у траекторий означают номер варианта, а буквы - характерные точки на траектории соответственно рис.1 а.

$A_2/A_1$  - отношение амплитуды бетатронного колебания, вызванного действием двух дефлекторов, к амплитуде колебания от первого дефлектора. Это отношение показывает эффективность использования второго удара.

Из приведенных данных видно, что в вариантах 2 и 3 удары складываются хорошо, но выпускной зуб должен располагаться внутри квадранта (точки 2° и 3° на рис.5) или в промежутке I (точки  $a_2^0$  и  $a_3^0$ ), где расположен первый дефлектор. Последнее трудно выполнимо. В варианте 4 удары складываются удовлетворительно ( $A_2/A_1 = 1,68$ ), выпускной зуб удачно размещается в промежутке III (точка  $c_4^0$ ) почти на максимуме бетатронного колебания. В варианте 5 удар производится два раза одним и тем же дефлектором в противоположных направлениях через оборот, выпускной зуб размещается в промежутке II (точка  $c_5^0$ ). Однако второй удар здесь используется почти наполовину ( $A_2/A_1 = 1,56$ ), а изменение полярности напряжения дефлектора за время  $\tau_{уст} \ll T_0$  (без изменения направления распространения волны в случае работы на бегущей или отраженной волне) влечет за собой дополнительные трудности. Недостатком вариантов с двумя ударами, кроме варианта 5, является также необходимость врезать выпускной зуб в шину или занимать под выпуск три промежутка.

Рассмотрен также вариант выпуска протонов. Пучок протонов имеет перед выпуском размеры 1 x 3 см, поэтому протонный дефлектор имеет радиальный размер 4 см, а это уменьшает радиальную апертуру камеры по сравнению с электронным вариантом на 15%. Поэтому дефлекторы конструируются сменными. При  $V_{зар} = \pm 65 \text{ кв}$ ,  $E_p = 125 \text{ Мэв}$ ,  $a_z^0 = 1,3 \text{ см}$ ,  $l_d = 28 \text{ см}$ ,  $\rho = 2 \times 50 \text{ ом}$  дефлектор обеспечит заброс  $\delta = 1,5 \text{ см}$ .



### Впуск и накопление частиц в ВЭПП-3

Для впуска и накопления частиц в ВЭПП-3 принята схема с двумя инфлекторами. Накопленный пучок отклоняется встречной бегущей волной, одного инфлектора, затем вместе с впущенным пучком - другого инфлектора так, чтобы удары вычитались.

Расположение инфлекторов и впускных зубьев в вертикальной плоскости представлено на рис. 6.

Движение частиц в линзе с помещенным в ней инфлектором описывается уравнением:

$$m\gamma \frac{d^2 Z}{dt^2} = \pm e\beta GZ + e(1+\beta)E \quad (29)$$

где  $G$  - градиент магнитного поля квадрупольной линзы  
 $E$  - поле встречной бегущей волны инфлектора. Запишем (29) в виде:

$$\frac{d^2 Z}{d\theta^2} \pm Z = \rho \quad (30)$$

где  $\theta = \sqrt{\frac{eG}{\beta\gamma mc^2}} \ell$ ;  $\rho = \frac{(1+\beta)E}{\beta G}$   $\ell$  - длина

Из условия единичности матрицы всего прямолинейного промежутка ВЭПП-3

$$\begin{aligned} \theta(\text{рад}) &= 1,605 \cdot 10^{-2} \ell(\text{см}) \\ E\left(\frac{\text{кВ}}{\text{см}}\right) &= 12,88 P\left(\frac{5\text{эВ}}{c}\right) \rho(\text{мм}) \\ L(\text{рад}) &= 1,605 \cdot 10^{-3} Z'(\text{мм}) \end{aligned} \quad (30a)$$

На рис.7 изображены траектории частиц после единичных ударов ( $\rho = 1$ ) в инфлекторах  $1F_2$ ,  $1D_2$ ,  $2F_2$  и  $2D_2$ .

Расчет накопления производится для следующих параметров.

Электроны. Энергия 500 Мэв,  $2\Delta Z \approx 7$  мм. Радиационное затухание колебаний  $\tau_2 = 0,3$  сек. Накопленный пучок отклоняется в линзе  $D_2$  инфлектора 2 ( $2D$ ). Впущенный пучок вместе с накопленным - в линзе  $F_2$  инфлектора 1 ( $1F$ ).

Позитроны. Энергия 250 Мэв.

Затухание колебаний  $\tau_2 = 2,5$  сек. Накопленный пучок отклоняется инфлектором  $1D$ . Впущенный вместе с накопленным -  $2F$ . Для кратности ВЧ ВЭПП-3  $q = 19$  длина сепаратрисы 3,9 м. Длина пучка из Б-4 - 8,4 м. Накопление позитронов в две сепаратрисы  $\tau_u = 22$  нсек. Основной режим накопления электронов в одну сепаратрису,  $\tau_u = 9$  нсек. Впуск частиц должен быть синхронизован с ВЧ с точностью порядка 1 нсек.

За 9 циклов заполняются последовательно все сепаратрисы и снова происходит впуск в первую. Величина допустимого удара по накопленному пучку определяется размерами камеры между 1 и 2 инфлекторами, стабильностью удара и положения пучка, размерами его к моменту очередного удара.

Если размеры камеры на участке между инфлекторами больше чем огибающая Флоке, то самые узкие места камеры будут у впускных зубьев, расположенных на краю апертуры, определяемой функцией Флоке.

Из траекторий рис.7 определяем допустимый удар по накопленному пучку

$$Y_{\rho_0} + \Delta Z = \frac{A_1}{2f_1} P_{\text{Кзан}} \quad (31)$$

где  $Y$  заброс соответствующей траектории у зуба.

$\frac{A_1}{2f_1}$  - расстояние до зуба от медианной плоскости. Апертуре  $A_1 = 28$  мм соответствует функция флоке  $f_1 = 0,65$ .



Определим  $\rho_0$  допустимое для  $e^+$  и  $e^-$ , взяв запас  $K=0,9$  для разных скоростей заполнения. Размер пучка позитронов пропорционален затуханию за  $\theta$  циклов

$$\Delta Z \sim \exp\left(-\frac{\theta}{2,5f}\right)$$

$f$  — число циклов накопления в сек.

Для позитронов достаточное затухание будет лишь для частот 1 гц и 2 гц. При 2 гц скорость накопления близка к максимальной. Для электронов при накоплении в одну сепаратрису затухание, достаточное для захвата пучка будет при частоте 1 гц.

Допустимая величина остаточных колебаний накопленного пучка после двух ударов, увеличение которой позволяет захватить больше частиц, ограничивается областью хорошего поля, стабильностью и надежностью системы и "хвостами" распределения накопленного пучка. Для ориентировочных расчетов примем остаточные колебания пучка не более 50% апертуры. Колебания оси пучка при этом должны быть меньше на размер пучка. По траекториям находим забросы на фазовой плоскости  $Z, Z'$ . Все забросы можно отнести к одному сечению, например к точке  $O$  на выходе из инфлектора 1 для  $e^-$  и к точке 8 на выходе из инфлектора 2 для  $e^+$  (рис.8).

Остаточные колебания определяем из инварианта / 4 /, который можно записать:

$$\left(\frac{Z}{f}\right)^2 + (Z'f - f'Z)^2 = \left(\frac{A_1}{2f_1}\right)^2 \quad (32)$$

где  $f$  и  $f' = \frac{df}{d\varphi}$ ; ( $\varphi = 2\pi \frac{e}{\pi}$ ) модуль безразмерной функции Флоке и её производная.

Значения  $f$  и  $f'$  получены на вычислительной машине /1/. Наша переменная  $\theta = 19 \varphi$ .

Уравнение эллипса, определяющего допустимые колебания:

$$Z^2\left(\frac{1}{f^2} + f'^2\right) + (19f)^2 Z'^2 - 38ff'ZZ' = \left(\frac{A_1}{2f_1} \eta\right)^2 \quad (33)$$

$\eta$  — относительная амплитуда колебаний.

При  $\eta = 1$  эллипс представляет собой адмиттанс. Приведением эллипса к главным осям найдем  $\alpha$  — угол наклона оси эллипса к оси  $Z$  и его полуоси  $a$  и  $b$ :

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{38ff'}{(19f)^2 - f'^2 - \frac{1}{f^2}}; \quad a = \frac{f}{\cos 2\alpha} \frac{A_1}{2f_1}; \quad b = \frac{1}{19a} \quad (34)$$

Из уравнения (33) находим отношение ударов инфлекторов при заданном  $\eta$  и далее поле  $E$  инфлекторов по формуле (30а).

Размер акцептанса по  $Z$  (рис.9)

$$2\Delta Z = Y\rho_1 - d \quad (35)$$

$Y$  заброс траектории у впускного зуба,  $d$  — толщина ножа. Расстояние от центра впускаемого пучка до медианы:

$$Z_{en} = \frac{A}{2} + d + \Delta Z \quad (36)$$

угол впуска

$$Z'_{en} = Y'\rho_1 + (Z_{en} - Y\rho_1) \operatorname{tg} \alpha \quad (37)$$

Остаточные колебания центра впущенного пучка

$$Z_{ост} = Z_{en} - Y\rho_1, \quad Z'_{ост} = Z'_{en} - Y'\rho_1 \quad (38)$$

При наладке ускорителя может потребоваться впуск  $e^-$  на медианную плоскость по электронному и позитронному каналам.

Тогда

$$\rho_1 = \frac{Z_{en}}{Y} \quad (39)$$



Выпуск  $e^-$ . Энергия 3,75 Бэв. Перед выпуском орбита искажается так, чтобы пучок проходил вблизи выпускного зуба, на расстоянии эффективного размера ( $\sim 1,5$  мм).

Пучок отклоняется инфлектором  $2D$  вверх. Из соответствующей траектории получаем

$$\rho_0 = \frac{Z_0}{Y}, \quad Z' = \rho_0 Y'$$

где  $Z_0$  - заброс, угол выпуска получается отрицательным.

Накопление протонов без затухания бетатронных колебаний.

$E_{кин} = 125$  Мэв,  $\rho = 500 \frac{\text{Мэв}}{c}$ ,  $2\Delta Z = 1$  см. Впуск по электронному каналу инфлектором  $1F$

1. Впуск на медианную плоскость. Находим заброс  $Z_{\text{вн}}$  по формуле (36) и  $\rho$  по формуле (39).

2. Используя оба инфлектора  $1F$  и  $2D$  и изменив напряжения, можно впустить еще по одному сгустку без затухания колебаний с остаточными колебаниями пучка  $\sim 0,66$ .

Выпуск протонов с импульсом  $\rho = 3,75 \frac{\text{Бэв}}{c}$  считается аналогично. Размер пучка с учетом адиабатического затухания  $\sim 5,2$  мм. Перед выпуском пучок подводится к выпускному зубу.

Другой вариант выпуска электронов и протонов, требующий меньших напряжений изложен дальше. Результаты расчета сведены в таблицу III.

Таблица III. Параметры системы впуска, накопления и выпуска части ВЭПП-3

	Впуск 500 Мэв $e^-$	Впуск $e^-$ на медиану		Впуск $e^+$ 250 Мэв			Впуск $p^+$ 125 Мэв		Вып. $e^-$ 3,75 Бэв	Вып. $p^+$ 3,75 Бэв
		Эл. кан. 500 Мэв	поз. кан. 250 Мэв	1 гц	2 гц	3 гц	На мед. му	По второму разу		
$\rho_0$ (мм)	3,15			3,65	3	2,55		2,3	1,16	1,9
Ост. кол. оски накопл. пучка	35%	0	0	50%	34%	20%		66%		
$\rho_1$ (мм)	2,15	4,3	2,3	2,45	1,9	1,5	4,7	2,8		
$2\Delta Z$ (мм)	5,5	5,5	5,5	19	14	11	10	8	3	5,1
Акцептанс				60%	50%	35%				
Заброс $Z_{\text{вн}}$ (мм)	14,3	14,3	20	25,5	24	22,5	16,3	15,3	5	8,3
Угол выпуска (вып.) мрад.	10	11	-9	-11,2	-10,2	-9,5	12,8	10,8	-2,4	-3,5
$E$ (кв.) (см)	13,8	27,7		11,7	9,7	8,2	38,5	23		
Зазор инфлектора (мм)	20,2	7,5		7,9	6	4,8		18,8	56	90
$u$ кв	27			21					27	
	27			37						
	+18	+36		+12	+10	+8,5	+50	+30		
	+27	+14		+14,5	+11	+9		+25,5	+75	+125

х) Колебания края пучка 60%.



Схема питания инфлекторов

Для надежности накопления лучше питать оба инфлектора одним генератором.

При последовательном соединении инфлекторов высоко-вольтовый импульс отстанет от пучка, поэтому инфлекторы должны питаться параллельно.

Если за  $t=0$  принять приход импульса к дефлектору Б-4, то задержка прихода импульса к электронному инфлектору  $1F$  (точка 0, рис.6) равна

$$\frac{L_k^{e^-} + 3,2 \text{ м}}{c} \quad (40)$$

где  $L_k^{e^-}$  длина электронного канала от выпускного зуба Б-4 до впускного зуба ВЭПП-3. (м)

Приход импульса к инфлектору  $2D$  (точка 7) для отклонения накопленного электронного пучка

$$\frac{L_k^{e^-} - 4,3}{c} \quad (41)$$

Приход импульса к позитронному инфлектору  $2F$  (точка 7)

$$\frac{L_k^{e^+} + 5,8}{c} \quad (42)$$

к инфлектору  $1D$  (точка 2)

$$\frac{L_k^{e^+} - 0,5}{c} \quad (43)$$

$L_k^{e^+}$  длина позитронного канала. (м)

Принципиальная схема коммутации пучков комплекса Б-4 - ВЭПП-3 приведена на рис.10.

Максимальные волновые сопротивления инфлекторов, ограниченные размерами камеры, при наибольшей области однородного поля указаны в таблице 1У. Обозначения см.рис.10.

Таблица 1У

	$1F_2$	$1D_2$	$2F_2$	$2D_2$
Зазор (мм)	27	21	37	27
Волновое сопр. (ом)	35	35	50	50
Ширина $2l$ (мм)	45	45	30	33
Зазор $\delta$ мм	5	7 мм	6	9
$f_x$	44 мм	54	39	50
Область однородн. поля	~ 30	~ 37	~ 16	~ 22

Другие варианты

Рассматривались также другие способы расположения электронных и позитронных инфлекторов в линзах.

Основной вариант выбран по максимуму захвата позитронов, однако другие варианты имеют некоторые преимущества.

Варианты с отклонением накопленного электронного пучка в линзе  $2F$ , требуют меньшего  $\sim$  в 1,5 раза напряжения для выпуска электронов и протонов. Для накопления и выпуска только электронов (или протонов) можно соединить последовательно инфлекторы  $2F$  и  $2D$ , что резко уменьшает напряжение, необходимое для выпуска.

Вариант с обоими инфлекторами в две линзы (длина 120см) тоже требует невысоких напряжений, но отличается сложностью



схемы, необходимостью введения специальных высоковольтных согласованных коммутаторов, сложностью настройки при переходе с накопления позитронов к накоплению электронов. Параметры этих вариантов сведены в таблицу У.

Обозначения:  $F_0 : D_0 : F_0 D_0$  - означает отклонение накопленного пучка инфлектором, помещённым в линзе  $F_2, D_2, F_2 D_2$  соответственно.

$F, D, FD$  - отклонение впущенного пучка вместе с накопленным.

$Y$  у вл.зуба определяет допустимое отклонение накопленного пучка (31)  $Y$  для захвата определяет  $2\Delta Z$  по ф-ле (35).

Таблица У.

	Исходн. $Z$	Впуск $2F_0 D_0$ 500 МэВ		Выпуск $D_0 - IF$		$F_0 D_0 - FD$		$F_0 D_0 - FD$		$F_0 D_0 - FD$		$F_0 - F$		$D_0 - D$	
		БэВ	$e^-$	БэВ	$p^+$	1гц	2гц	1гц	2гц	1гц	2гц	1гц	2гц	1гц	2гц
$Y$ у вл.зуба		14,5	14,5	14,5	14,5	10,24	12,93	12,93	10,24	6,51	4,32	6,51	4,32		
$\rho_0$ мм		0,94	0,35	0,51		1,33	1,05	1,05	1,33	2,09	3,15	2,09	3,15		
ОСТ колеб.оси как пучка		30%				50%	10%	10%	50%	34%	10%	34%	10%		
$\rho_1$ мм		2,15				1,49	1,47	1,47	1,49	2,17	4,25	2,17	4,25		
$Y$ для захвата		3,48				12,9	5,25	5,25	12,9	8,61	1,76	8,61	1,76		
$2\Delta Z$ мм		5,5	3	5,1		17,2	5,5	5,5	17,2	16,7	5,5	16,7	5,5		
Акцептанс						57%	40%	40%	57%	40%		55%	40%		
Заброс		14,3	5	8,3		4,3	9,5	9,5	4,3	6,7	27,3	6,7	27,3		
$E$ (кВ) см	1	13,8				4,8	6,75	6,75	4,8	7	20	7	20		
	2	6				26	26	26	26	26	21	26	21		
Зазор мм	1	26				37	37	37	37	37	27	37	27		
	2	+18				+5,6	+12,5	+12,5	+5,6	+8,7	+29	+8,7	+29		
$u$ (кВ)	1	+11,2	+30	+50		+9	+12	+12	+9	+13	+27	+13	+27		
	2														



Таблица V (продолжение)

	№	$\rho^+$ $D_i - D$		$\rho^-$ $F_0 - F$	$\rho^+$ $F_i - D$		$\rho^-$ $F_0 - D$
		1 гц	2 гц		1 гц	2 гц	
$Y$ у вл.зуба		3,73		8,61	6,51	8,61	
$\rho_c$ мм		3,65	3	1,58	2,09	1,58	
ОСТ колеб.оси как пучка		50%	34%	10%	50%	34%	30%
$\rho$ мм		4,45	3,42	2,16	3,5	2,55	4,26
$Y$ для захвата		4,32		2,48	4,32	1,76	
$2\Delta Z$ мм		17,2	12,7	5,5	13,1	9	5,5
Акцептанс Заброс		57%	40%		44%	30%	
$E$ (кв) см	1	11,7	9,7	14	6,7	5,5	27,3
	2	14,4	11	10	11,3	8,2	10
Зазор мм	1	21		26	26	21	
	2	27		37	27	37	
	1	+12,3	+10,1	+18,5	+8,7	+7,2	+29
$U$ (кв)	2	+19,5	+15	+18,5	+15,3	+11,1	+18,5

## Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер и др. Доклад на Седьмой международной конференции по ускорителям, Ереван, 1969 г.
2. А.В.Киселёв. Доклады Всесоюзного совещания по ускорителям со встречными пучками, часть 1, 121. Новосибирск, 1963 г.
3. А.В.Киселёв. Диссертация. Новосибирск, 1965 г.
4. Ускорители под ред.Яблокова, стр.435.



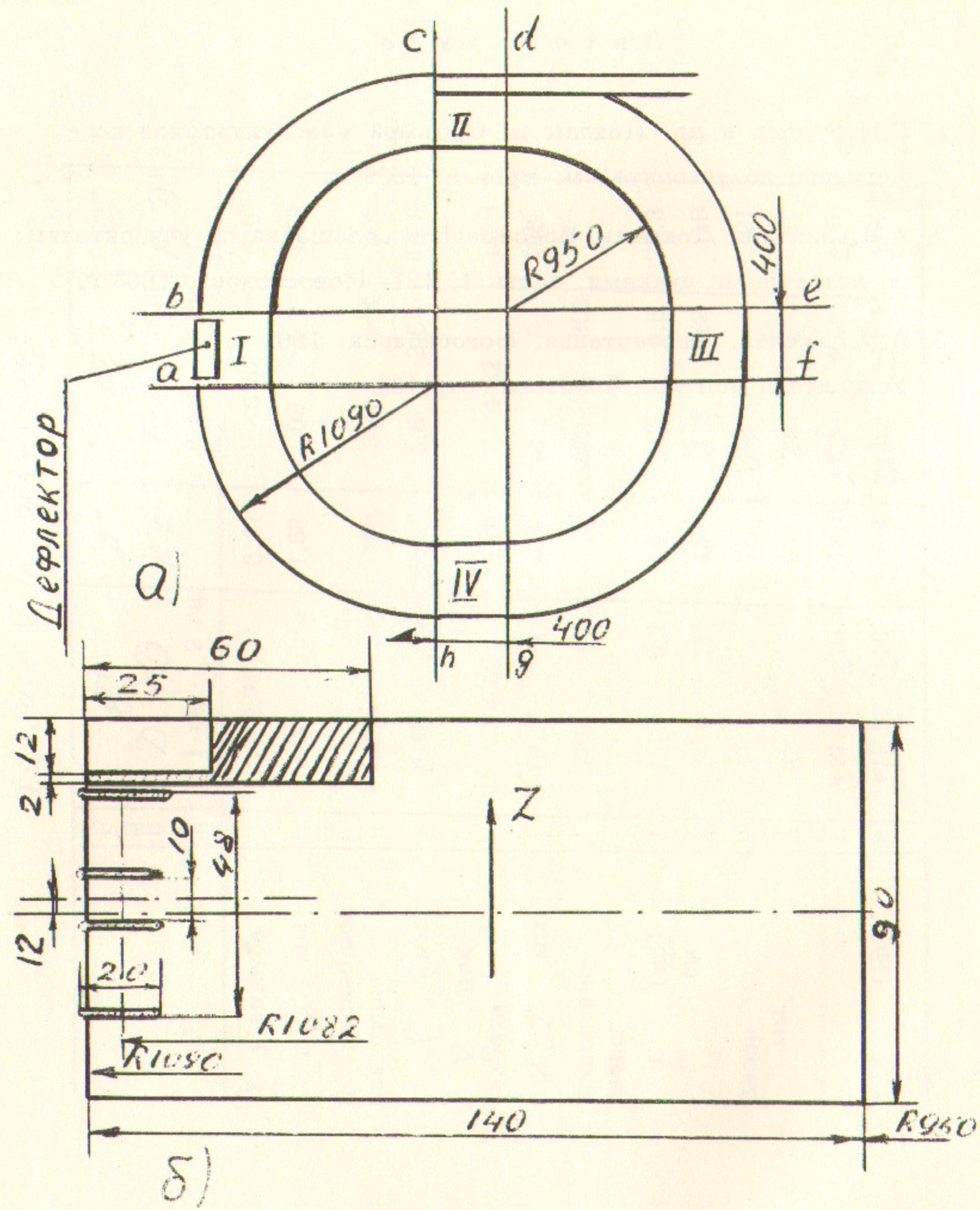


Рис.1. Вакуумная дорожка Б-4  
 а) план; б) поперечное сечение  
 промежутка с дефлектором.

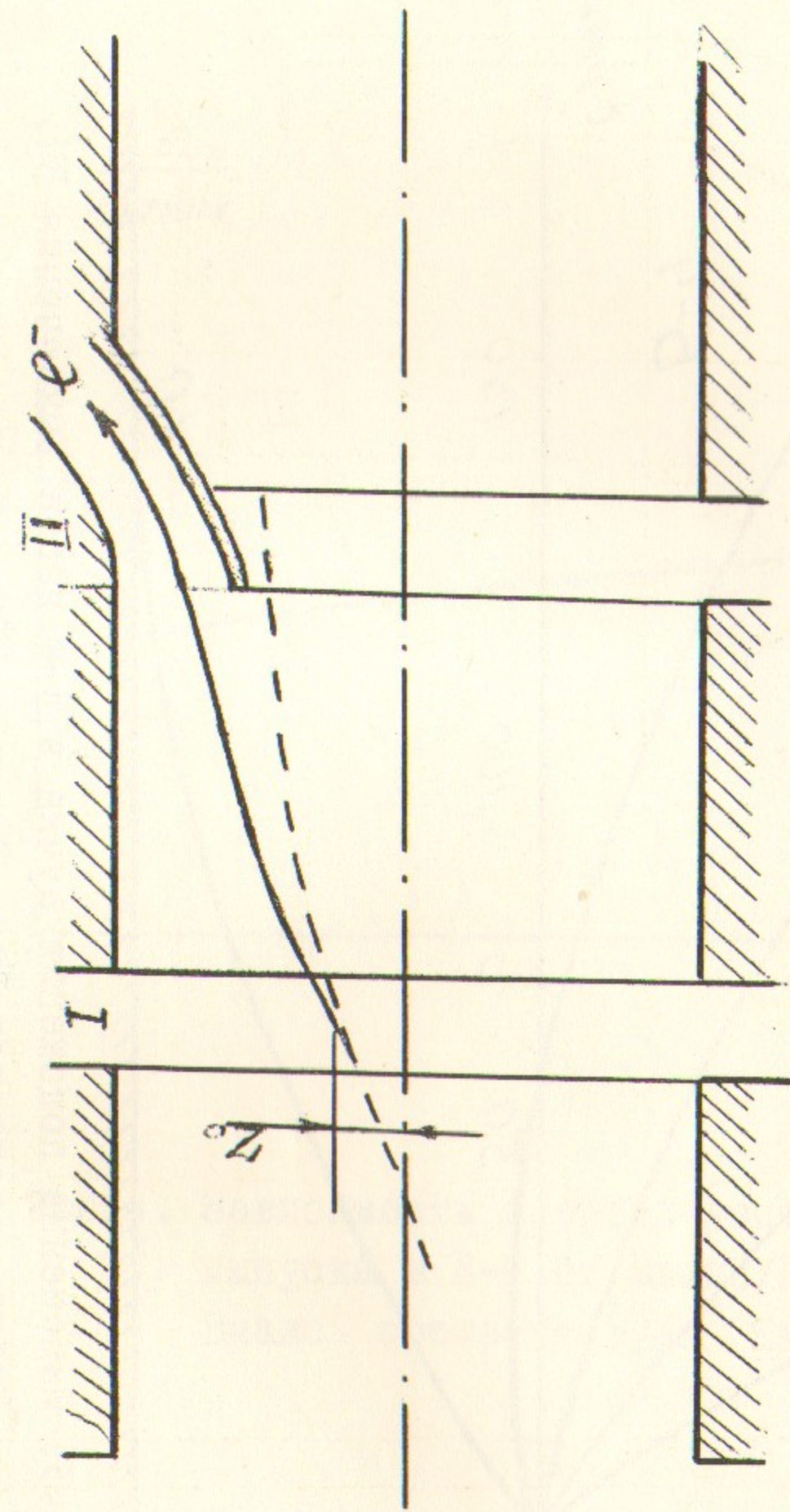


Рис.2. Положение равновесной орбиты в Б-4 перед выпуском  
 (пунктирная линия) и траектория равновесной ча-  
 стицы после удара дефлектора.



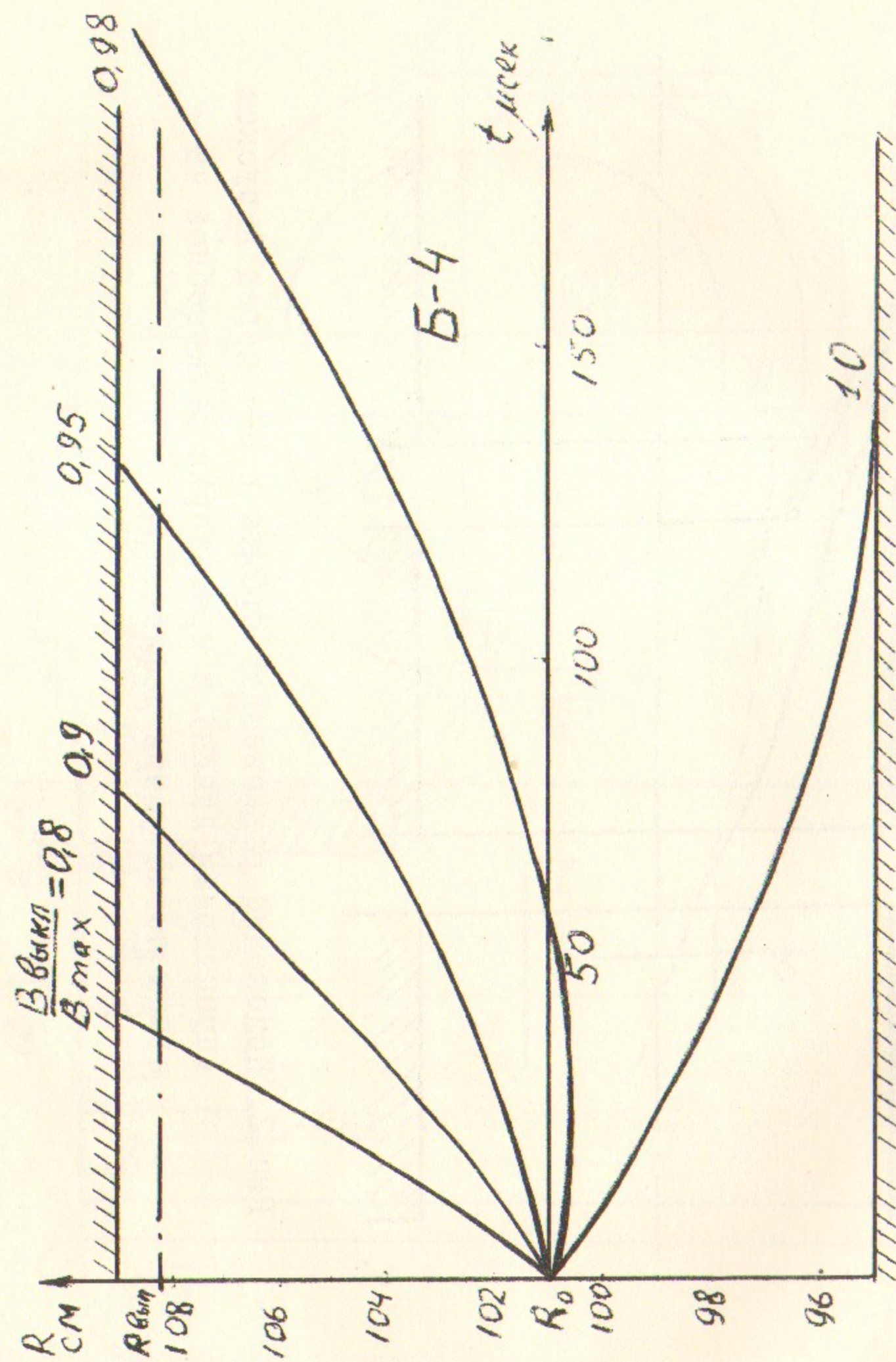


Рис.3. Изменение положения пучка в Б-4 после выключения ВЧ.  $V_{\text{макс}}$  соответствует  $E_{\text{макс}} = 500$  МэВ.

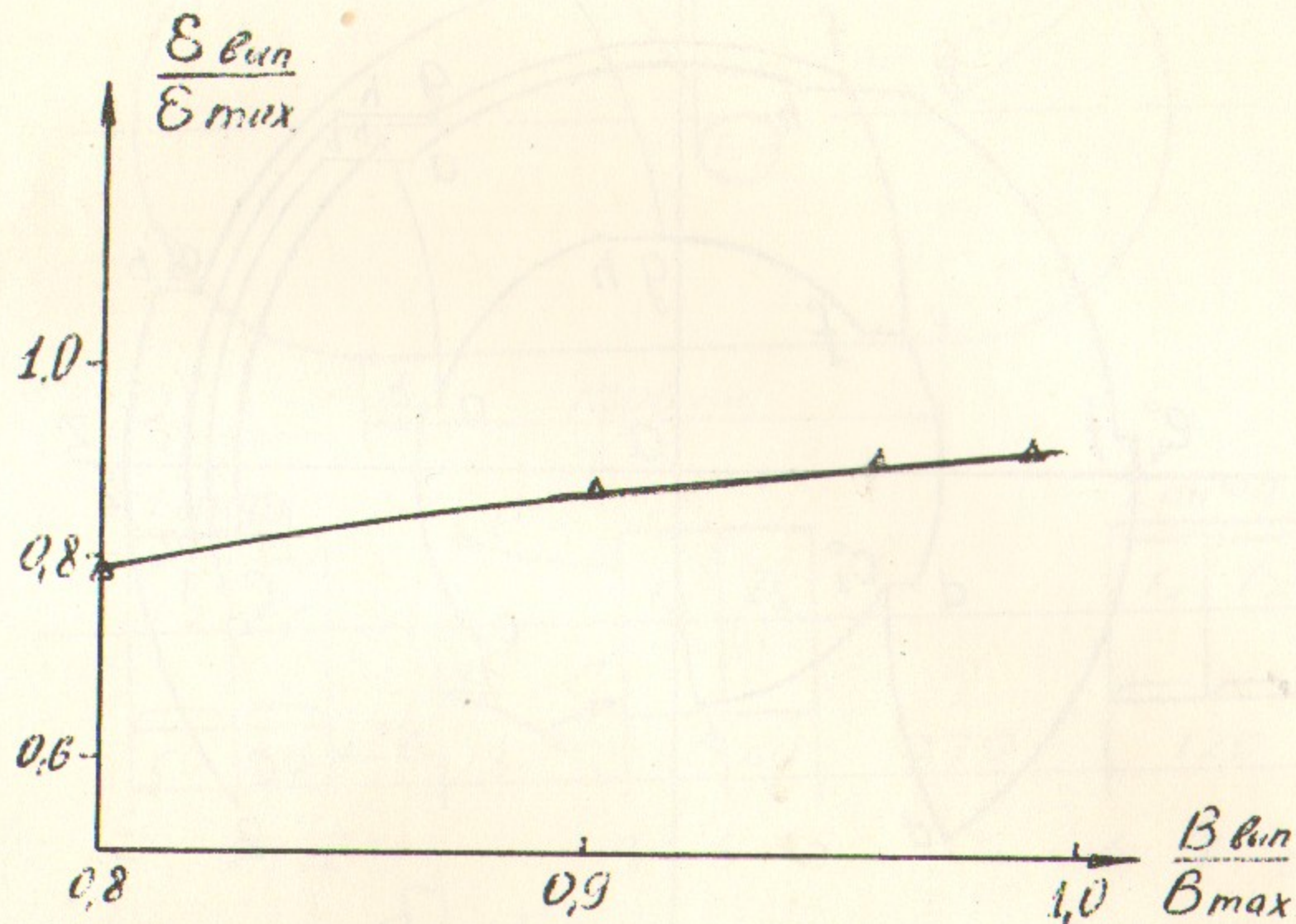


Рис.4. Зависимость энергии частиц на орбите выпуска в Б-4 от  $V_{\text{выкл}}/V_{\text{макс}}$ , когда  $V_{\text{макс}}$  соответствует  $E_{\text{макс}} = 500$  МэВ.



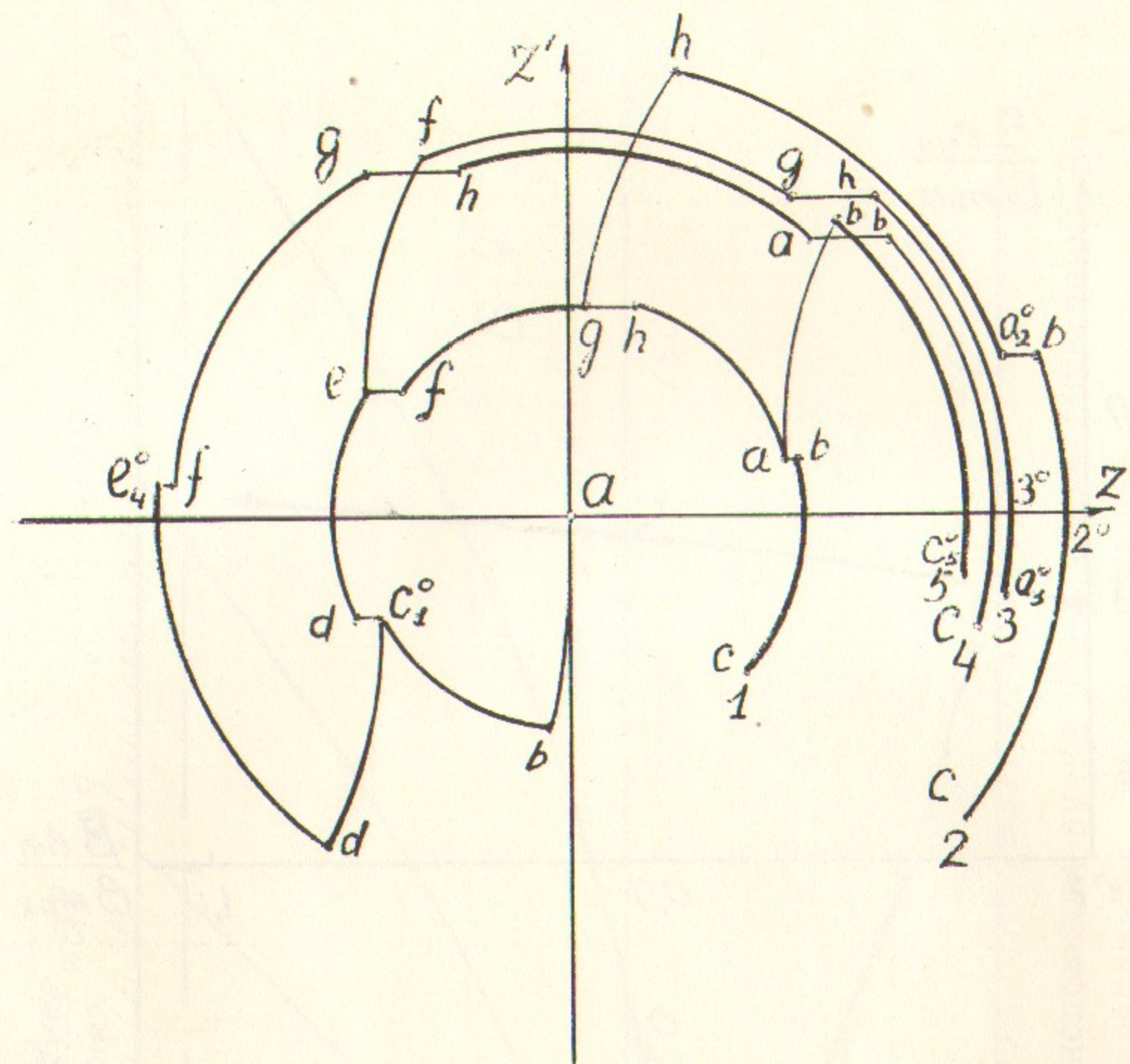


Рис.5. Траектории равновесной частицы на фазовой плоскости Б-4 после удара дефлектора (или двух дефлекторов) для разных вариантов выпуска.

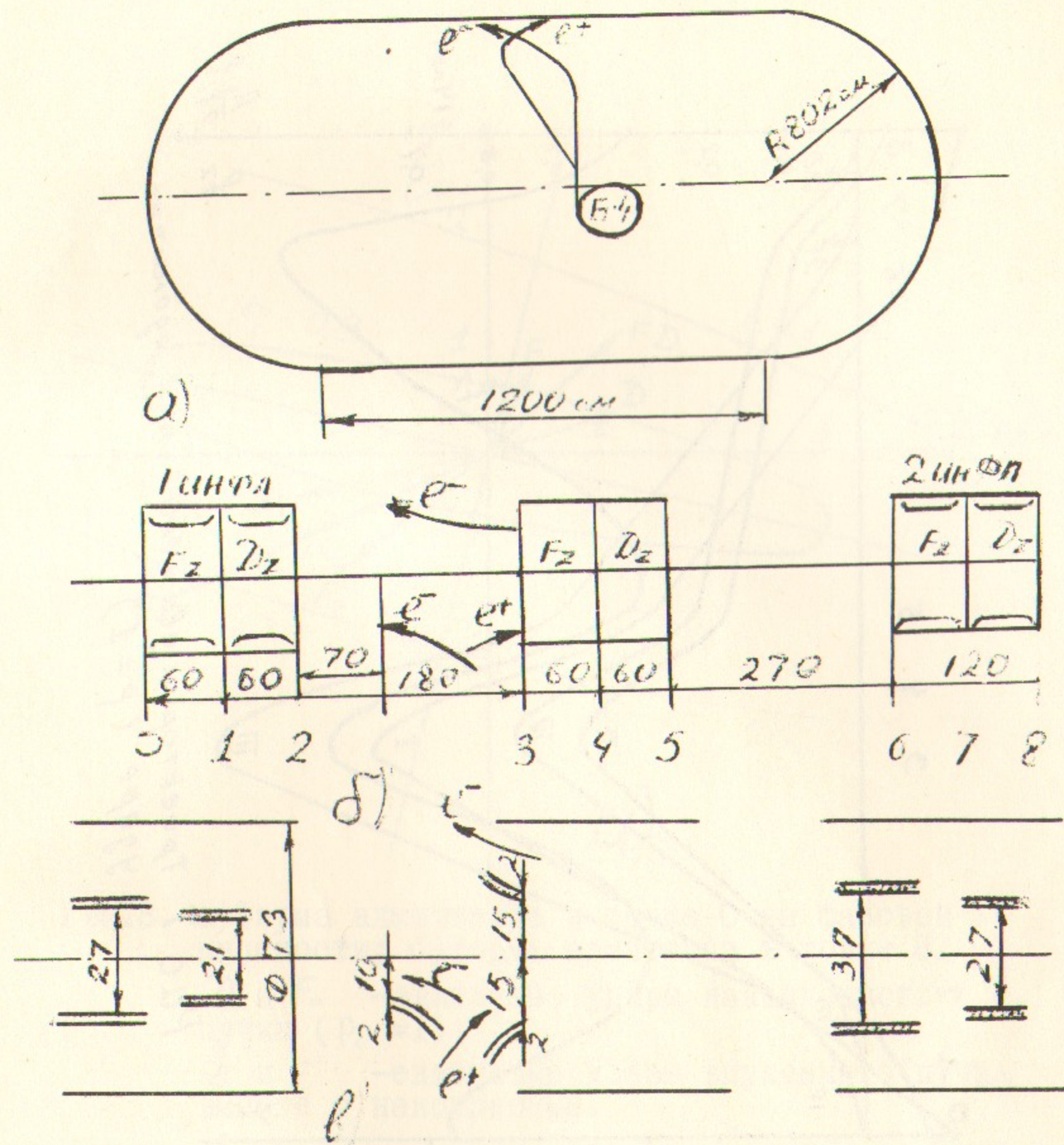


Рис.6. а) Общий вид ВЭП-3; б) прямоугольный проементок; в) расположение впускных, выпускных зубьев и инфлекторов относительно медианной плоскости.



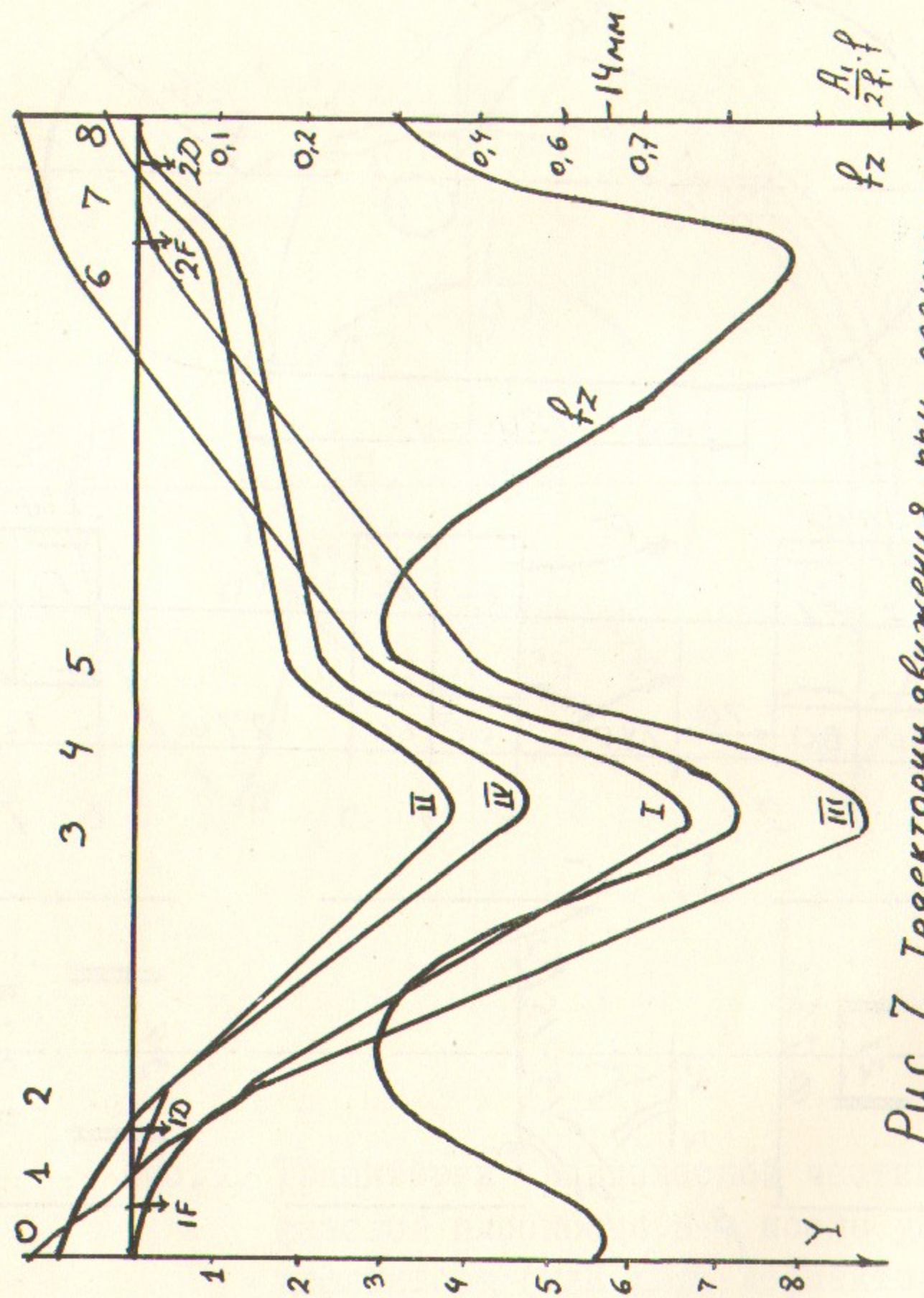


Рис. 7. Траектории движения при единичном ударе ( $\rho=1$ )

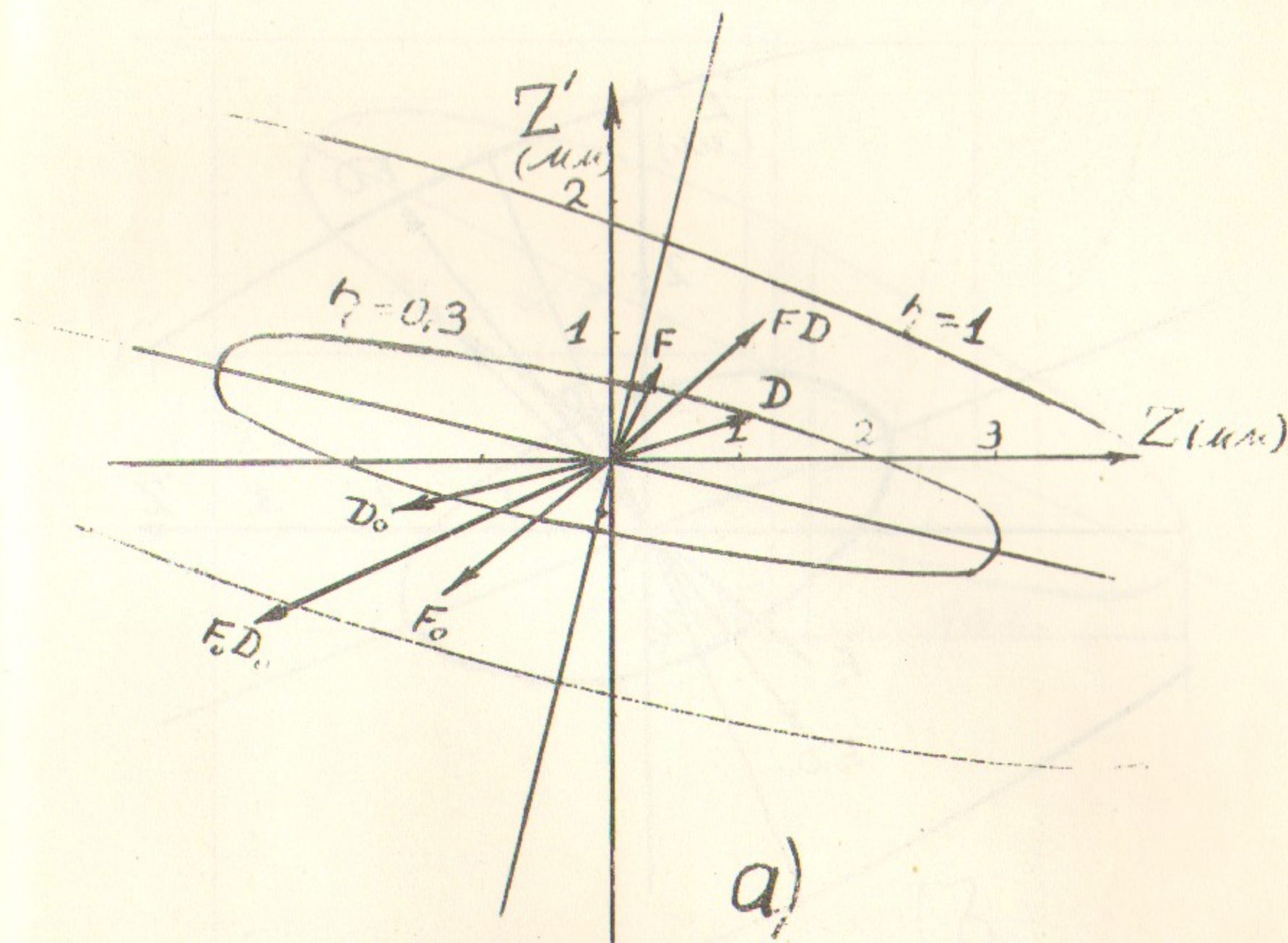


Рис. 8. а) Форма адмиттанса в точке 0 на фазовой плоскости; б) форма адмиттанса в точке 8.  
 $D_0$  и  $F_0$  - единичные удары накопленного пучка ( $\rho_c = 1$ );  
 $D$  и  $F$  - единичные удары впущенного пучка вместе с накопленным.



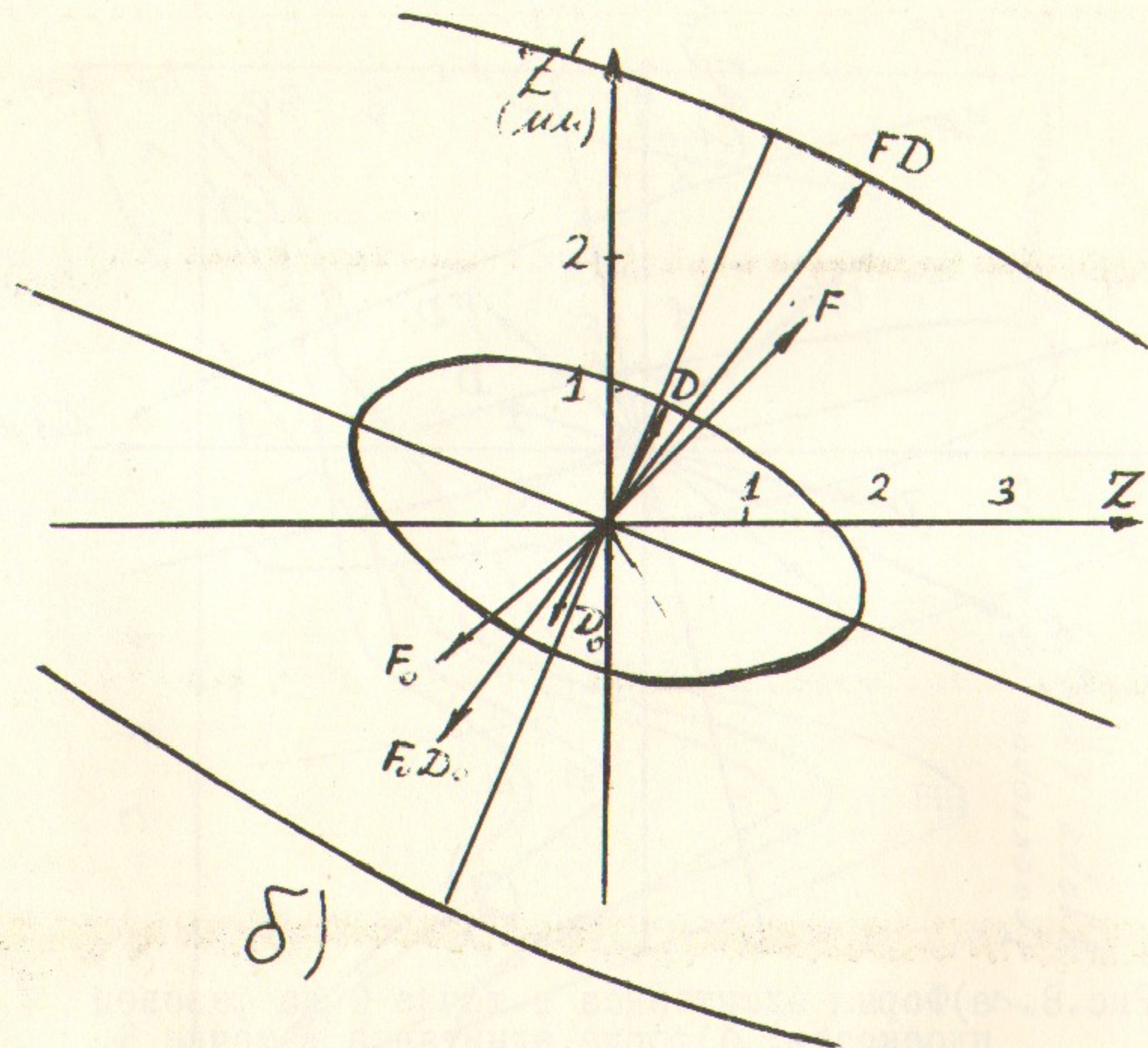


Рис.86. Форма адмиттанса в точке 8.  
 $D_0$  и  $F_0$  -единичные удары накопленного пучка ( $\rho_0 = 1$ ).  
 $D$  и  $F$  -единичные удары впущенного пучка вместе с накопленным.

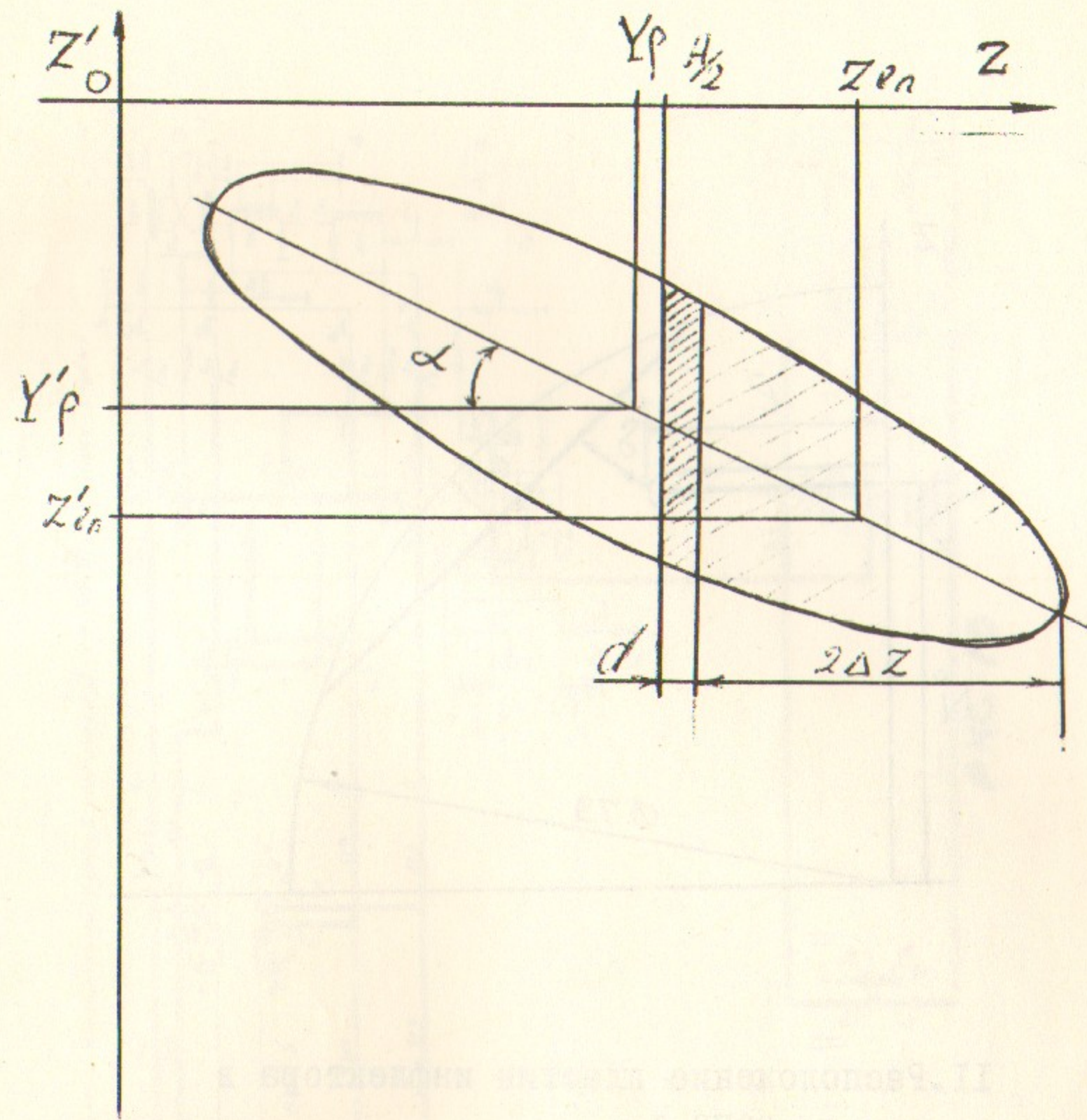
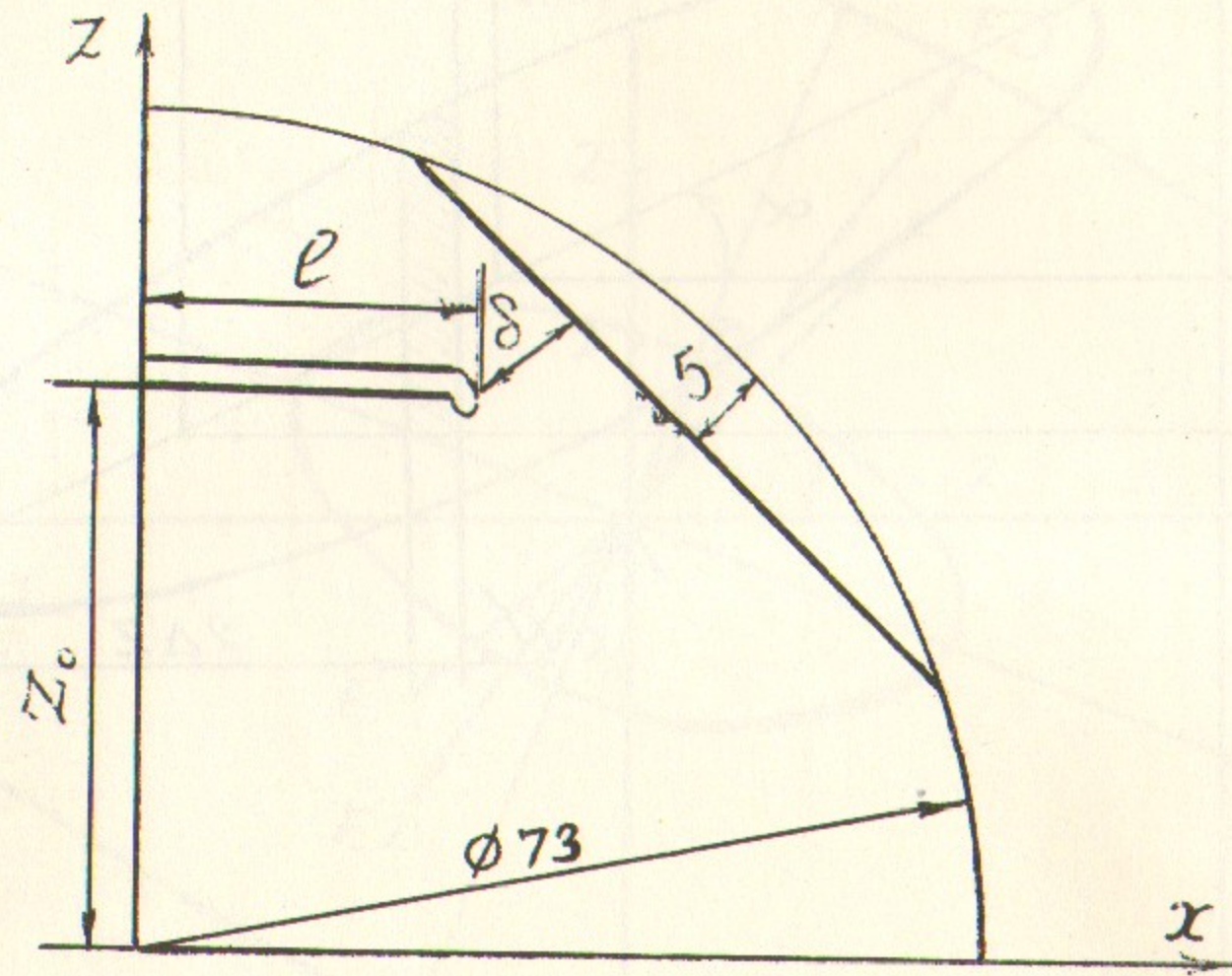
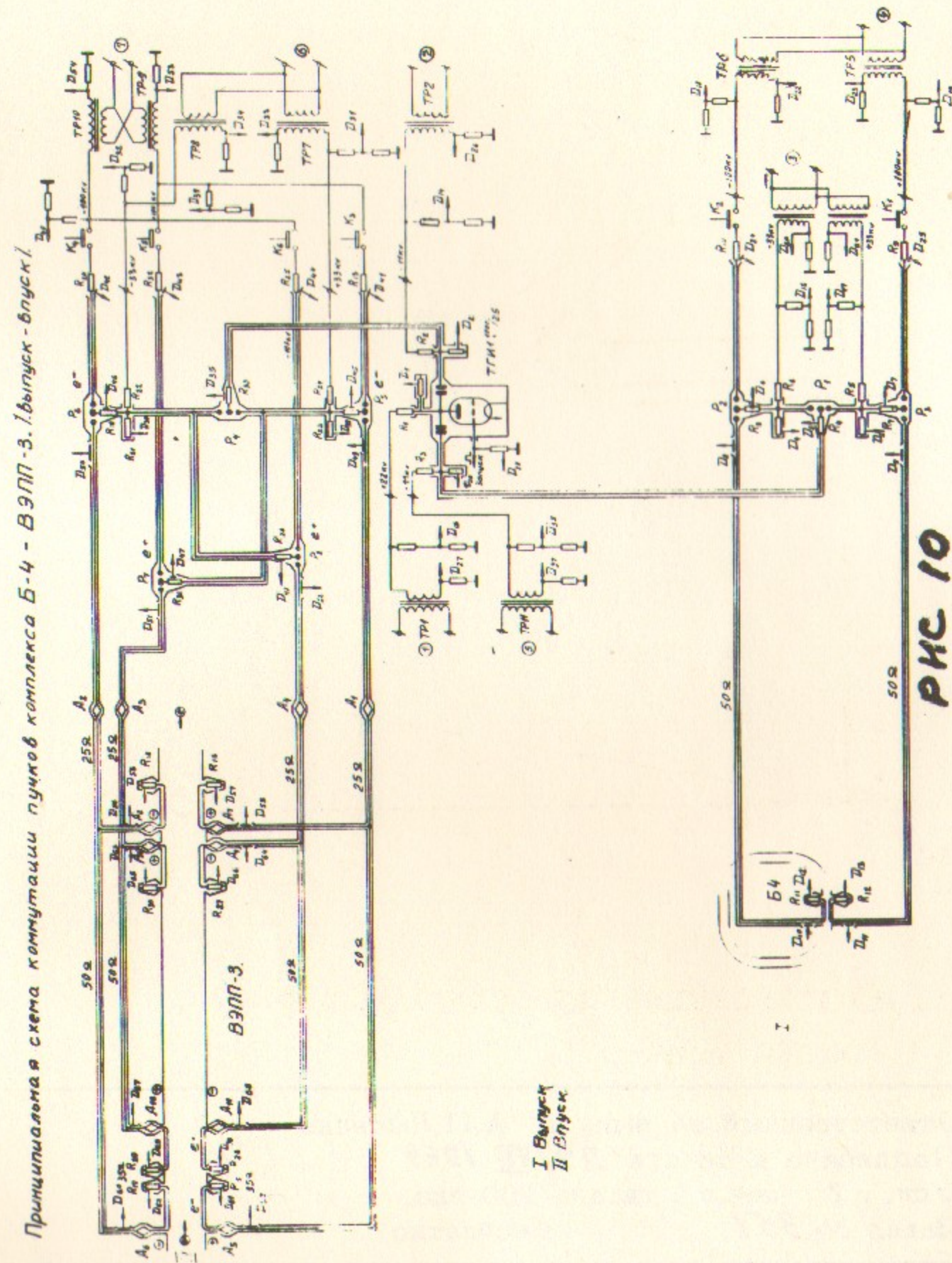


Рис.9. Положение и форма акцептанса на фазовой плоскости у впускного зуба.  
 $Z'_{en}$  и  $Z'_{en}$  заброс и угол впуска пучка.  $2\Delta Z$  размер пучка у впускного зуба.  
 $H/2$  -половина апертуры,  $d$  -толщине впускного ножа.





II. Расположение пластин инфлектора в камере ВЭПП-3.





---

Ответственный за выпуск А.П.Лысенко  
Подписано к печати 22/ХІІ 1969  
Усл. / 8 печ.л., тираж 200 экз.  
Заказ № 351 Бесплатно

---

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР.