

63 2325 7a
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

РАБОЧИЕ МАТЕРИАЛЫ

НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО БЭП

ПРЕПРИНТ 83-98



НОВОСИБИРСК

Содержание

	стр.
Введение	3
Сверхпроводящая "змейка" на ВЭПП-2М	5
I. Фокусирующая структура накопителя	10
II. Размещение накопителя	14
III. Параметры пучков	17
IV. Каналы	22
V. Основные элементы магнитной системы	26
VI. Инжекция и выпуск	33
VII. Система коррекций	37
VIII. Вакуумная система	39
IX. Меры по борьбе с когерентными неустойчивостями	43
X. Диагностика пучка	47
XI. ВЧ-система БЭП	48
XII. Моделирование движения частиц в накопителе	50
XIII. Новый этап автоматизации комплекса ВЭПП-2М	53

Введение

На комплексе ВЭПП-2М предполагается произвести замену проработавшего почти два десятилетия накопителя ВЭПП-2 на жестко-фокусирующее кольцо БЭП (Бустер Электрон-Позитронный) с максимальной энергией пучков 700+900 МэВ.

Новое кольцо будет служить инжектором позитронов и электронов для ВЭПП-2М. Скорость накопления позитронов в БЭП должна быть в 3+5 раз выше чем в ВЭПП-2. Выигрыш достигается за счет увеличения принимаемого магнитной системой энергетического разброса позитронов. В будущем с переходом от инъекции из синхротрона Б-3М ($E_p = 250$ МэВ) на инъекцию из секции линейного ускорителя проекта ВЛЭПП ($E_p = 1$ ГэВ) скорость накопления позитронов возрастет примерно на два порядка. Намечаемая реконструкция электронно-оптических каналов позволит вести эксперименты в ВЭПП-2М в режиме почти непрерывной подпитки пучками на любой энергии вплоть до 700 МэВ (в настоящее время максимальная энергия перепуска 550 МэВ), что позволит выйти на уровень светимости $5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Параллельно с повышением эффективности и надежности комплекса ВЭПП-2М сооружение БЭП-а преследует также вторую цель, а именно: отработку методики получения интенсивных пучков электронов, пригодных для инъекции во ВЛЭПП. В этом смысле БЭП является моделью инжектора во ВЛЭПП и его название можно расшифровывать как Большой Электронный Пучок.

Достаточно высокая жесткость магнитной системы БЭП-а в сочетании с сильным радиационным затуханием позволяют получить очень плотные пучки с нужными для проекта ВЛЭПП интенсивностью и поперечными размерами.

Данные рабочие материалы отражают текущее состояние проекта накопителя БЭП. Для полноты картины сюда же включена краткая информация по сверхпроводящей змейке на накопителе ВЭПП-2М, установка которой на кольцо планируется на конец 1983 года.

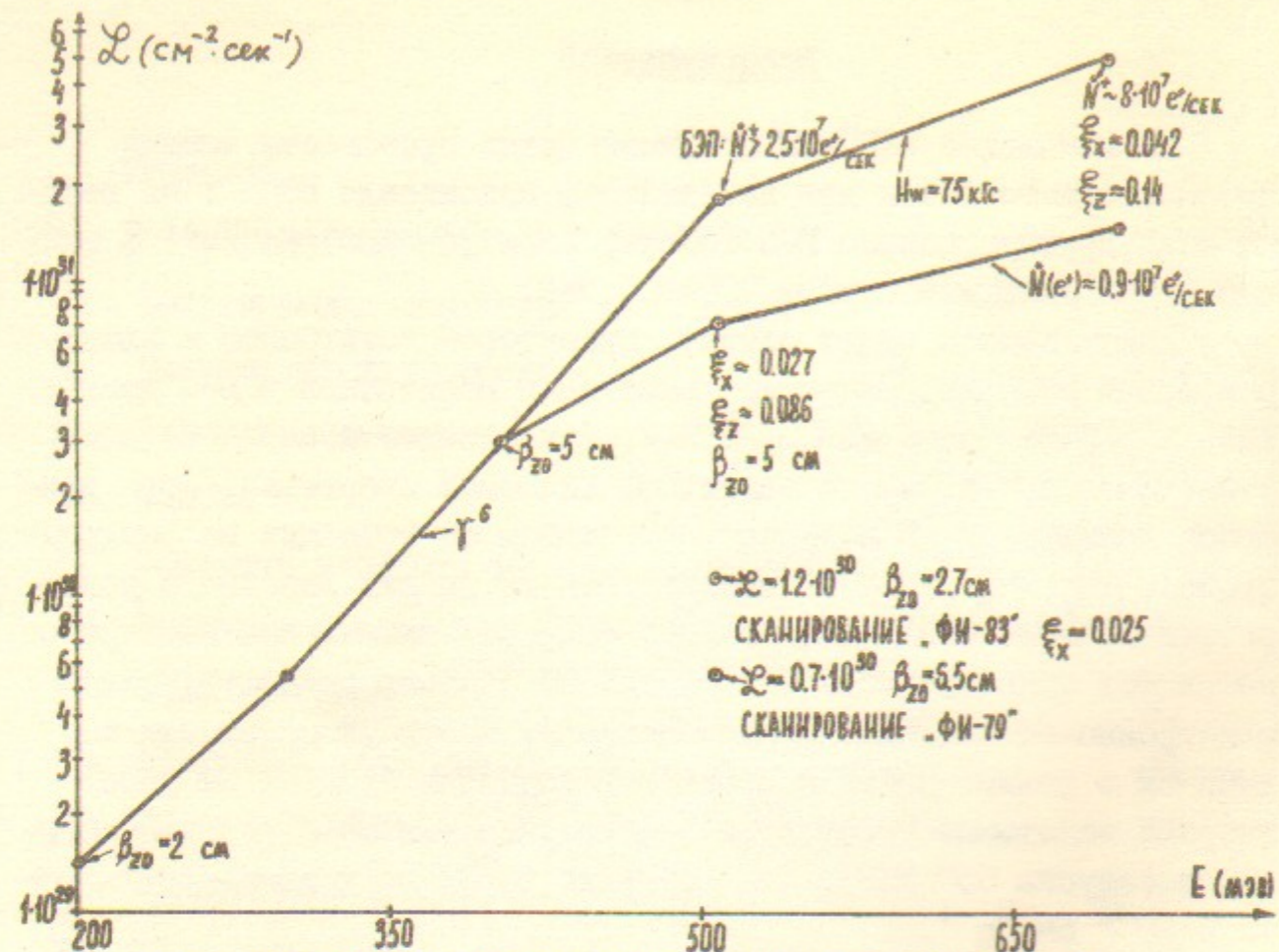


Рис.1. Проектная светимость накопителя ВЭПП-2М со змейкой.

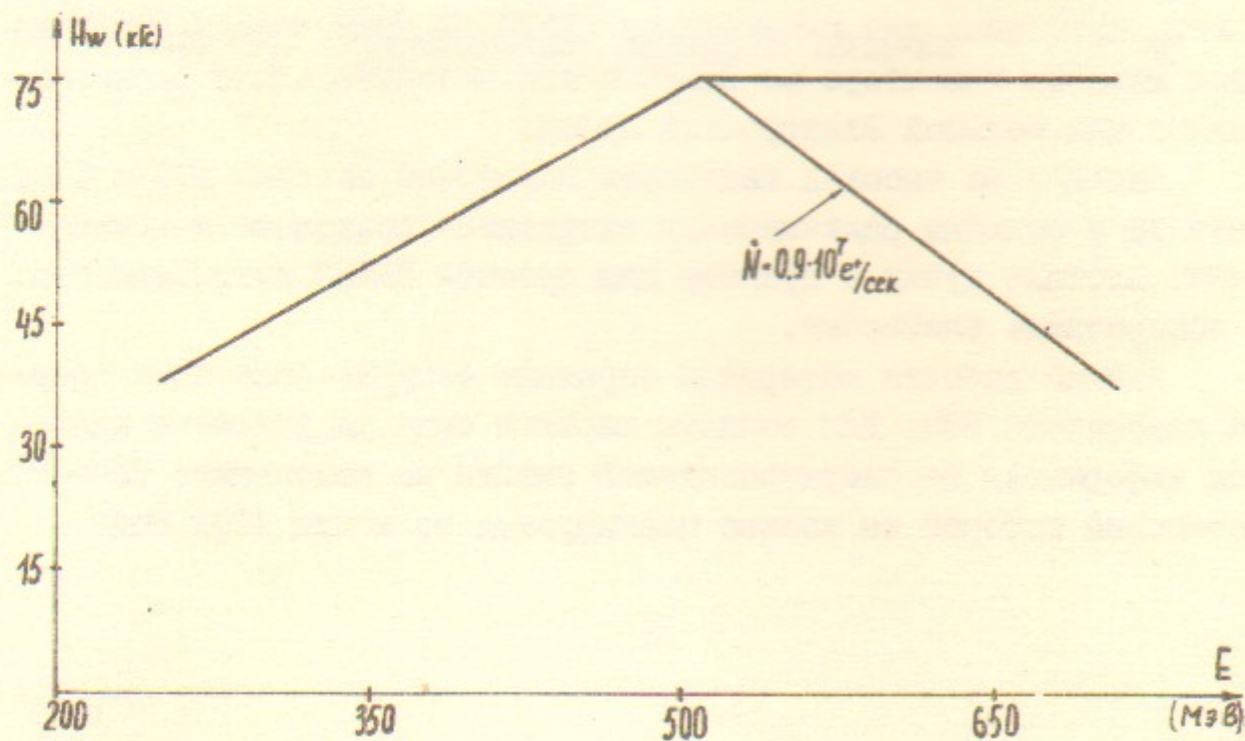


Рис.2. Закон изменения поля змейки с энергией.

Змейка увеличивает светимость ВЭПП-2М почти на порядок. Выигрыш в светимости достигается в основном за счет увеличения радиального фазового объема пучков, равного примерно отношению полей в змейке и в основных магнитах накопителя. Небольшое увеличение светимости (в 1,7 раза) связано также с ростом радиационного затухания и соответствующим ослаблением эффектов встречи. На низких энергиях (около 200 МэВ) размеры пучков определяются эффектом Тушека и весь выигрыш в светимости достигается только за счет увеличения декрементов радиационного затухания. На рис.1,2 приведены расчетные кривые для светимости и закона изменения поля в змейке. Нижние ветви этих кривых соответствуют существующему в настоящее время ограничению по скорости накопления позитронов. Ввод в эксплуатацию БЭП позволит получить дополнительный выигрыш в светимости на больших энергиях.

Общий вид змейки и поперечное сечение одного магнита показаны на рис.3,4. Основные проектные параметры "змейки" приведены в таблице I. На рис.5,6 показаны угловые распределения спектров СИ для энергий 510 и 650 МэВ.

В настоящее время проведено испытание экспериментального образца полюса змейки. После 30 циклов тренировки достигнуто поле 66.2 кГц. В режиме включения только внутренней или только внешней секции получено поле 57.4 кГц, при этом ток в обмотке составил 88% от предельного тока короткого образца. После некоторой доработки полюса испытания будут продолжены.

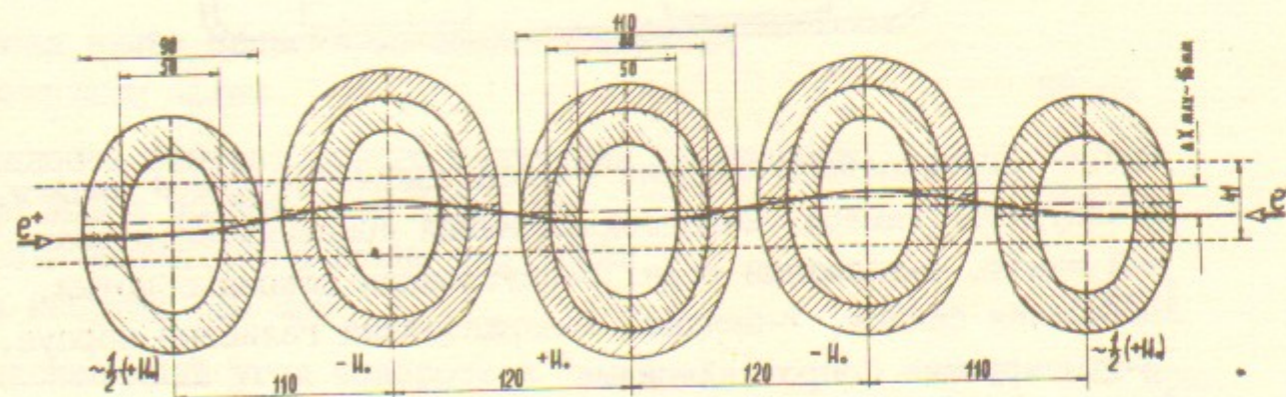


Рис.3 Геометрия расположения полюсов сверхпроводящей змейки. Орбита дана для E=510 МэВ и H=70 кГц.

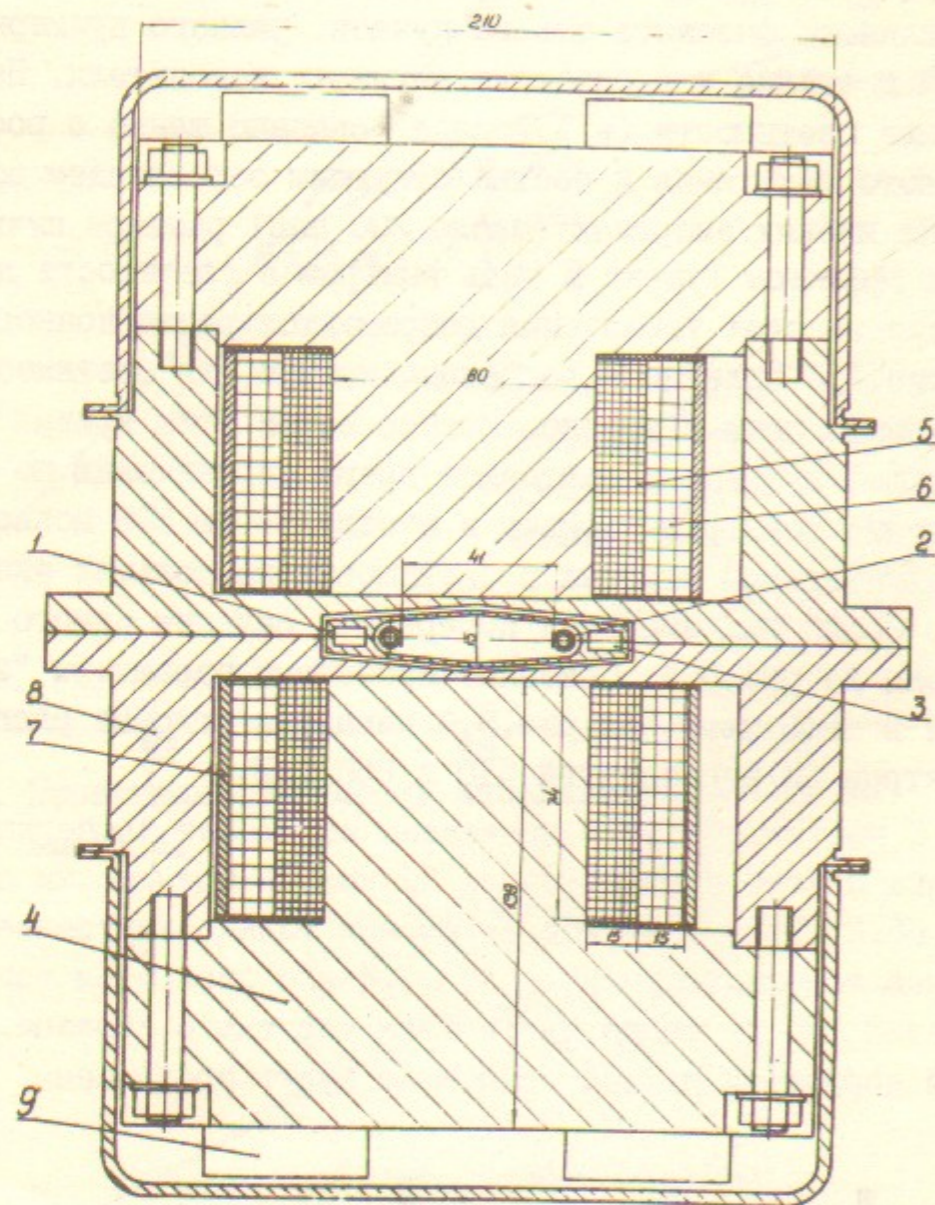


Рис.4 Вертикальное сечение полюса сверхпроводящей змейки. 1-вакуумная камера, 2-водоохлаждаемый приёмник СИ, 3-азотный канал, 4-железный kern, 5-внутренняя секция обмотки, 6-внешняя секция, 7-бандаж, 8-нержавеющий гелиевый корпус. 9-шунтирующие сопротивления.

Таблица I

Проектные параметры сверхпроводящей "змейки" на ВЭПП-2М

Максимальное магнитное поле на оси пучка	75 кГс
Количество СИ-дипольных магнитов	5
Длина одного СИ-дипольного магнита	12 см.
Высота обмотки полюса	7,4 см.
Количество секций обмотки полюса	2
Количество витков в одной секции	1800
Диаметр кабеля	0,7 мм
Рабочий ток во внутренней секции	100 А
Рабочий ток во внешней секции	240 А
Максимальный запас энергии в "змейке"	200 кДж
Зазор между полюсами дипольных магнитов	2,6 см
Вертикальная апертура вакуумной камеры внутри "змейки"	1,5 см
Радиальная апертура вакуумной камеры внутри "змейки"	4,2 см
Общая длина области со знакопеременным магнитным полем	58 см
Мощность синхротронного излучения на энергии 510 МэВ и полном токе 2×100 мА	787 Вт
Критическая длина волны излучения на энергии 510 МэВ	9,55 Å
Максимальный угол поворота в "змейке"	168 мрад
Максимальное радиальное отклонение орбиты	1,6 см

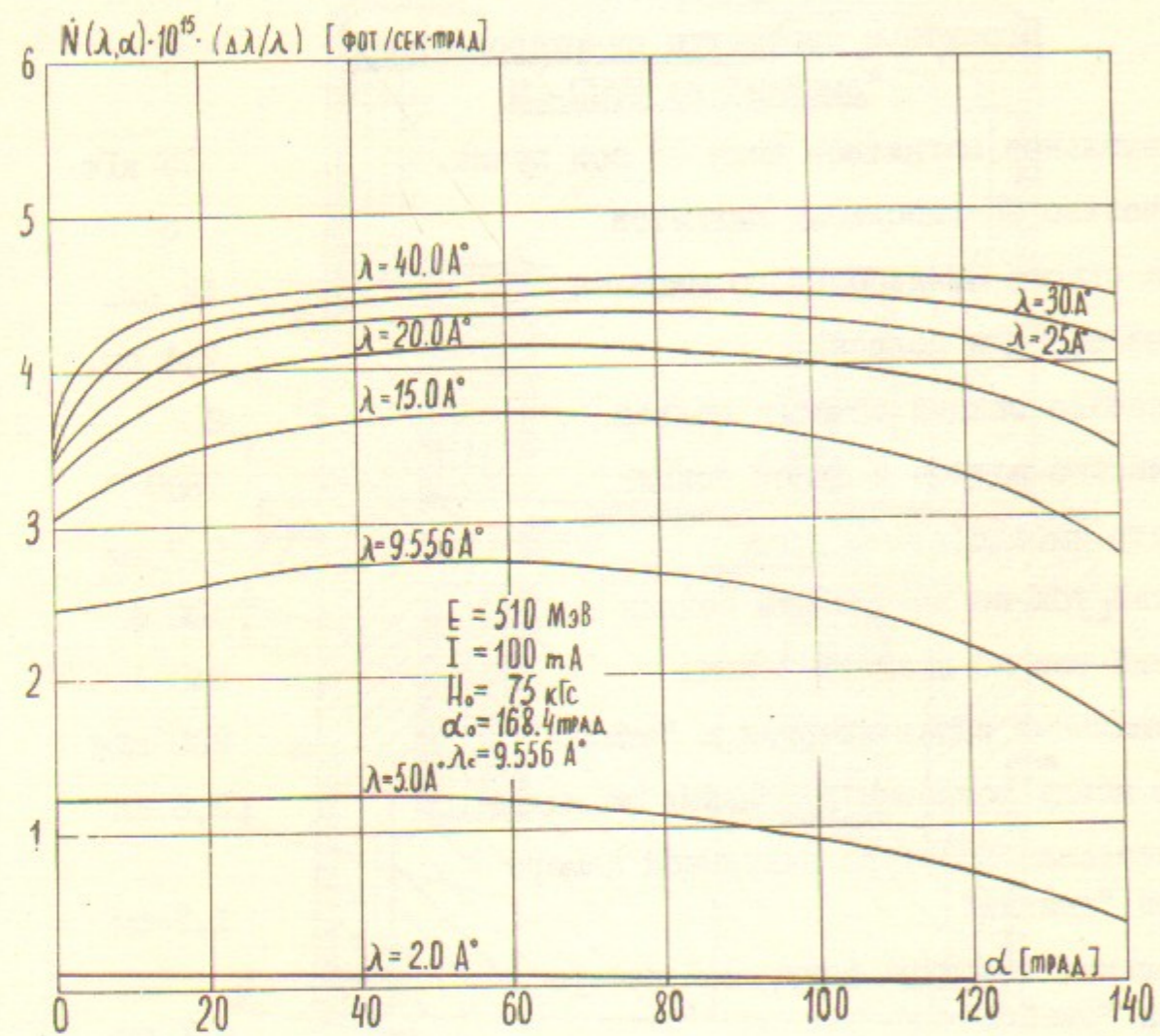


Рис.5 Угловое распределение синхротронного излучения сверхпроводящей змейки на энергии 510 МэВ .

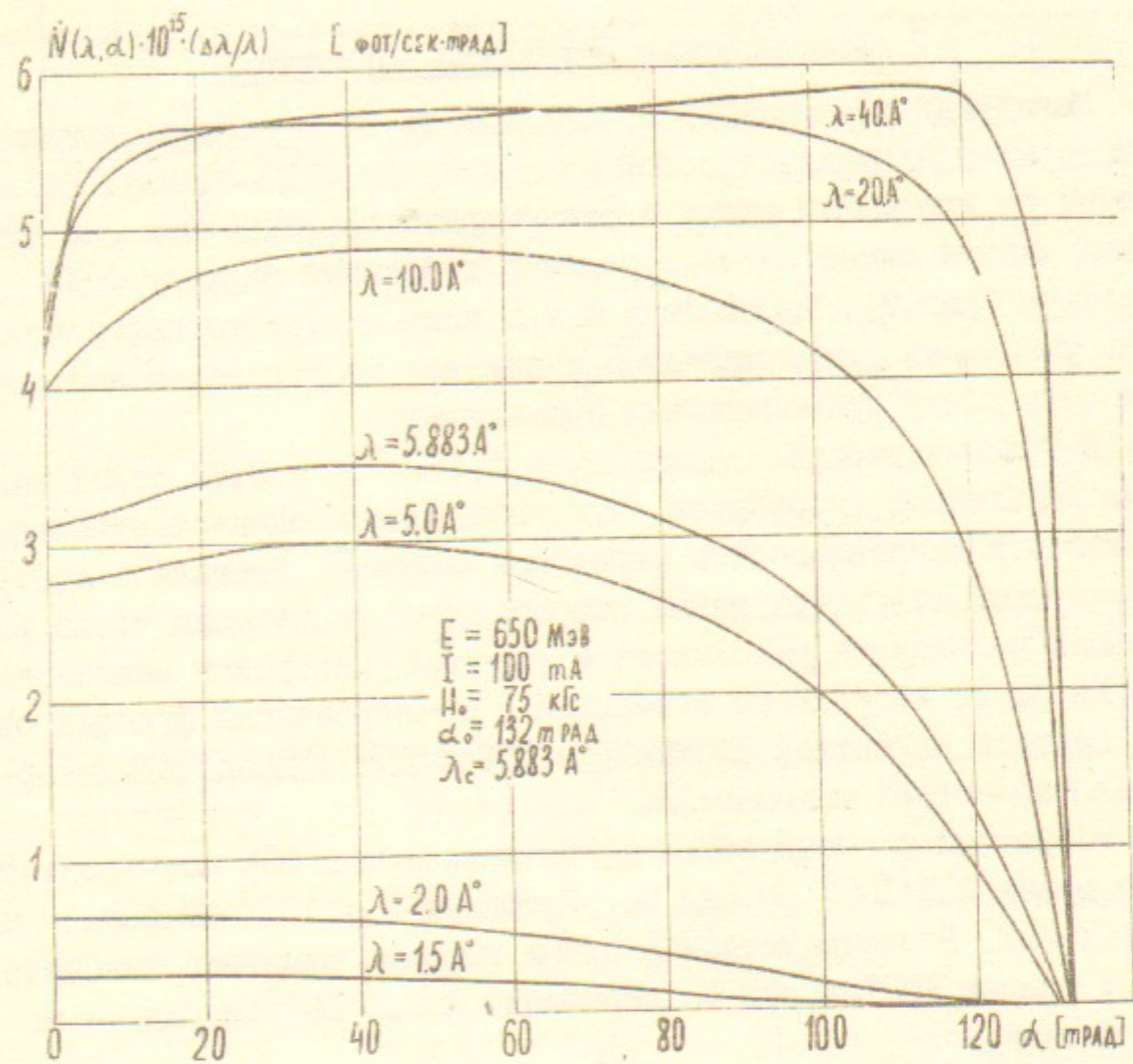


Рис.6 Угловое распределение СИ змейки на энергии 650 МэВ .

I. Фокусирующая структура накопителя

Магнитная система БЭП составлена из 12 периодов, каждый из которых представляет собой элементарную ФОДО-ячейку. Но в отличие от привычной схемы с равномерным симметричным расположением линз в нашем случае применен дублетный вариант ФОДО-структуры (рис.7). Компоновка Φ и D линз в дублеты позволила вдвое уменьшить число магнитов и при том же периметре кольца увеличить длину прямолинейных промежутков.

Выбранная рабочая точка $\nu_z = 3,18$, $\nu_x = 3,61$ лежит вдали от целочисленных резонансов, что значительно снижает чувствительность к неидеальностям магнитной системы. Высокая симметрия фокусирующей структуры также способствует уменьшению числа работающих нелинейных резонансов и упрощает настройку накопителя.

На рис.8 изображены огибающие и дисперсионная функция одного периода магнитной системы, а в таблице 2 дана сводка основных параметров накопителя.

Расчетный фазовый объем инжектируемого в БЭП позитронного пучка равен $2,5 \cdot 10^{-3}$ см.рад по вертикали и $4 \cdot 10^{-3}$ см.рад. - по горизонтали. В соответствии с этими цифрами адмитанс накопителя принят равным 10^{-2} см.рад по вертикали и $2,5 \cdot 10^{-2}$ см.рад. - по горизонтали.

Выбрана радиальная схема инжекции, имеющая в данном случае ряд преимуществ по сравнению с вертикальной. Действительно, вертикальный и горизонтальный размеры позитронного пучка отличаются несущественно, требуемая горизонтальная дисперсия частиц с отклонением по энергии мала по сравнению с бетатронным размером (вследствие большой жесткости фокусировки), поэтому радиальный выпуск в данном случае выглядит экономичнее, т.к. существенно уменьшается межполосный зазор магнитов.

На рис.9 изображена схема инжекции позитронного пучка в накопитель. Пропускная способность выходного окна септум-магнита с толщиной ножа 3 мм равна 10^{-2} см.рад по фазовому объему и $\pm 5\%$ по $\Delta E/E$. Магнитное поле инфлектора доворачивает пучок на

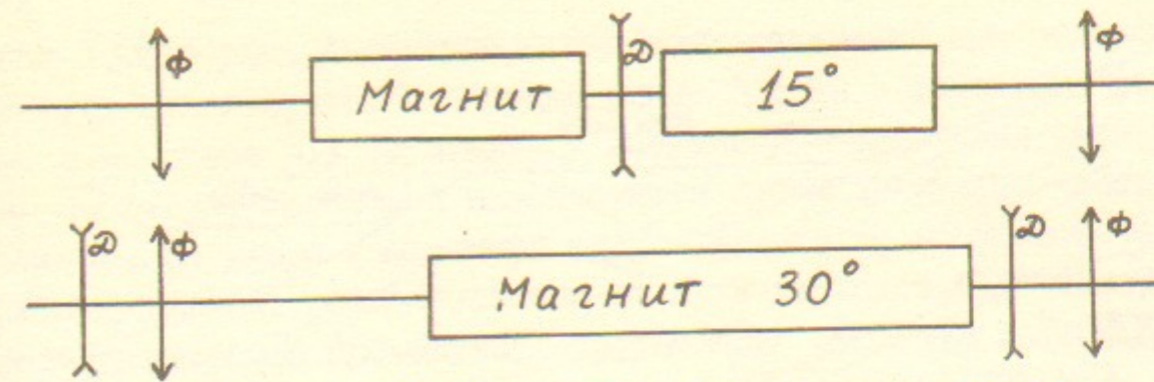


Рис.7 Обычный и дублетный (внизу) варианты ФОДО-структуры.

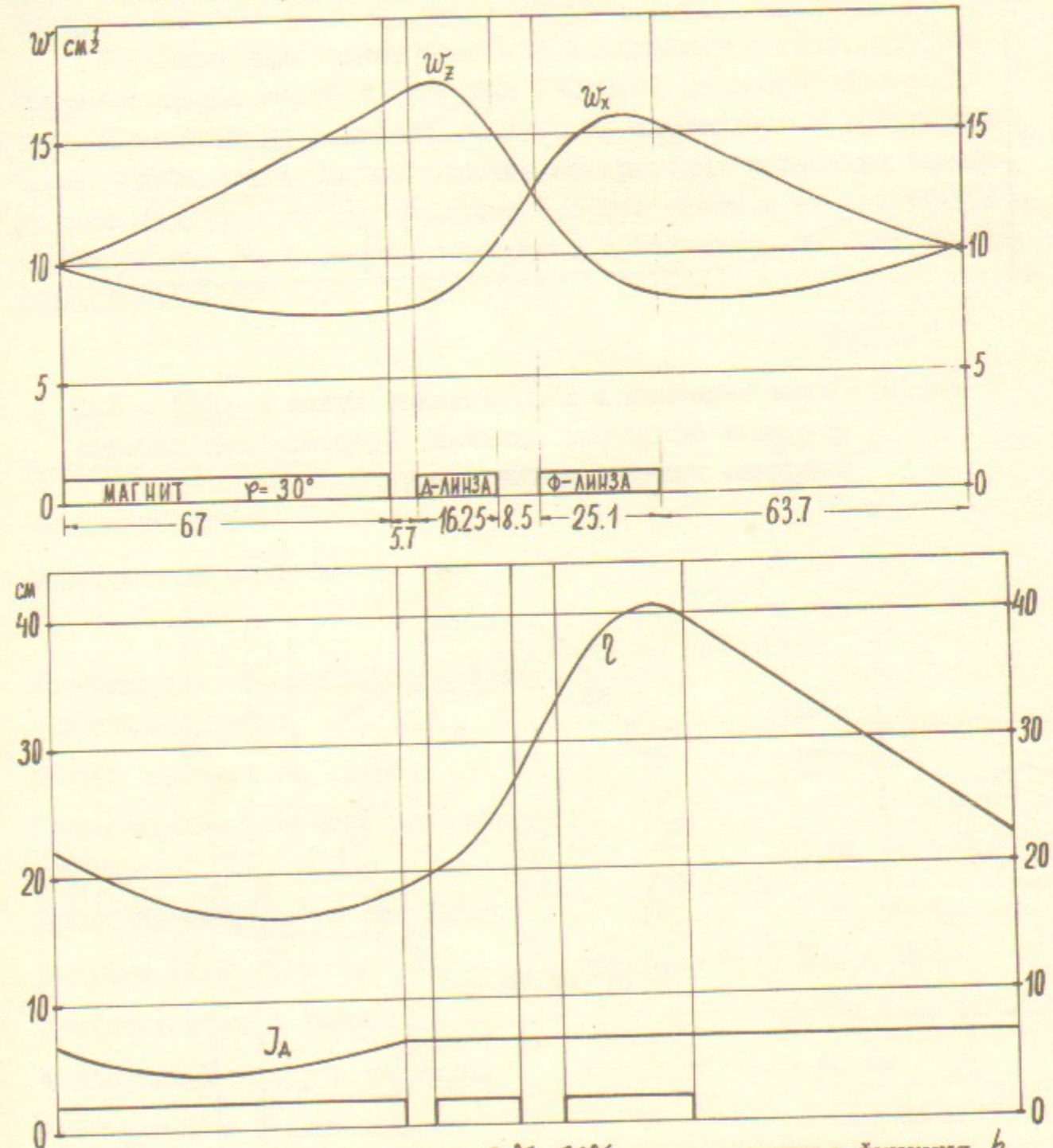


Рис.8. Огибающие пучка w_z, w_x , дисперсионная функция ζ и её эмиттанс J_A .

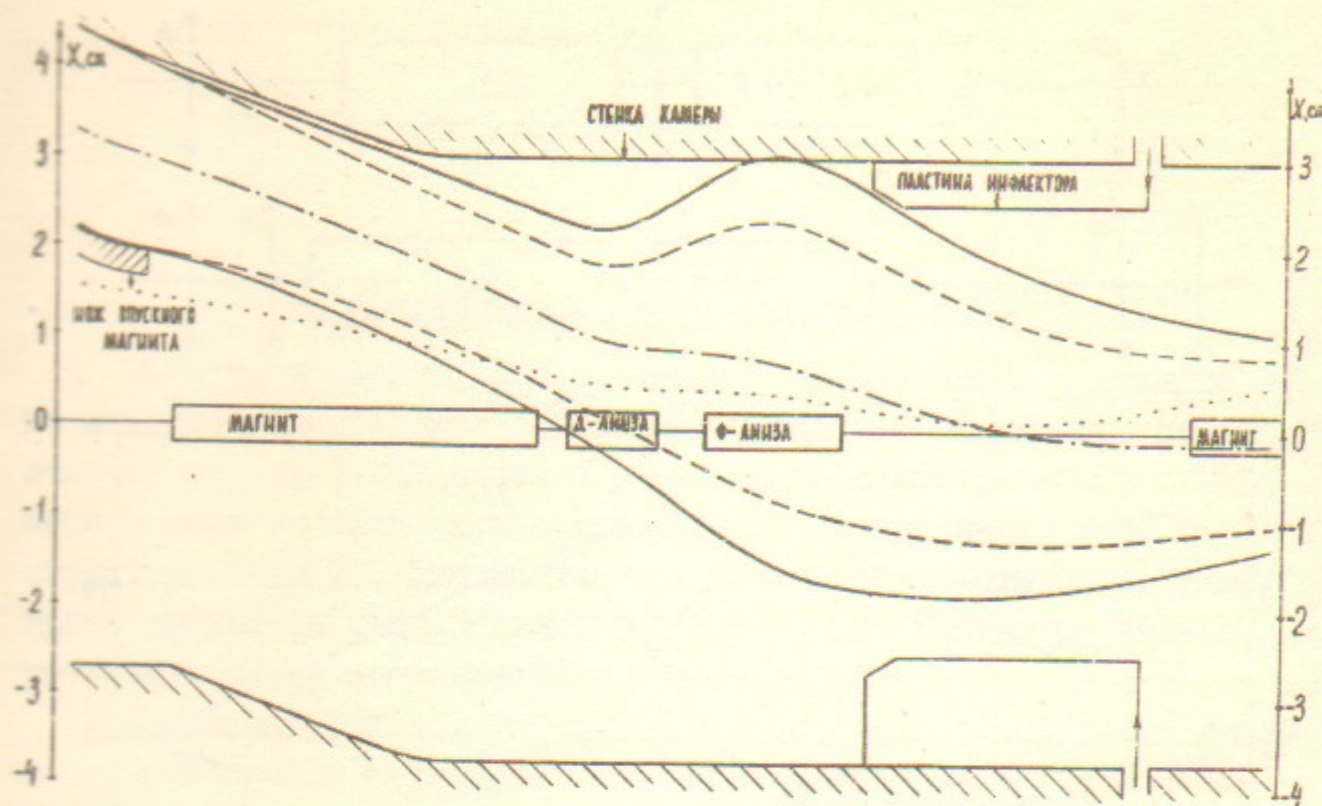


Рис. 9. Схема инжекции в БЭП. Границы пучка с $\Delta E/E = \pm 2\%$ показаны сплошными линиями. Прерывистыми линиями очерчены границы пучка с $\Delta E/E = 0$.

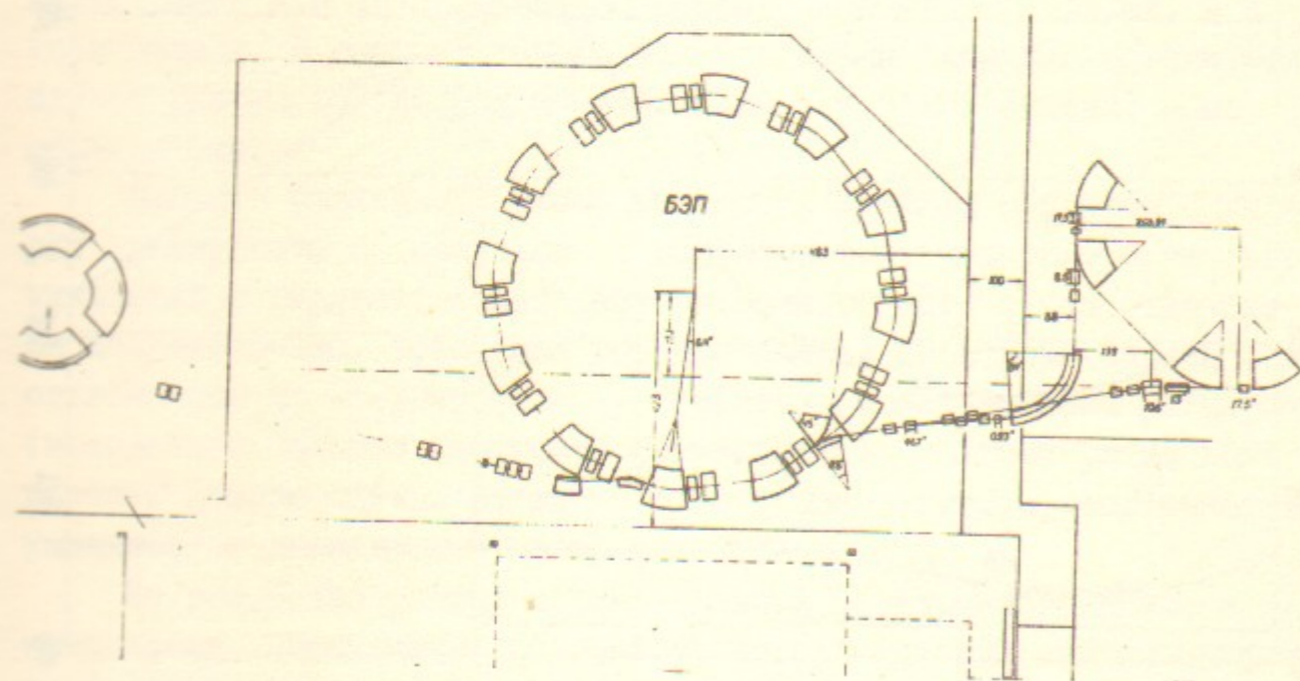


Рис. 10. Вид сверху на накопитель БЭП.

угол $0,0214$ рад. Амплитуда остаточных колебаний центральной частицы инжектированного пучка равна $2,6$ мм в максимуме размера, т.е. менее $0,1$ от апертуры вакуумной камеры. Для уменьшения амплитуды колебаний накопленного пучка применена частичная компенсация удара инфлектора ударом такого же по устройству прединфлектора, расположенного за пять периодов ($1,5$ колебания) до инфлекторного промежутка. Соотношение амплитуд инфлектора и прединфлектора на энергии накопления позитронов (125 МэВ) равно $2:1$.

В режиме накопления большого электронного тока, которое предполагается вести на энергии 250 МэВ, целесообразно работать с равными по величине импульсами инфлектора и прединфлектора, чтобы иметь полное гашение когерентных колебаний большого накопленного пучка. Величина заброса инжектируемого пучка в таком режиме уменьшается примерно в $1,8 \pm 2$ раза, что еще вполне приемлемо.

Таблица 2

Число периодов	12
Номинальная энергия	700 МэВ
Периметр орбиты	22,35 м
Бетатронные частоты	ν_z 3,18 ν_x 3,61
Коэффициент пространственного уплотнения орбит α	0,05
Потеря энергии за оборот	17 кэВ
Отношение декрементов радиационного затухания G_x/G_z	0,86
Время радиационного затухания τ_z	6,28 мс
Ведущее магнитное поле H_z	18,24 кГс
Градиент поля в линзах H'_z	3,72; 2,48 кГс/см
Межполюсный зазор в магнитах	40 мм
Апертура Д и Ф линз 2γ	56; 84 мм
Захватываемый фазовый объем $\epsilon_{z,x}$	10^{-2} см.рад.

Захватываемый энергетический разброс
 $\Delta E/E$ на энергии 125 МэВ

$\pm 3\%$

Кратность ВЧ q

2

Частота ВЧ

26,83 МГц

Амплитуда напряжения ВЧ

60 кВ

Частота синхротронных колебаний V_s

10^{-3}

Квантово-флуктуационные размеры пучка
 в максимуме β -функций

σ_x 0,28 мм
 σ_{xs} 0,2 мм
 σ_z 0,012 мм
 $\sigma_{\Delta E/E}$ $0,51 \cdot 10^{-3}$
 σ_y 7,5 см

Размеры пучка на максимальном токе
 $J = 2$ А ($N = 10^{12}$)

Δ_x 0,4 мм
 Δ_z 0,017 мм
 Δ_y 10 см

Эмиттансы пучка при $J = 2$ А

ϵ_x $6,4 \cdot 10^{-6}$ см.рад.
 ϵ_z 10^{-8} см.рад.

II. Размещение накопителя

На рис. 10 показан вид сверху на установку БЭП и электронно-оптические каналы БЭМ-БЭП, БЭП-ВЭП-2М. Медианная плоскость кольца БЭП лежит на одном уровне с плоскостью синхротрона Б-3М, благодаря чему упрощается инжекция позитронов в накопитель. Позитронный канал включает в себя всего два магнита, обеспечивающих оптимальную дисперсию частиц по горизонтали. Изменение направления оси канала БЭМ-БЭП достигается переносом выпускного окна в шине синхротрона БЭМ.

Медианная плоскость кольца ВЭП-2М находится выше уровня накопителя БЭП на 76 см, поэтому решено перестроить впускные промежутки ВЭП-2М на инжекцию снизу. Вертикальная проекция каналов инжекции в ВЭП-2М показана на рис. 11, 12. Геометрия канала БЭМ-БЭП представлена на рис. 13.

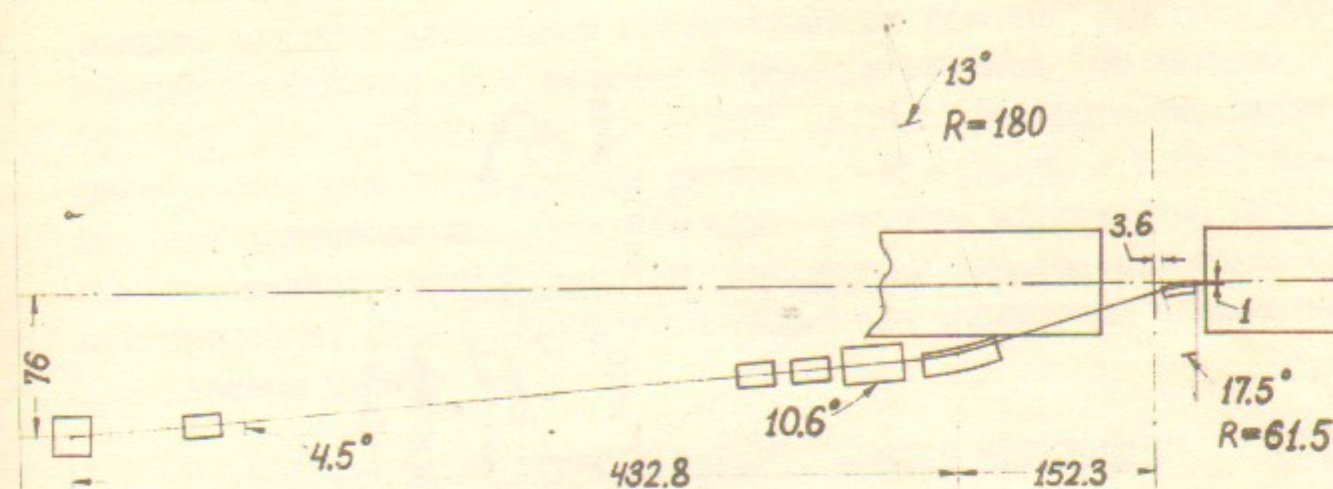


Рис. 11. Вертикальная проекция участка позитронного канала БЭП-ВЭП-2М.

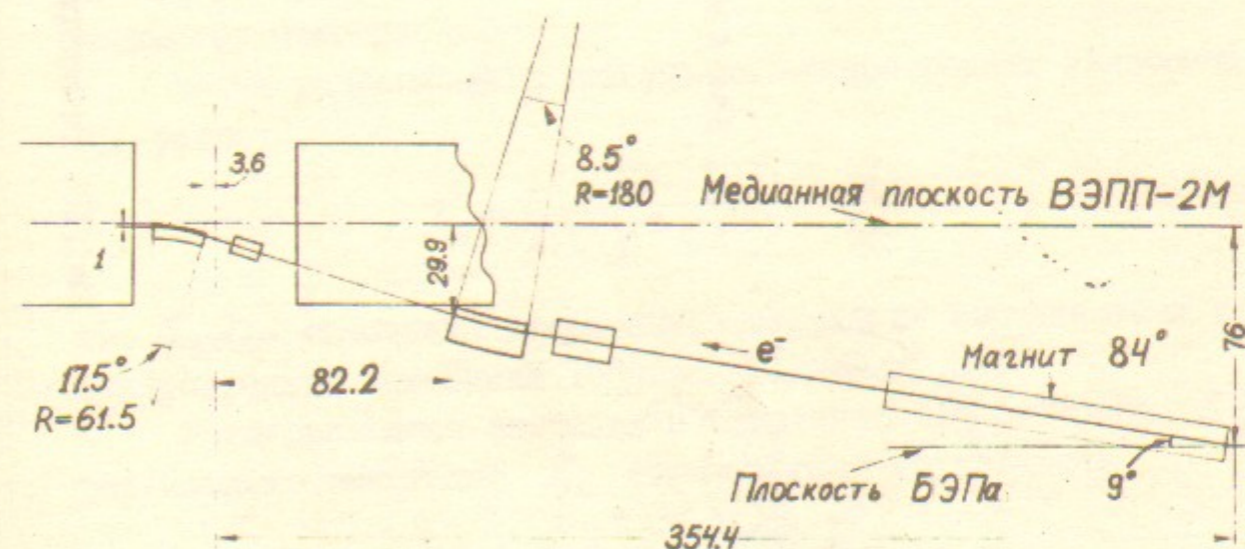


Рис. 12. Вертикальная проекция участка электронного канала БЭП-ВЭП-2М.

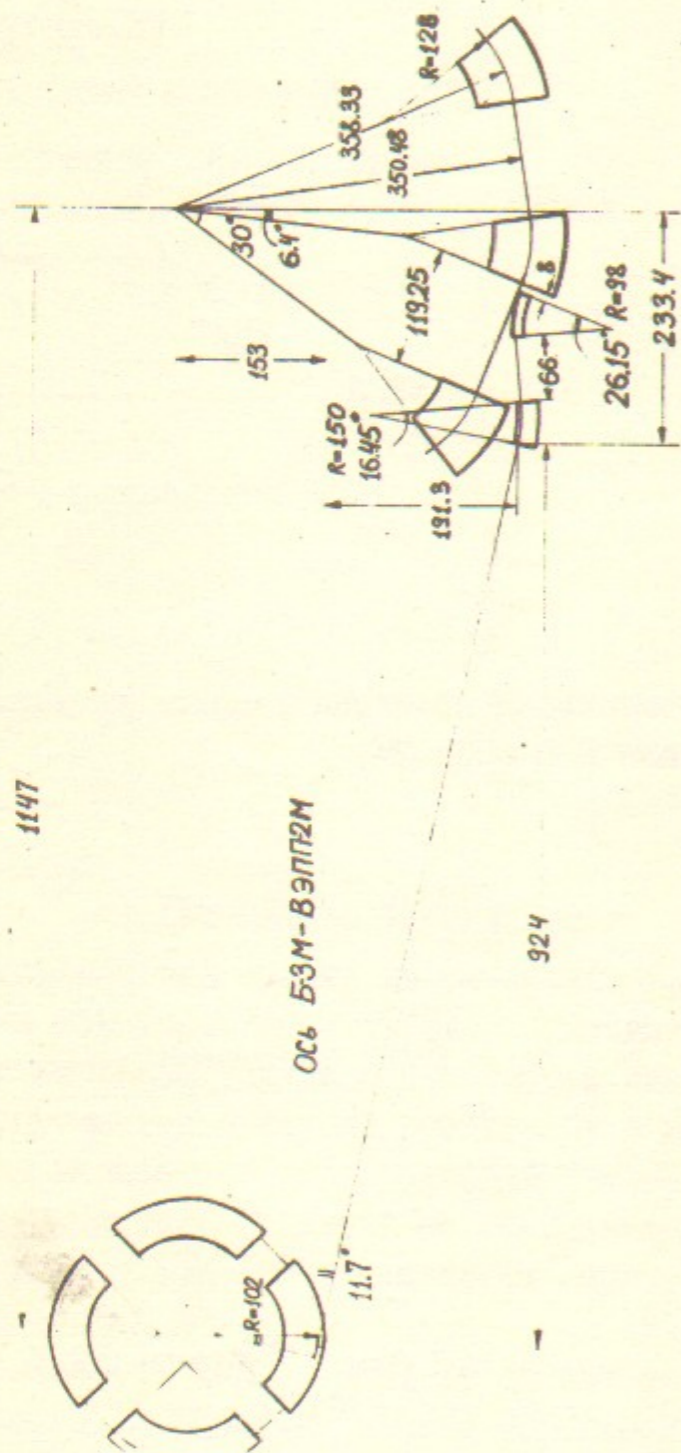


Рис. 13. Геометрия канала Б-3М-БЭП.

III. Параметры пучков

Для решения задачи инжекции пучка во ВЛЭШ необходимо создать сгусток электронов интенсивностью $N = 10^{12}$ частиц, протяженностью 10 ± 20 см и величиной фазовых объемов (на энергии 700 МэВ) $\mathcal{E}_z = 10^{-8}$ см.рад, $\mathcal{E}_x = 6 \cdot 10^{-6}$ см.рад. (коэффициент связи бетатронных колебаний выбран равным $\mathcal{K} \equiv \sqrt{\mathcal{E}_z / \mathcal{E}_x} = 0,04$). Ясно, что приготовление столь плотных сгустков является во многих отношениях сложной задачей. Рассмотрим вкратце два основных процесса, определяющих установившиеся продольный и поперечный размеры пучков.

I. Квантовые флуктуации синхротронного излучения

Средняя по времени скорость диффузии энергетического разброса $\Delta_{\frac{dE}{E}}$ за счет квантовых флуктуаций синхротронного излучения равна:

$$\left\langle \frac{d}{dt} \Delta_{\frac{dE}{E}}^2 \right\rangle = \frac{55}{48\sqrt{3}} \lambda z_e c \gamma^5 \langle |K|^3 \rangle \quad (1)$$

Здесь $K \equiv R^{-1}$ - кривизна равновесной орбиты, z_e, λ - классический радиус и комptonовская длина волны электрона, c - скорость света, γ - релятивистский фактор, $\langle \rangle$ - знак усреднений по периметру накопителя.

Время радиационного затухания синхротронных колебаний τ_s равно:

$$\tau_s = \frac{3}{z_e c \gamma^3 \langle K^2 \rangle} \cdot \frac{G_z}{G_s} \quad (2)$$

где G_z/G_s - отношение декрементов затухания вертикальных и синхротронных колебаний (обычно $G_z/G_s \approx 0,5$).

Установившиеся значения энергетического разброса $\Delta_{\frac{dE}{E}}$ и радиального эмиттанса \mathcal{E}_x определяются из условий:

$$\left\langle \frac{d}{dt} \Delta_{\frac{dE}{E}}^2 \right\rangle = \frac{2}{\tau_s} \Delta_{\frac{dE}{E}}^2 \quad (3)$$

$$\left\langle \frac{d}{dt} \mathcal{E}_x \right\rangle = \frac{2}{\tau_x} \mathcal{E}_x \quad (4)$$

$$\frac{d\mathcal{E}_x}{dt} = I \cdot \frac{d}{dt} \Delta_{\frac{dE}{E}}^2 \quad (5)$$

Здесь $I = \gamma_x \dot{z}^2 + 2\alpha_x \dot{z} \dot{z}' + \beta_x \dot{z}'^2$ - величина эмиттанса дисперсионной функции I ($\gamma_x, \alpha_x, \beta_x$ - параметры матрицы Твисса). Подставляя (1) и (2) в (3), (4) и, учитывая связь (5) между ε_x и $\Delta_{\frac{AE}{E}}$, находим:

$$\Delta_{\frac{AE}{E}} = \sqrt{\frac{55\sqrt{3}}{96}} \lambda \frac{\langle |k|^3 \rangle}{\langle k^2 \rangle} \frac{G_z}{G_x} \cdot \gamma \quad (6)$$

$$\varepsilon_x = \frac{G_z}{G_x} \langle I \rangle_H \cdot \Delta_{\frac{AE}{E}}^2 \quad (7)$$

где $\langle I \rangle_H$ - среднее по магнитам значение I (строго говоря в (7) нужно усреднять произведение $I \cdot |k|^3$, но здесь и далее мы будем считать, что величина поля H во всех магнитах одинакова). Оценку ε_x можно сделать в приближении однородной фокусировки, тогда:

$$I \approx \frac{R_0}{\gamma^3} \quad (8)$$

$$\varepsilon_x \approx \lambda \frac{R_0}{R} \cdot \frac{\gamma^2}{\gamma_x^3} \quad (9)$$

Здесь $R_0 \equiv \langle k \rangle^{-1}$ - средний радиус накопителя.

Необходимо отметить сильную зависимость квантово-флуктуационного эмиттанса ε_x от γ и γ_x , благодаря чему легко подобрать требуемые для заданной величины ε_x значения этих параметров. Однако при большом числе частиц в сгустке главную роль может играть другой процесс, а именно - многократное рассеяние частиц друг на друге (эффект Тушека).

2. Многократное рассеяние частиц внутри сгустка

Скорость диффузии по энергии в этом процессе равна:

$$\frac{d}{dt} \Delta_{\frac{AE}{E}}^2 = \frac{N z_e^2 c (\ln \frac{R}{2} \gamma^2 \delta_{x'} \frac{\delta_z}{z_e})^2}{16\pi \delta_z \delta_x \delta_y \delta_{x'} \cdot \gamma^3} \quad (10)$$

где $\delta_{x'} = \delta_x / \beta_x$ - локальный угловой разброс в пучке, а δ_y - среднеквадратичное продольное отклонение частиц в сгустке ($\delta_x \delta_{x'} \equiv \varepsilon_x$, $\delta_z = \alpha \beta_z^{\frac{1}{2}} \varepsilon_z^{\frac{1}{2}}$).

Найдем установившиеся размеры пучка в предположении, что квантовыми флуктуациями можно пренебречь по сравнению с многократным рассеянием.

Используя связь между $\Delta_{\frac{AE}{E}}$ и δ_y через параметры ВЧ-системы:

$$\delta_y = R_0 \sqrt{\frac{2\pi \alpha E}{q e V \sin \varphi_s}} \Delta_{\frac{AE}{E}} \equiv \beta_y \Delta_{\frac{AE}{E}} \quad (11)$$

а также связь $\Delta_{\frac{AE}{E}}$ с ε_x :

$$\varepsilon_x = \frac{G_z}{G_x} \langle I \rangle \Delta_{\frac{AE}{E}}^2 \quad (12)$$

получим самосогласованное решение:

$$\Delta_{\frac{AE}{E}} = \left[\frac{3z_e}{32\pi} \frac{N \langle \beta_z^{-\frac{1}{2}} \rangle}{\alpha \beta_y} \right]^{\frac{1}{6}} \frac{(\ln \dots)^{\frac{1}{3}} R^{\frac{1}{3}}}{\langle I \rangle^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{G_z^{\frac{1}{6}} G_x^{\frac{1}{4}}}{G_s^{5/2}} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (13)$$

где β - доля периметра, занятая магнитным полем (при наличии "змеек" $\beta \neq R/R_0$). При выводе этой формулы были допущены некоторые неточности, а именно, среднее от произведения нескольких величин заменено на произведение средних. В нашем случае, связанная с этим погрешность невелика.

Таким образом, зависимость от N и γ при прочих фиксированных параметрах имеет следующий характер:

$$\Delta_{\frac{AE}{E}} \sim \frac{N^{\frac{1}{6}}}{\gamma} \quad (14)$$

$$\varepsilon_x \sim \frac{N^{\frac{1}{3}}}{\gamma^2} \quad (15)$$

Можно задаться не величиной продольной β -функции β_y , а требуемой длиной сгустка δ_y , тогда получим другое самосогласованное решение:

$$\Delta_{\frac{AE}{E}} = \left[\frac{3z_e}{32\pi} \frac{N \langle \beta_z^{-\frac{1}{2}} \rangle}{\alpha \beta_y} \right]^{\frac{1}{5}} \frac{(\ln \dots)^{\frac{2}{5}} R^{\frac{2}{5}}}{\langle I \rangle^{3/10}} \cdot \frac{G_z^{\frac{1}{5}} G_x^{\frac{3}{10}}}{G_s^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{1}{\gamma^{6/5}} \quad (16)$$

С другой зависимостью от N и γ :

$$\Delta_{\frac{AE}{E}} \sim \frac{N^{\frac{1}{5}}}{\gamma^{6/5}} \quad (17)$$

$$\varepsilon_x \sim \frac{N^{5/4}}{\gamma^{12/5}} \quad (18)$$

Заметим, что значение кулоновского логарифма в (10), (13), (16) легко оценивается после одной-двух итераций (в нашем случае $\ln \dots \approx 20$).

Зависимость ε_x от фокусирующих свойств накопителя (при $\delta_y = \text{const}$) можно записать в виде:

$$\varepsilon_x \sim \frac{N^{2/5} R_0^{1/5}}{\gamma^{2/5} H^{1/5} \gamma^{2/5} V} \quad (19)$$

Мы видим, что ε_x падает с увеличением жесткости фокусировки V , но не так быстро как квантово-флуктуационный эмиттанс (9). В (19) достаточно сильно входит также величина ведущего магнитного поля H и энергия накопителя γ . Увеличение коэффициента заполнения магнитным полем ξ за счет применения устройств типа "змеяка" большого выигрыша не дает, так как рост ξ сопровождается, к сожалению, увеличением дисперсионного эмиттанса I . Расчеты по полученным выше формулам показали, что требуемое значение ε_x реализуется при сравнительно стандартных параметрах γ, H, V .

Совместное рассмотрение квантовых флуктуаций и эффекта Тушека проводилось с помощью ЭВМ. На рис. 14-17 приведены расчетные зависимости для размеров и времени жизни пучка на различных энергиях накопителя. На энергии 700 МэВ учет многократного рассеяния внутри сгустка при требуемом для проекта ВЛЭШ коэффициенте связи $\kappa = 0,04$ приводит к удвоению радиального эмиттанса. На более низких энергиях роль эффекта Тушека является еще более подавляющей, что видно из рис. 14-15 и формулы (15). В накопителе БЭИ даже при сравнительно небольших токах поперечные и продольные размеры пучка падают с ростом энергии, что является необычной ситуацией для большинства установок со встречными пучками.

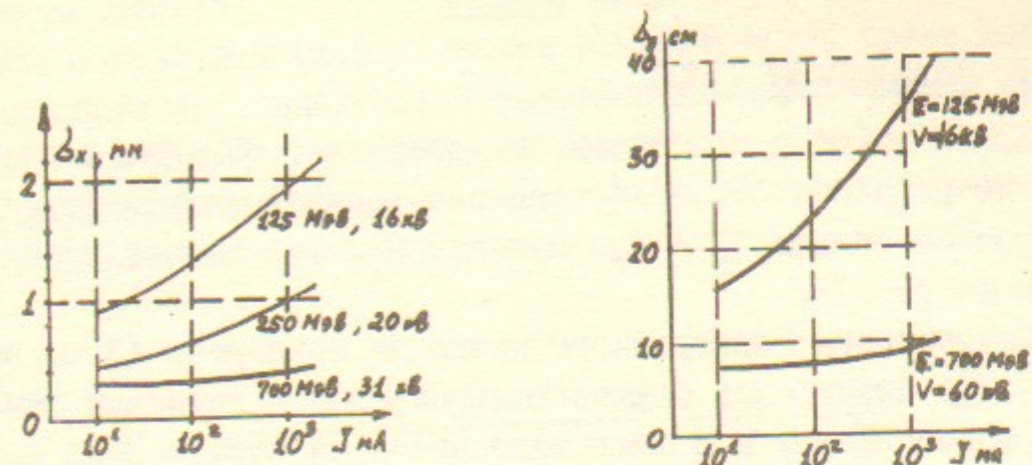


Рис. 14-15 Зависимость радиального δ_x и продольного δ_y размеров от интенсивности пучка при $\kappa = 0.04$.

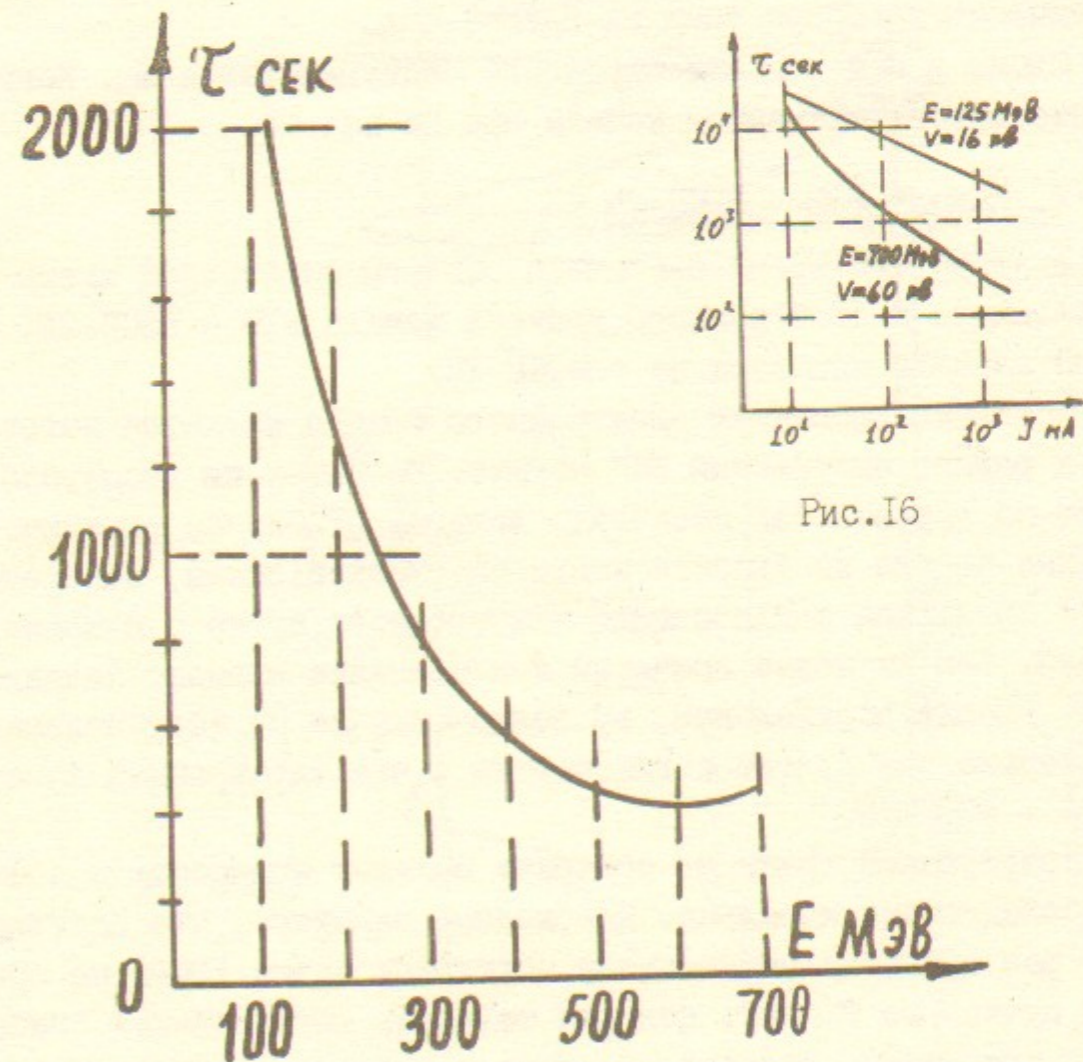


Рис. 17 Зависимость времени жизни пучка τ от энергии E при $\kappa = 0.04$, $I = 2$ А, $\Delta E/E = \pm 3\%$.

IV. Каналы

I. Канал Б-3М - БЭП

Канал лежит в плоскости синхротрона Б-3М. Его геометрия видна из рис.10 и 13. Огибающие электронной (линзы $Q_1 - Q_5$) и позитронной (линзы $Q_6 - Q_9$, магниты M_1, M_2) частей канала показаны на рис.18.

Фокусировка электронного пучка на конвертер (3 мм вольфрама) и сбор позитронов осуществляются блоком литиевых линз Q_5 и Q_6 , используемым и в настоящее время на канале Б-3М - ВЭП-2. Пропускная способность канала составляет 10^{-2} см.рад. по фазовому объему и $\pm 3\%$ - по $\Delta E/E$. Расчетное значение коэффициента конверсии равно $K^+ = 3,5 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta E/E$, т.е. $K^+ = 2,1 \cdot 10^{-3}$ для $\Delta E/E = \pm 3\%$, что соответствует скорости накопления $5 \cdot 10^8$ позитронов/импульс при токе из Б-3М 1,5 А.

Сданы в цех чертежи впускного септум-магнита M_2 . Конструирование других элементов канала ещё не начато.

2. Каналы БЭП - ВЭП-2М

В настоящее время закончены расчеты оптической схемы электронного и позитронного трактов канала БЭП - ВЭП-2М. Геометрия каналов показана на рис.10-12.

Основным элементом электронного тракта является изготовленный ранее импульсный 84° магнит. Вносимая им дисперсия частиц по горизонтали настолько велика, что из-за ограничения по длине канала не удастся найти оптической схемы, обеспечивающей идеальное согласование электронного пучка с накопителем ВЭП-2М. Тем не менее принятый к исполнению вариант является вполне удовлетворительным, во всяком случае он обеспечивает в несколько раз лучшее согласование, чем электронный канал ВЭП-2 - ВЭП-2М.

Позитронный тракт не содержит больших поворотов и поэтому согласован почти идеально. Необходимо заметить, что благодаря в сто раз меньшему радиальному эмиттансу пучка БЭП-а по сравнению с пучком из ВЭП-2, большая точность согласования огибающих не требуется. Поэтому основные усилия при расчете каналов БЭП - ВЭП-2М направлялись на согласование дисперсионных функций и компенсацию $X-Z$ связи, порожденной наклоном 84° -го

магнита на угол 9° .

Для подавления этого эффекта в электронный тракт введен СК6Ю-квадруполь, значительно уменьшающий вертикальный размер пучка на выходном окне впускного магнита.

Графики огибающих пучка вместе с таблицами параметров элементов каналов приведены на рис.19-22.

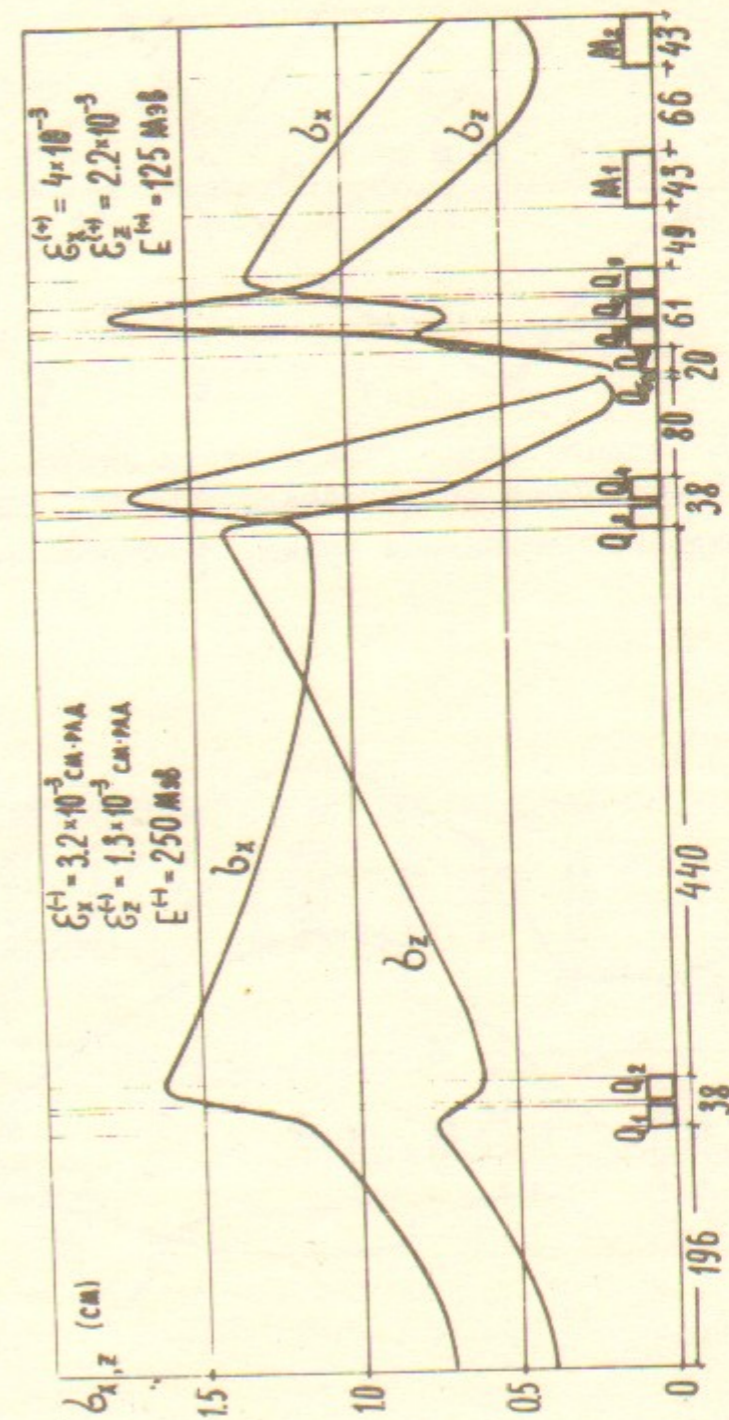


Рис.18 Размеры пучка в канале Б-3М - БЭП. Начальные значения $w_x = 11.6 \text{ cm}^{1/2}$, $w_z = 13 \text{ cm}^{1/2}$.

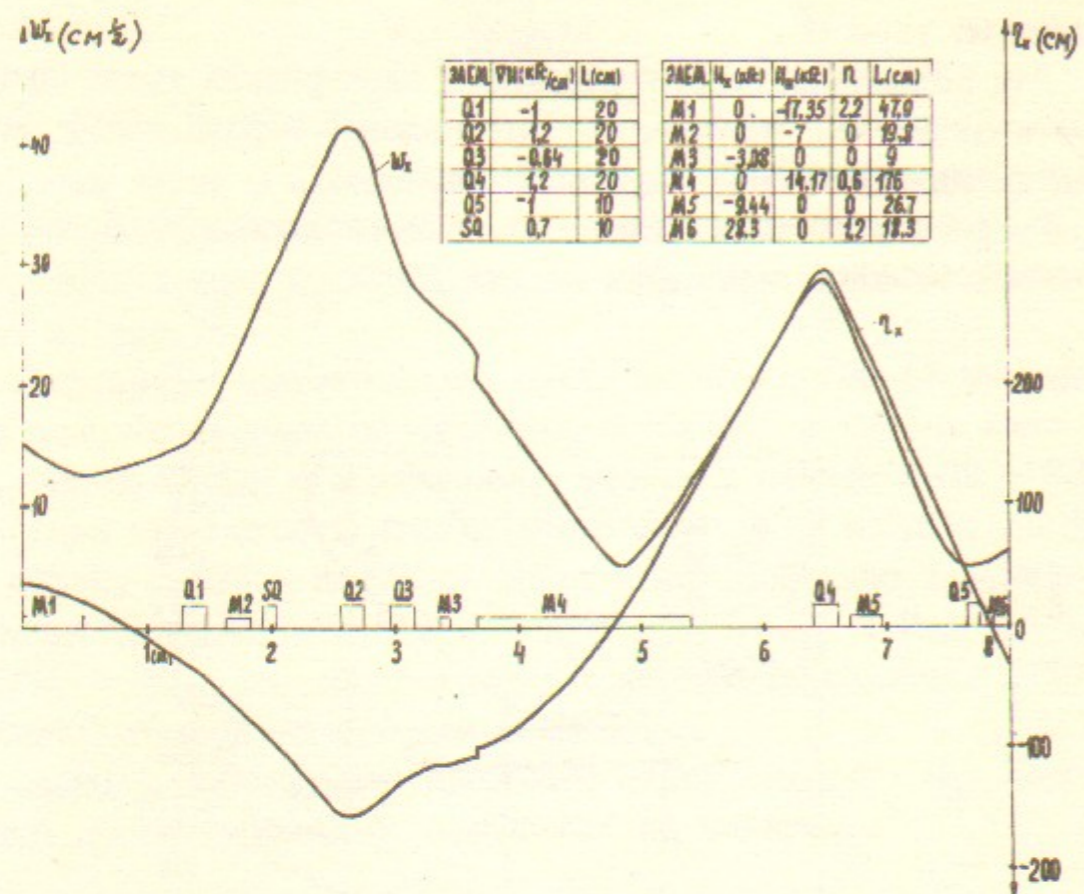


Рис.19 Электронный тракт канала БЭП-ВЭПП-2М.
 W_x -радиальная огибающая пучка, z_x -радиальная z -функция.

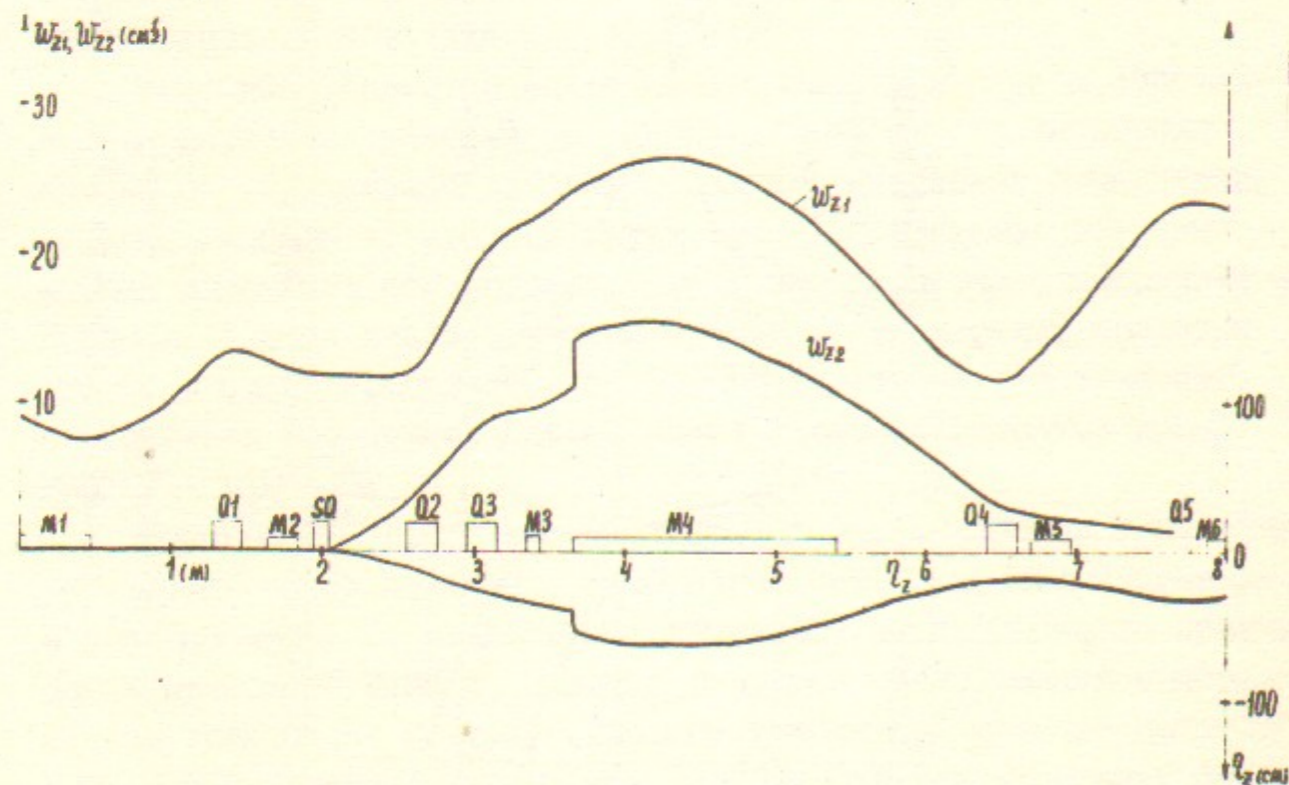


Рис.20 Вертикальные огибающие и z_x -функция электронного тракта канала БЭП-ВЭПП-2М.

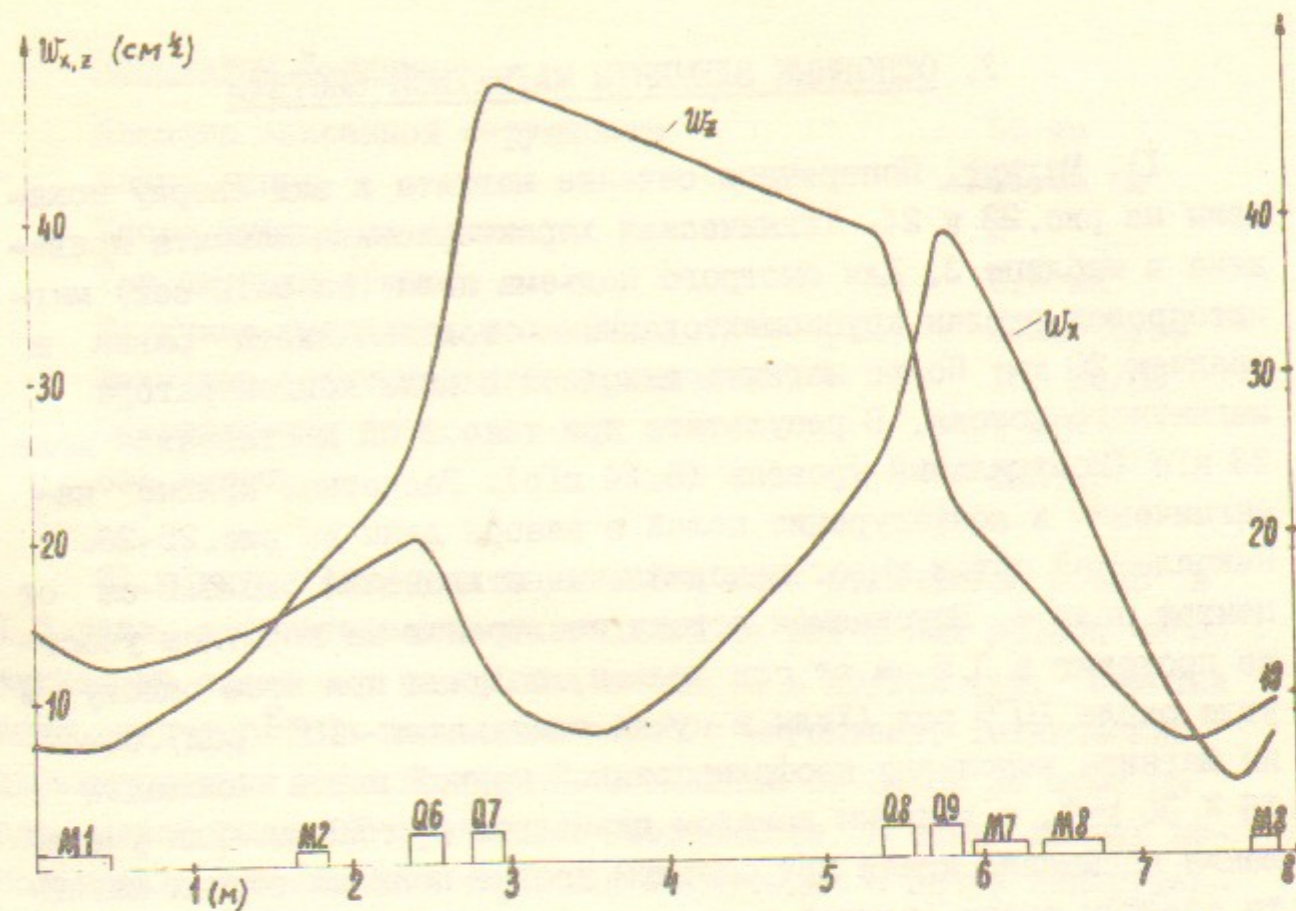


Рис.21 Огибающие пучка позитронного канала БЭП-ВЭПП-2М.

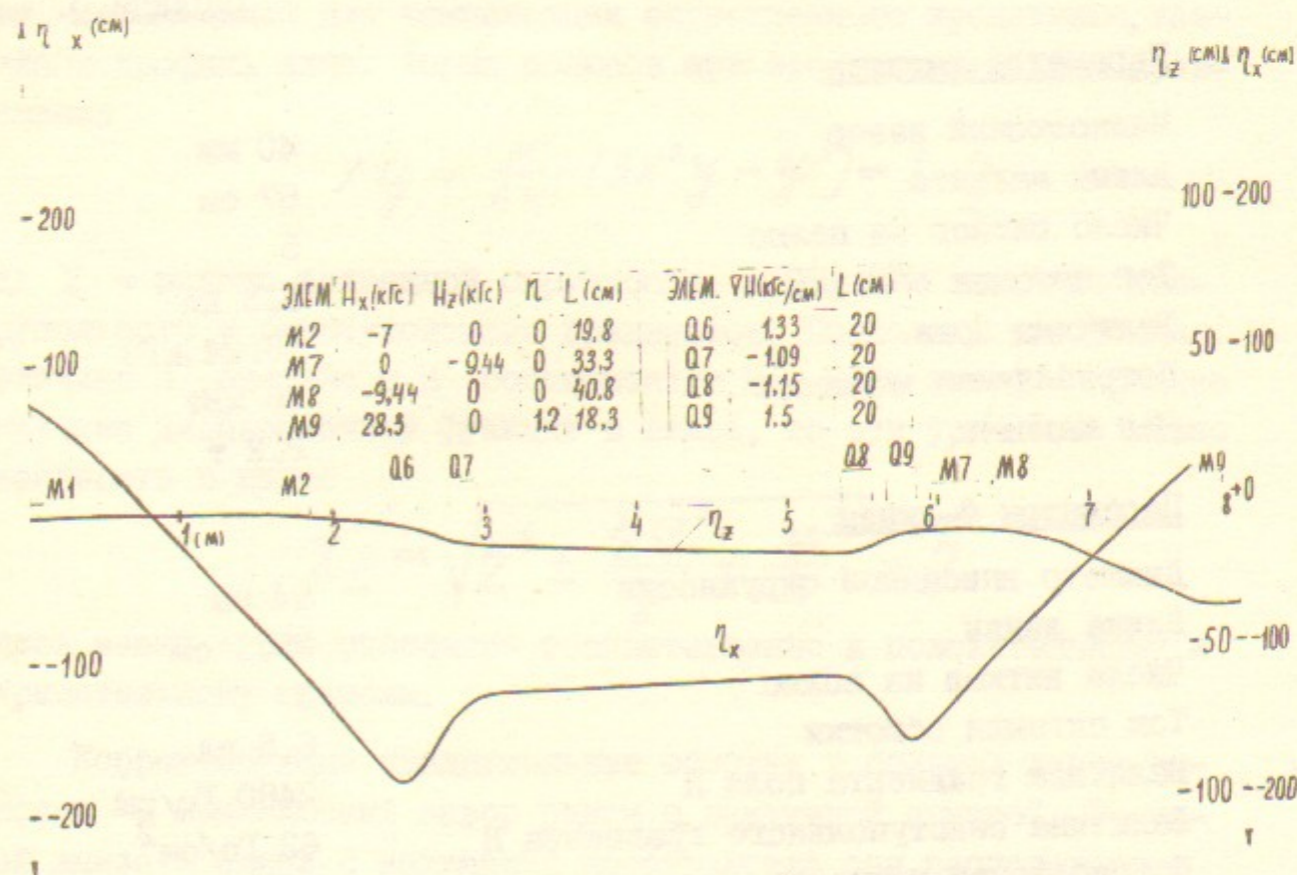


Рис.22 Дисперсионные функции позитронного канала.

У. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

1). Магнит. Поперечное сечение магнита и вид сверху показаны на рис. 23 и 24. Техническая характеристика магнита приведена в таблице 3. Для быстрого подъема поля (за 5-10 сек) магнитопровод сделан крупношихтованным — толщина листа равна в среднем 20 мм. Полос магнита выполнен в виде концентратора магнитного потока. В результате при токе 9 кА достигается поле 23 кГс (Номинальный уровень 18,24 кГс). Расчетные кривые намагничивания и конфигурация полей в зазоре даны на рис. 25-26. Накопленный пучок имеет максимальные отклонения около 2 см от центра полюса. Впускаемая порция позитронов на коротком участке проходит в 3,5 см от оси полюса, получая при этом ошибку в угле около 10^{-3} рад (Углы в пучке составляют $\sim 10^{-2}$ рад). Обмотки магнита выполнены профилированной медной шиной площадью $16 \times 36 \text{ мм}^2$, с водяным каналом диаметром $\phi = 10 \text{ мм}$. Для уменьшения насыщения краев при большом уровне поля на торцах магнита сделаны фаски (длиной в ползазора, под углом 30°).

Таблица 3.

Параметры магнита

Межполюсный зазор	40 мм
Длина магнита	67 см
Число витков на полюс	5
Ток питания обмотки	6,5 кА
Величина поля	18,24 кГс
Потребляемая мощность	38 кВт
Вес магнита	2,2 т

Параметры Ф-линзы

Диаметр вписанной окружности	84 мм
Длина линзы	25,1 см
Число витков на полюс	3
Ток питания обмотки	6,5 кА
Величина градиента поля H'	2480 Гс/см
Величина секступольного градиента H''	62 Гс/см ²
Потребляемая мощность	16 кВт
Вес линзы	300 кг

Параметры Д-линзы

Диаметр вписанной окружности	56 мм
Длина линзы	16,25 см
Число витков на полюс	2
Ток питания обмотки	6,5 кА
Величина градиента поля H'	3720 Гс/см
Величина секступольного градиента H''	160 Гс/см ²
Потребляемая мощность	9 кВт
Вес линзы	160 кг

2). Линзы. Апертуры двух типов линз отличаются ровно в 1,5 раза, соответственно во столько же раз в них разное число витков на полюс — в одной два витка, а в другой три. Обмотки линз запитываются последовательно с магнитами. Технические характеристики линз приведены в таблице 3. Здесь же отметим лишь некоторые конструктивные особенности. В обеих линзах использована однослойная торцевая коммутация с почти ненарушенной квадрупольной симметрией. Линзы разнимаются на зеркально-симметричные верхнюю и нижнюю половинки. Секступольная коррекция, необходимая для компенсации естественного хроматизма, внесена в профиль линз. Форма полюсов при этом определяется уравнениями

$$xy + \frac{H''}{6H'} (3x^2y - y^3) = \pm \frac{Z^2}{2}$$

где Z — радиус вписанной окружности, а H' , H'' — значения квадрупольного и секступольного градиентов. Поскольку требуемая величина H'' связана с H' соотношением $H'' = H'/2$, где 2 — среднее значение дисперсионной функции в линзе, то эти уравнения можно переписать в виде:

$$x_{\pm} = \sqrt{z^2 \pm \frac{2z^2}{y} + \frac{y^3}{3}} - \frac{y}{2}$$

Здесь знаки + и — относятся, соответственно, к положительному и отрицательному полюсам.

Корректирующие квадрупольные обмотки в большой линзе вынесены в межполюсный зазор рядом с вакуумной камерой. В малой линзе в связи с нехваткой пространства они располагаются позади основных обмоток в основании полюса. Кроме того, в малой

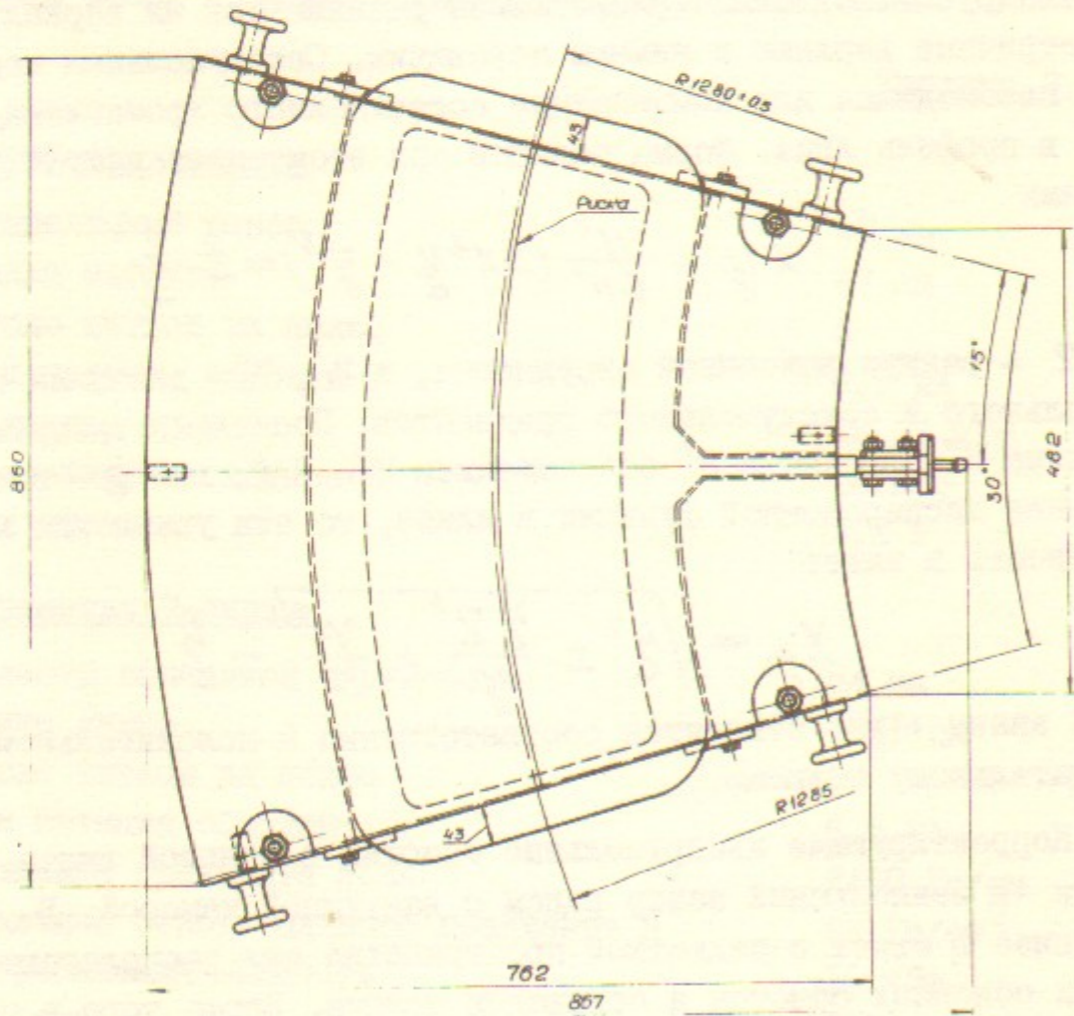
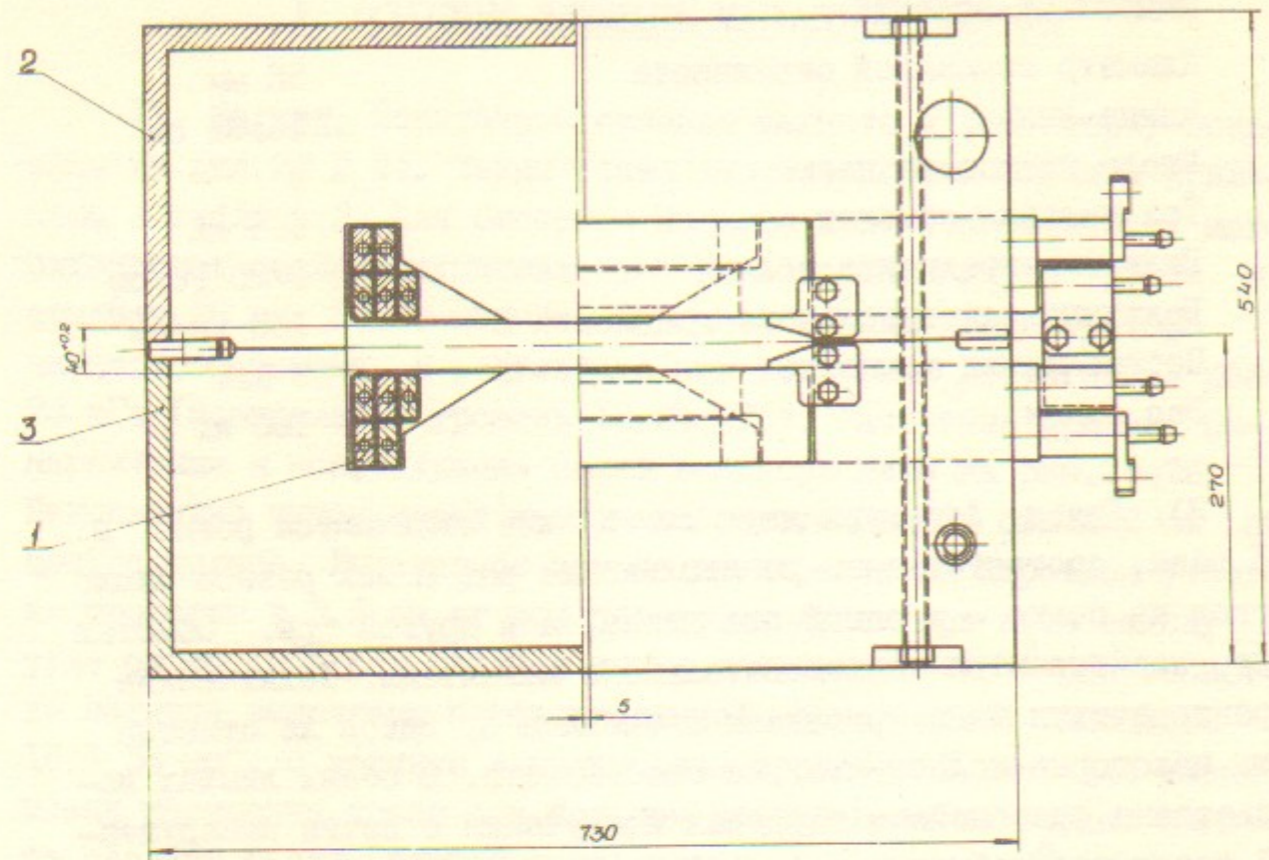


Рис. 23-24 Поперечное сечение магнита БЭП и вид сверху.

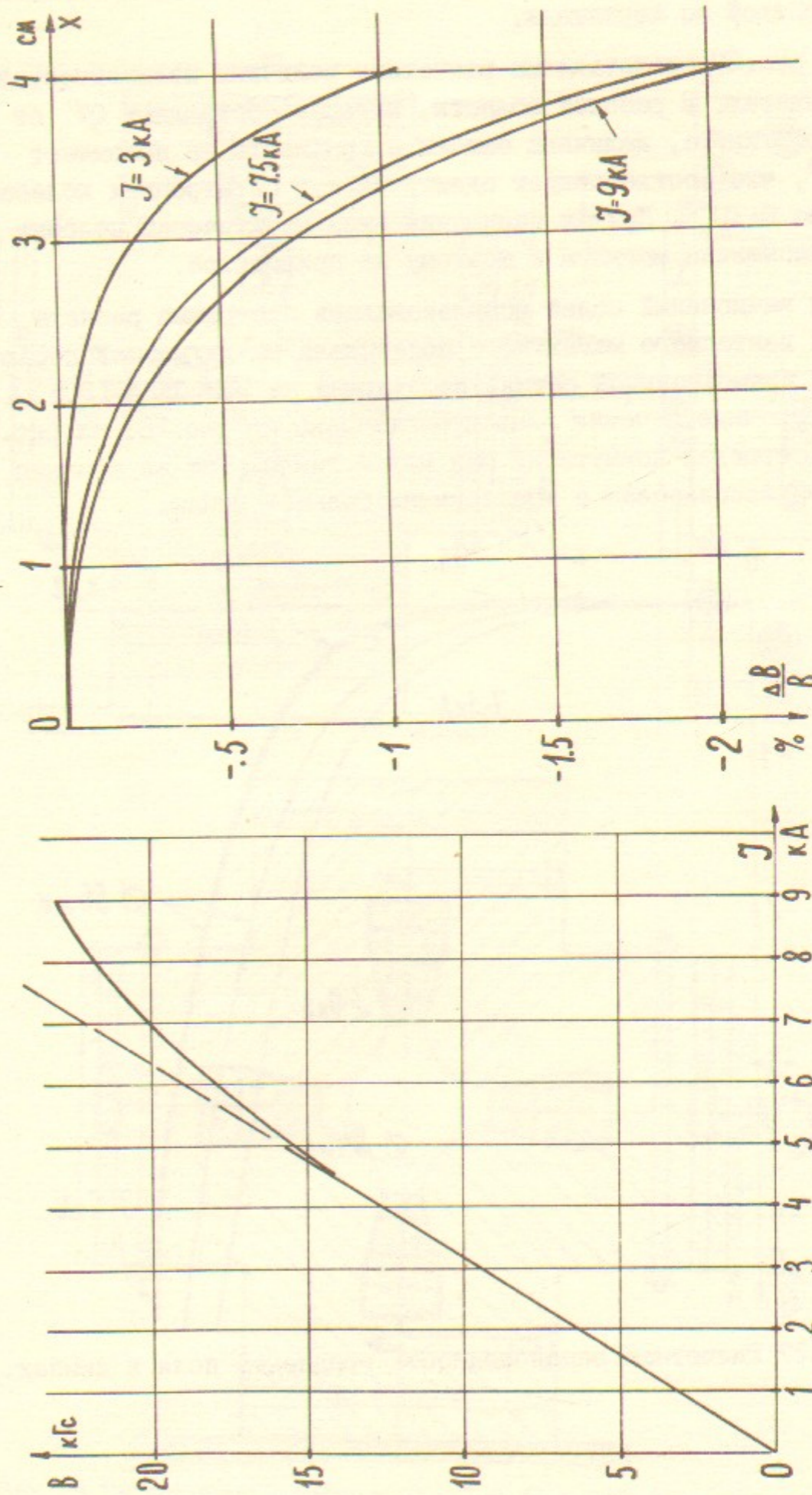


Рис. 25-26 Расчётные кривые намагничивания и неоднородность поля в медианной плоскости магнита БЭП.

линзе имеется дипольная коррекция, предназначенная для управления орбитой по вертикали.

На рис.27 представлены расчетные величины нелинейностей поля в линзах. В рабочей области, которая составляет 0,7 от вписанного круга, величина ошибки в градиенте не превышает $1,5 \cdot 10^{-3}$, что соответствует сдвигу частот бетатронных колебаний около $6 \cdot 10^{-3}$. Кривая насыщения линз практически подобна кривой насыщения магнита и поэтому не приводится.

Для вычислений полей использовалась программа расчета значений векторного магнитного потенциала на двумерной неравномерной прямоугольной сетке, работающая на ЭВМ ОДРА-1305.

Поперечные сечения линз представлены на рис.28. На рис.29 показана торцевая коммутация шин малой линзы. Тот же принцип коммутации использован в конструкции большой линзы.

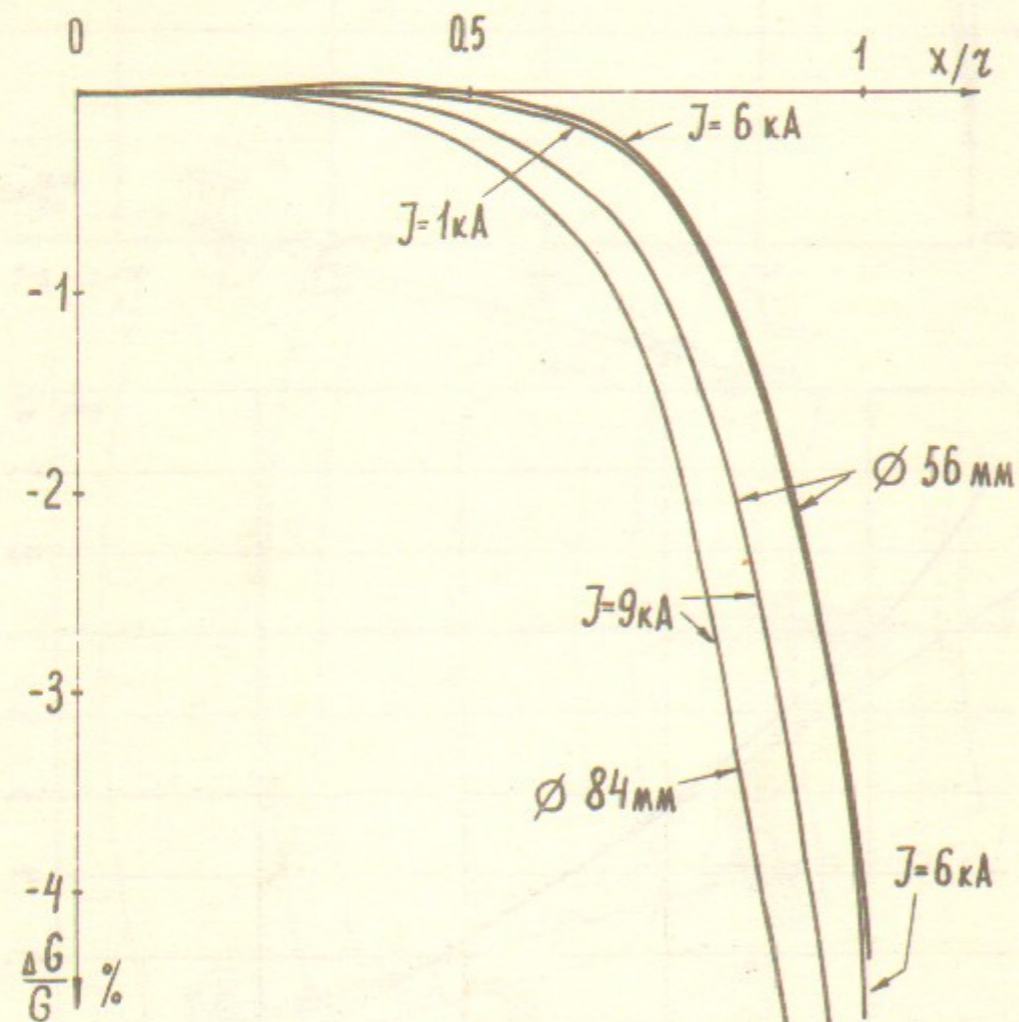


Рис.27 Расчетная неоднородность градиента поля в линзах.

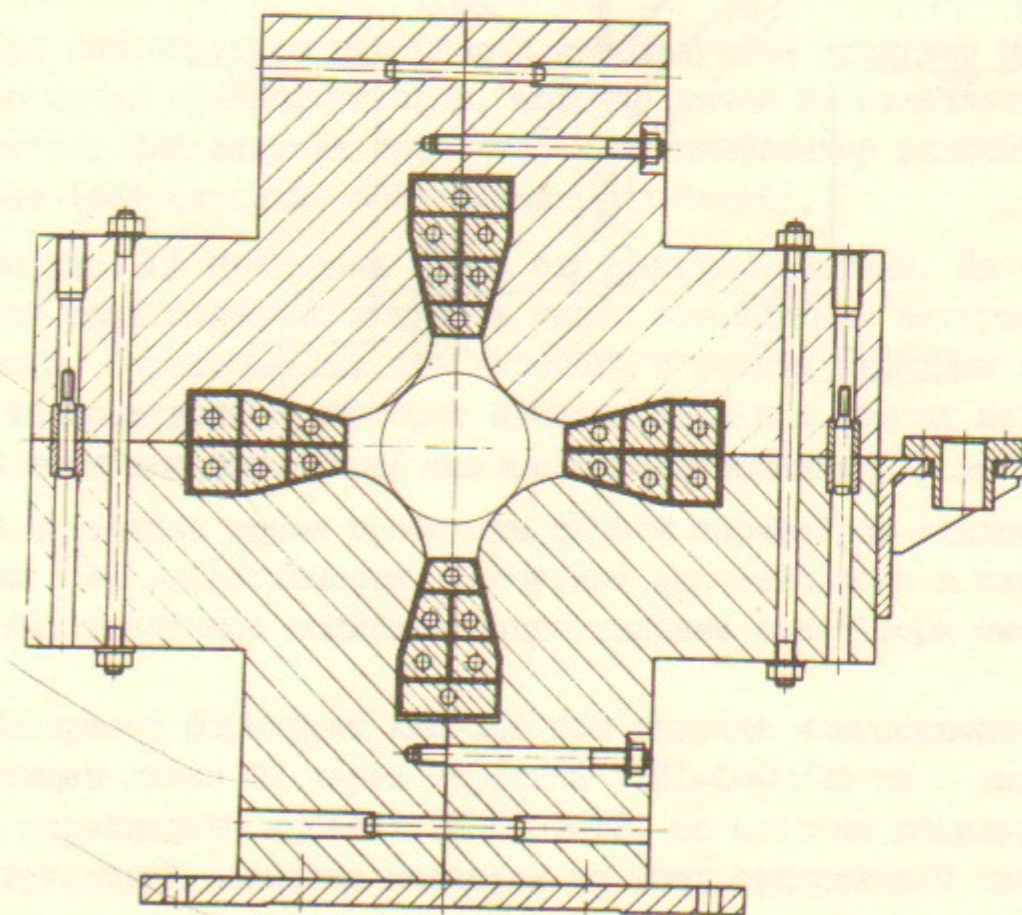
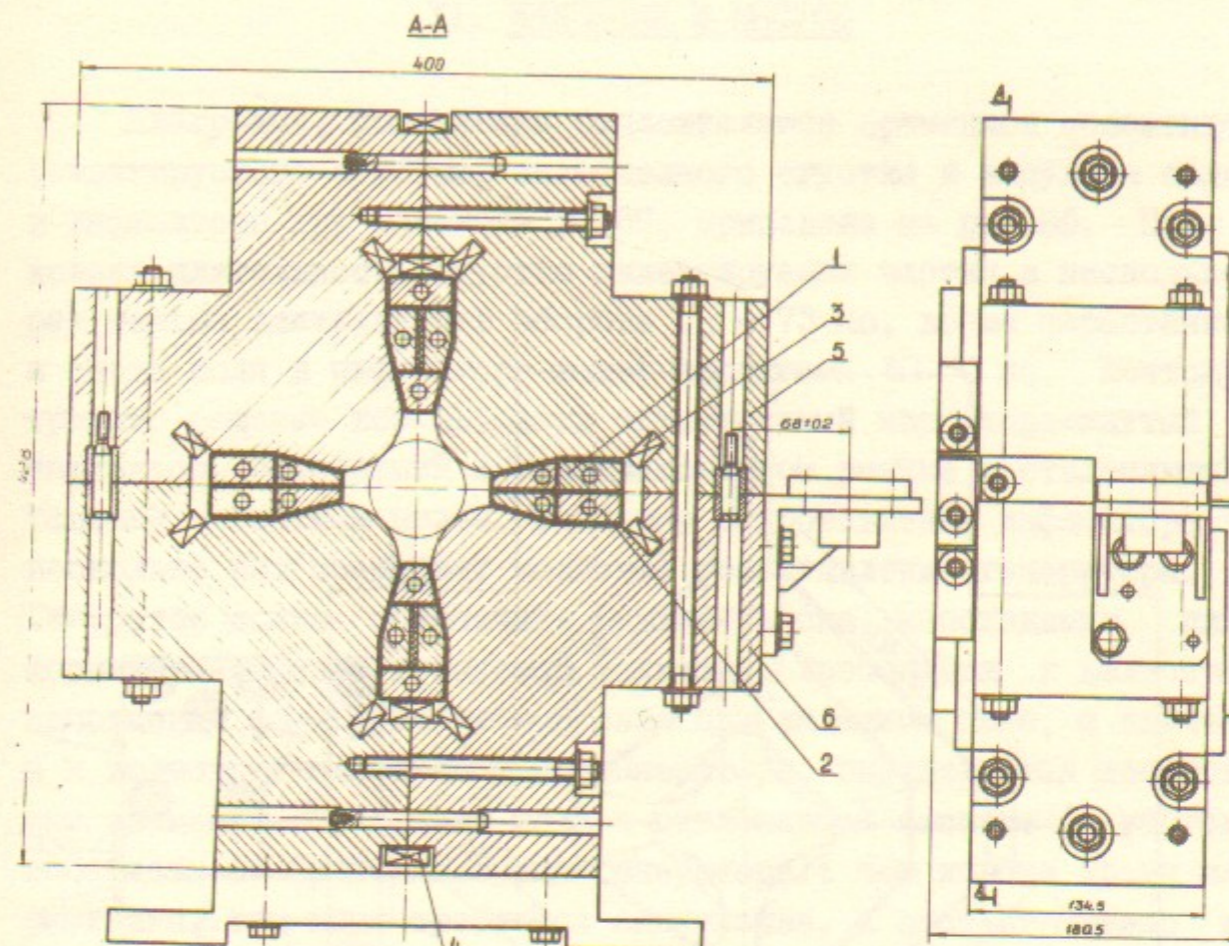


Рис.28 Поперечные сечения малой и большой линз.

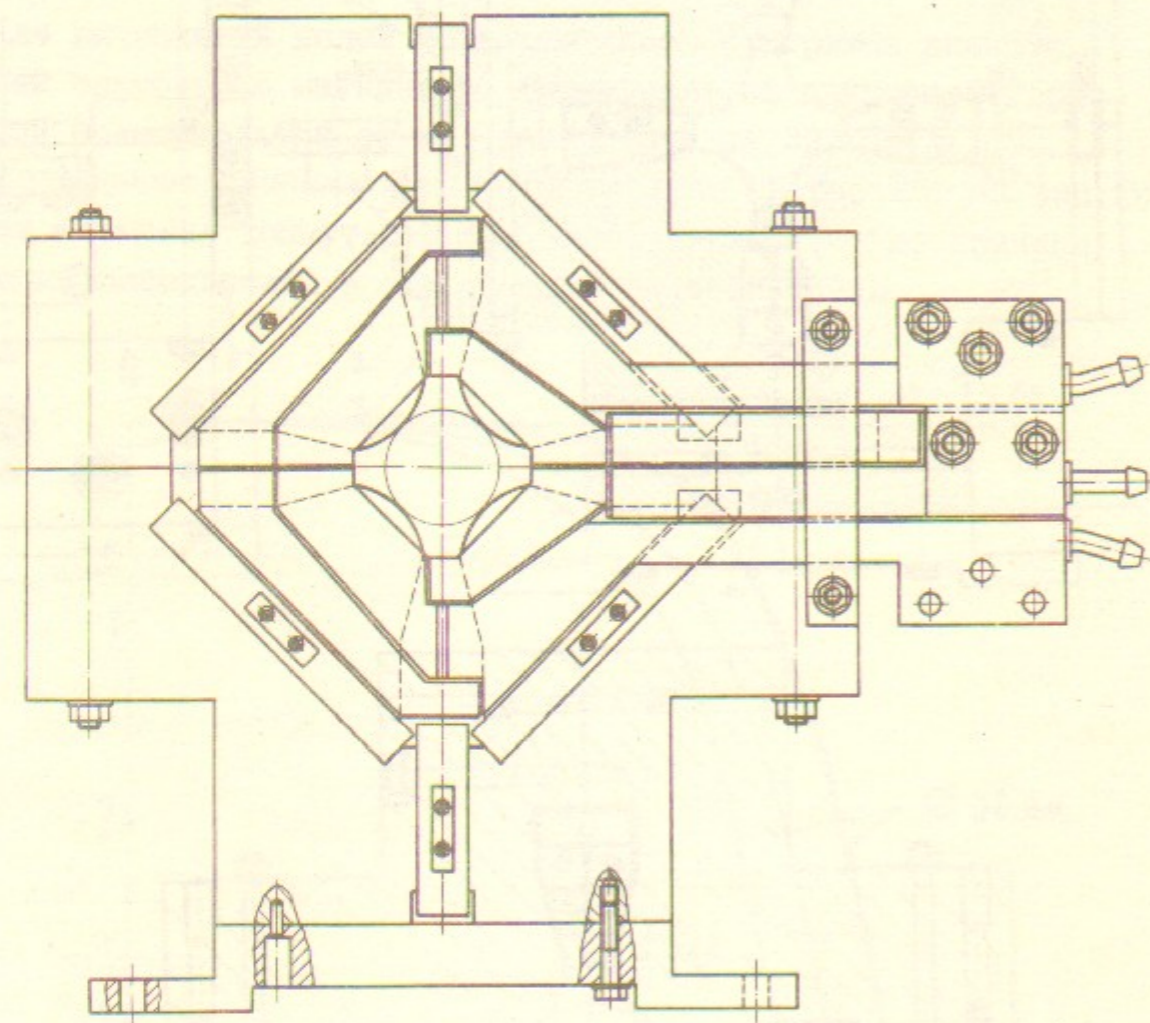


Рис.29 Торцевая коммутация шин малой линзы.

У1. ИНЖЕКЦИЯ И ВЫПУСК

Диаграмма, поясняющая относительное временное положение инжектируемого сгустка, накопленного сгустка и импульса поля в инфлекторе при инжекции в БЭП, приведена на рис.30. Поскольку длительность сгустка инжектируемых частиц в несколько раз меньше длительности оборота $T_0 = 73$ нс, время нарастания и спада поля в инфлекторе может достигать 40-50 нс. Поэтому принято решение использовать симметричный короткозамкнутый инфлектор, работающий в несогласованном режиме и отклоняющий частицы магнитным полем. Волновое сопротивление инфлектора в несколько раз превышает волновое сопротивление генератора. Генератор должен обеспечить величину тока, необходимую для формирования поля требуемой величины. Требования к величине напряжения формируемого импульса при заданном поле, а значит и к волновому сопротивлению генератора, определяются допустимым временем нарастания тока в отклоняющей системе (с учетом собственного фронта и среза генератора): чем короче время нарастания, тем выше требуется напряжение, а соответственно и волновое сопротивление.

При многократном накоплении используется предудар накопленного пучка прединфлектором, который ничем не отличается от инфлектора. Для выпуска инфлектор и прединфлектор включаются синфазно (относительно бетатронных колебаний).

На рис.31 приведена схема отклоняющей системы. На входы подаются разнополярные импульсы через согласующие нагрузочные резисторы. Переполюсовка при переходе с режима инжекции электронов на позитроны и наоборот производится при помощи механических коммутаторов.

В настоящее время проведены оценки параметров отклоняющей системы и её эффективности. Расчетные значения тока в пластинах 2 кА, требуемое волновое сопротивление генератора около 6 Ом.

Генератор формирует импульс при разряде искусственной формирующей линии ФЛ через тиратрон ТГИ-1000/25 на 8 включенных параллельно кабелей РК 50-9-12, по которым импульс через нагрузочный резистор подается на ввод отклоняющей системы.

Зарядное напряжение ФЛ 25 кВ. Импульс противоположной полярности формируется другим таким же генератором, отличающимся лишь полярностью зарядного напряжения и подачей накала и запуска тиратрона под высокое напряжение. Анод тиратрона при этом заземлен.

Макет генератора, формирующего отрицательный импульс (катод тиратрона заземлен) изготовлен и испытан. Осциллограмма импульса приведена на рис.33. При зарядном напряжении 25 кВ на согласованной нагрузке получен $2 \cdot 10^7$ импульсов на частоте 150 Гц. Генератор остался работоспособным.

Параллельно ведется проработка варианта системы на основе генератора с двойной формирующей линией (ДФЛ) без механического коммутатора. В отличие от обычной схемы генератор содержит не один, а два тиратрона, запускаемых поочередно в зависимости от требуемой полярности выходного импульса. Переполюсовка производится переключением запускающего импульса на вход соответствующего тиратрона. Генератор по такой схеме работает на выпуске из ВЭШ-3.

Схема питания отклоняющей системы от генератора на ДФЛ приведена на рис.32. В этом варианте формируется импульс амплитудой 25 кВ на нагрузке 25 Ом, т.е. амплитуда тока составляет 1 кА. Для получения тока в пластинах 2 кА к её входу подключается в параллель два модуля генератора посредством кабелей РК 50-17-17 по два кабеля на каждый модуль. Вдвое большее по сравнению с первым вариантом волновое сопротивление генератора позволяет пластины инфлектора запитать последовательно.

На макете такого генератора получен импульс удовлетворительной формы. Работа продолжается.

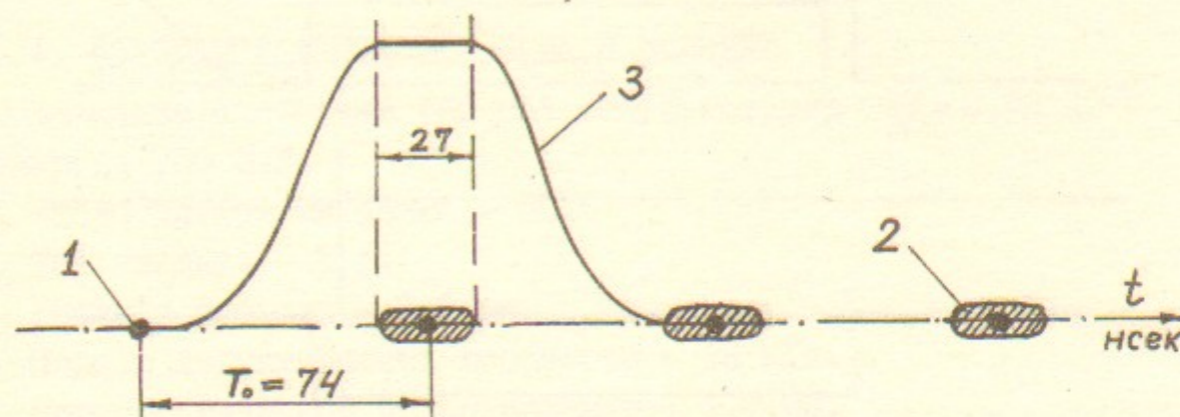


Рис.30 Временная диаграмма инъекции в БЭШ. 1-циркулирующий сгусток, T_0 -время оборота, 2-инжектированная порция частиц, 3-импульс инфлектора.

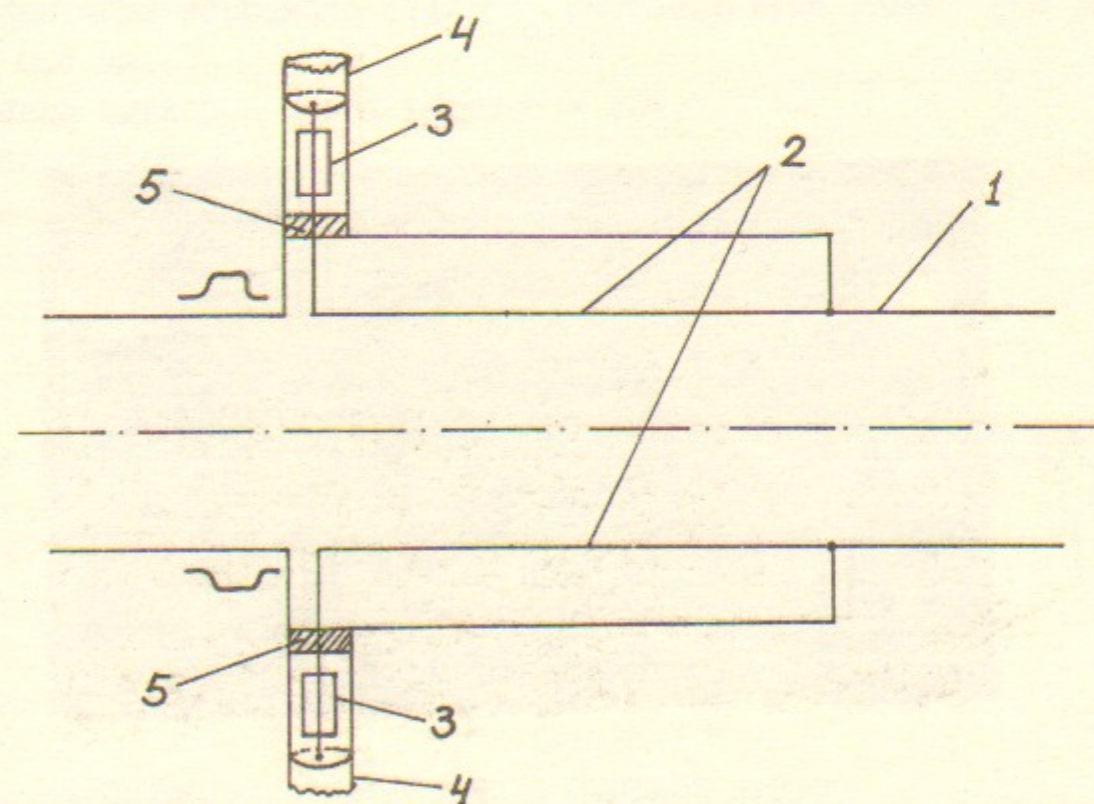


Рис.31 Схема симметричного инфлектора: 1-вакуумная камера, 2-пластины, 3-резистор 6.25 Ом, 4-кабели РК 50-9-12 8шт. параллельно, 5-высоковольтный ввод.

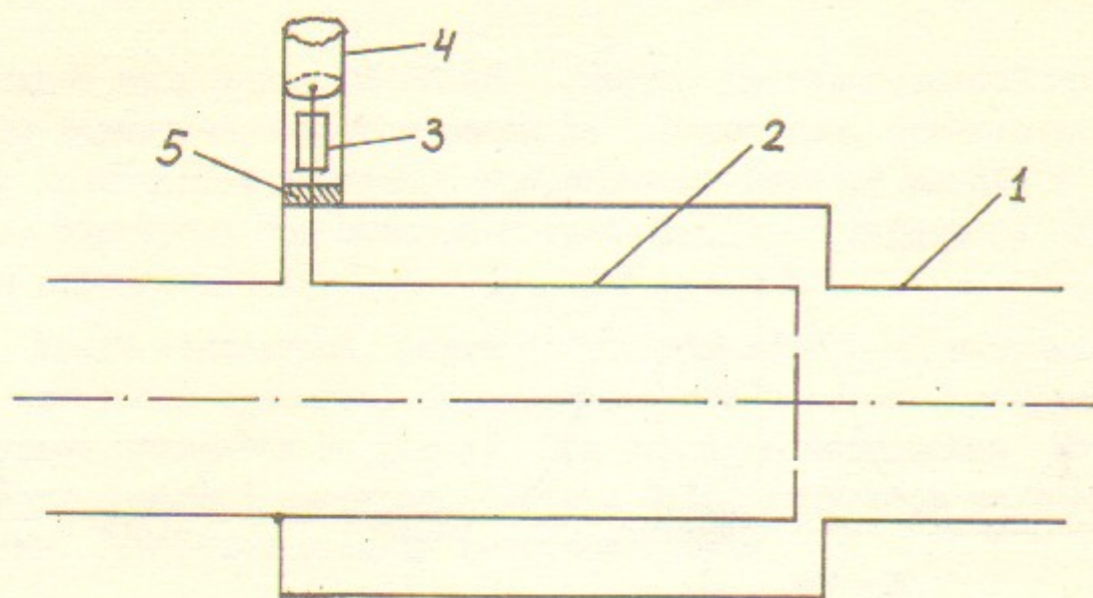


Рис.32 Схема несимметричного инфлектора. 1-вакуумная камера, 2-пластины, 3-резистор 12,5 Ом, 4-кабели РК50-17-17(4 шт.), 5-высоковольтный ввод.

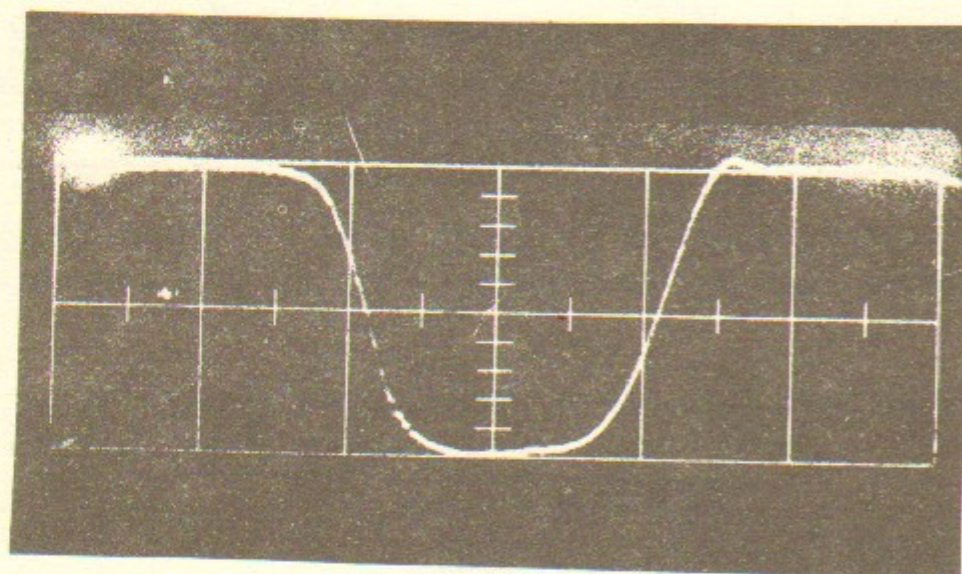


Рис.33 Осциллограмма импульса однополярного генератора. $I=2\text{кА}$, временная шкала 50 нсек/дел., нагрузка 6.25 Ом.

УП. Система коррекций

Общее число корректоров любого типа равно числу периодов магнитной системы, т.е. 12.

1. Коррекция основного поля в магните

Величина коррекции (60 гс) соответствует $\frac{\Delta H}{H} = 0,33 \cdot 10^{-2}$ на энергии 700 МэВ.

Число витков на полюс - 50.

Ток питания - 2 А.

Диаметр провода - 0,8 мм.

Полная индуктивность коррекции - 28 мГн.

Полное омическое сопротивление - 6,4 Ом.

Потребляемая мощность - 26 Вт.

Коррекция укладывается на фасках полюса.

В двух магнитах эти же самые витки коррекции используются для импульсного искажения орбиты перед выпуском.

2. Дипольная коррекция в Z-линзе

Величина коррекции (112 гс) соответствует сдвигу оси линзы на 0,3 мм.

Число витков в одной катушке - 224.

Ток питания - 2 А.

Диаметр провода - 0,8 мм.

Полное омическое сопротивление 8,96 Ом.

Потребляемая мощность - 37 Вт.

3. Квадрупольная коррекция в малой линзе

Величина коррекции 120 гс/см соответствует $\frac{\Delta G}{G} = 3,2 \cdot 10^{-2}$.

Число витков на полюс - 75.

Ток питания - 5 А.

Диаметр провода 1,16+1,27 мм.

Полное омическое сопротивление 3,4 Ом.

Потребляемая мощность - 85 Вт.

4. Квадрупольная коррекция в большой линзе

Величина коррекции 106 гс/см соответствует $\frac{\Delta G}{G} = 4,3 \cdot 10^{-2}$.

Число витков на полюс - 150.

Ток питания - 5 А.

Диаметр провода - $1,16 \pm 0,27$ мм.

Полное сопротивление - 6,8 Ом.

Потребляемая мощность - 170 Вт.

5. Z-секступоль. Устанавливается в промежутке между ϕ и \mathcal{D} линзами.

Секступольный градиент $H'' = 140$ Гс/см².

Диаметр вписанной окружности - 72 мм.

Ширина полюсного наконечника - 30 мм.

Эффективная длина секступоля - 54 мм.

Число витков на полюс - 440.

Диаметр провода - $0,86 \pm 0,95$ мм.

Полное сопротивление корректора - 10 Ом.

Ток питания - 2 А.

Потребляемая мощность - 40 Вт.

6. X-секступоль. Устанавливается на краю прямолинейного промежутка рядом с ϕ -линзой. Интеграл секступольного градиента должен быть равен 400 гс/см, что соответствует примерно 0,25 от интеграла секступольного поля в ϕ -линзе. Конструирование еще не начато.

7. Скью-квадруполь. Устанавливается рядом с Z-секступолем в промежутке между ϕ и \mathcal{D} линзами.

Градиент поля - 140 Гс/см.

Диаметр вписанной окружности - 82 мм.

Ширина полюсного наконечника - 30 мм.

Эффективная длина - 70 мм.

Число витков на полюс - 480.

Диаметр провода - $0,86 \pm 0,95$ мм.

Полное сопротивление корректора - 8 Ом.

Ток питания - 2 А.

Потребляемая мощность - 32 Вт.

УШ. Вакуумная система

Вакуумная система накопителя состоит из 12 вакуумных камер и прямолинейных промежутков. Поперечное сечение вакуумной камеры и чертеж приведены на рис. 34-35

Участок камеры I размещается в поворотном магните; на участке 2 размещаются квадрупольные линзы, корректоры и т.д. Вакуумная камера будет изготовлена из алюминиевого сплава $AMgC$ методом горячего прессования. Такая технология изготовления вакуумной камеры дает следующие преимущества:

1. Можно изготовить вакуумные камеры с минимальным изменением поперечного сечения камеры по длине для уменьшения тенденции к возбуждению высокочастотных мод.

2. Упрощается объединение охлаждаемого приемника излучения и вакуумной камеры в один узел.

3. Алюминий превосходный высоковакуумный материал, обладающий малой скоростью десорбции после технологической обработки. Очистка горячей камеры тлеющим разрядом в среде аргона уменьшает коэффициент газовой десорбции ниже величины, достигаемой после прогрева.

При энергии 700 МэВ и токе пучка e^- 2 А синхротронное излучение (СИ) накопителя характеризуется:

мощностью излучения $P = 32$ кВт,

потоком квантов $\dot{N}_\varphi \approx 1,2 \cdot 10^{21}$ фотон/с,

Величина среднего давления в камере с распределенным газением и откачкой камеры с обоих концов определяется по формуле

$$P_{cp} = q \ell \left(\frac{1}{S_n} + \frac{1}{3u_{\frac{1}{2}}} \right) [\text{торр}]$$

q - коэффициент газоотделения под действием СИ $\frac{\text{л.торр.}}{\text{см.с}}$

ℓ - длина камеры, с которой происходит газоотделение, см

S_n - скорость откачки насоса л/с

$u_{\frac{1}{2}}$ - пропускная способность 0,5 всей длины камеры л/с

В нашем случае $u_{\frac{1}{2}} = 10,6$ л/с

В свою очередь $q = \frac{\dot{N}_\varphi \cdot \beta}{3,3 \cdot 10^{19}}$

\dot{N}_φ - число фотонов, приводящих к десорбции $\frac{\text{ф}}{\text{см}}$

β - коэффициент газоотделения $\frac{\text{мол.}}{\text{ф}}$ (или $\beta \left[\frac{\text{мол.}}{\text{эл.}} \right]$)

Величина $\beta = \lambda/\lambda_c$, где λ_c - квантовый выход.

Величина λ лежит в пределах $0,1 \pm 0,2$ фотоэлектрон/фотон при малых углах скольжения СИ. Для достижения $P_{\text{ф}} = 4 \cdot 10^{-8}$ торр необходимо обеспечить величину $\beta = 2 \cdot 10^{-6}$ молекул/электрон. Достижение такой величины β требует, кроме высоковакуумного прогрева и очистки горячей камеры тлеющим разрядом в среде аргона, длительной выдержки по действием СИ циркулирующего тока в накопителе; при величине дозы СИ облучения $j \sim 3,6 \cdot 10^6$ МА·с на каждый см² облучаемой поверхности требуемая величина β достигается без обработки алюминиевой камеры с тлеющим разрядом.

Каждая вакуумная камера с торцов оканчивается фланцами из биметалла - сплав АМ₄С + сталь 12Х18Н9Т.

Прямолинейные промежутки будут изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. В каждом из них размещаются высоковакуумные магниторазрядный и титановый испарительный насосы; приемник излучения; электрод для обработки поверхности вакуумной системы тлеющим разрядом в среде аргона; для замыкания по в/ч пролетного пространства промежутка устанавливается труба, повторяющая поперечное сечение вакуумной камеры, с продольными щелями для откачки (рис. 36-37).

Соединение вакуумных камер с прямоугольными промежутками осуществляется аргоно-дуговой сваркой.

Вакуумная система накопителя разделяется на отдельные участки пролетными высоковакуумными шиберами. В открытом состоянии пролетное отверстие в шибере повторяет поперечное сечение вакуумной камеры; заслонка шибера находится при этом в уплотненном состоянии для устранения паразитных в/ч колебаний.

Во время обезгаживания вакуумная система откачивается т.н. черновыми магниторазрядными насосами.

Измерение вакуума в накопителе производится по току разряда магниторазрядных насосов с выводом информации на ЭВМ.

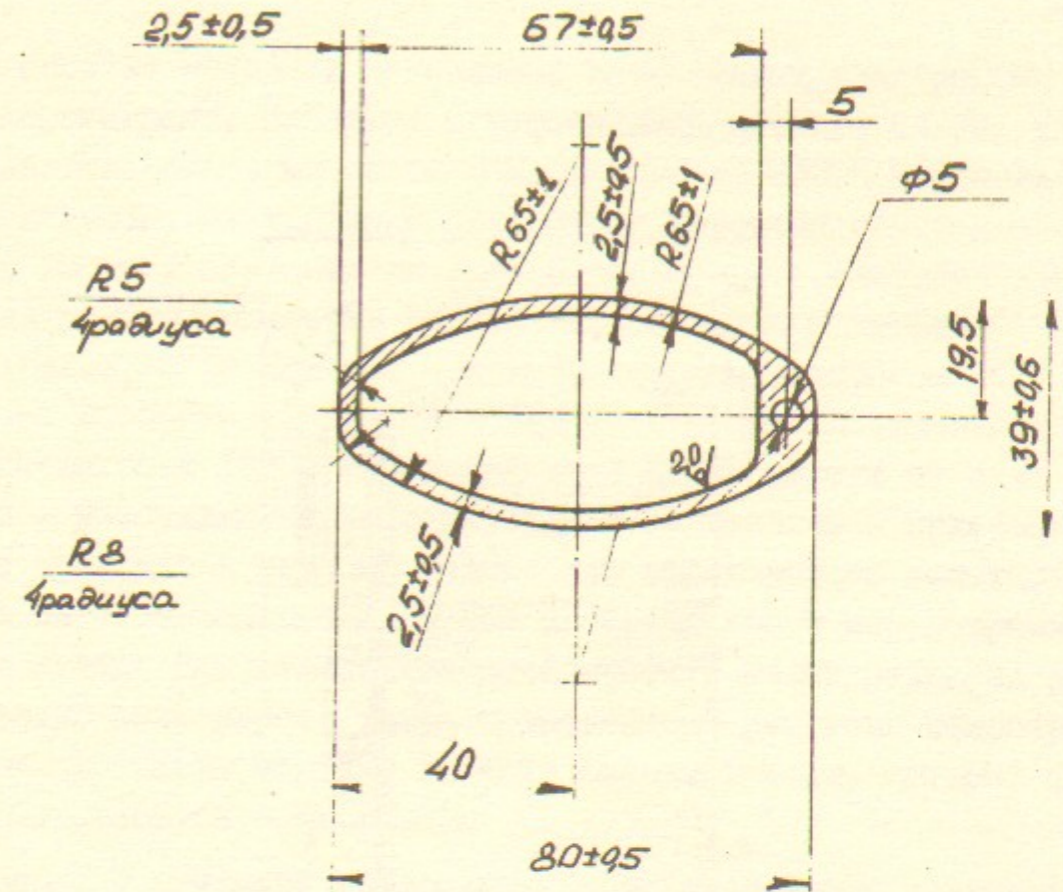


Рис. 34 Поперечное сечение алюминиевой камеры (сплав АМ₄С).

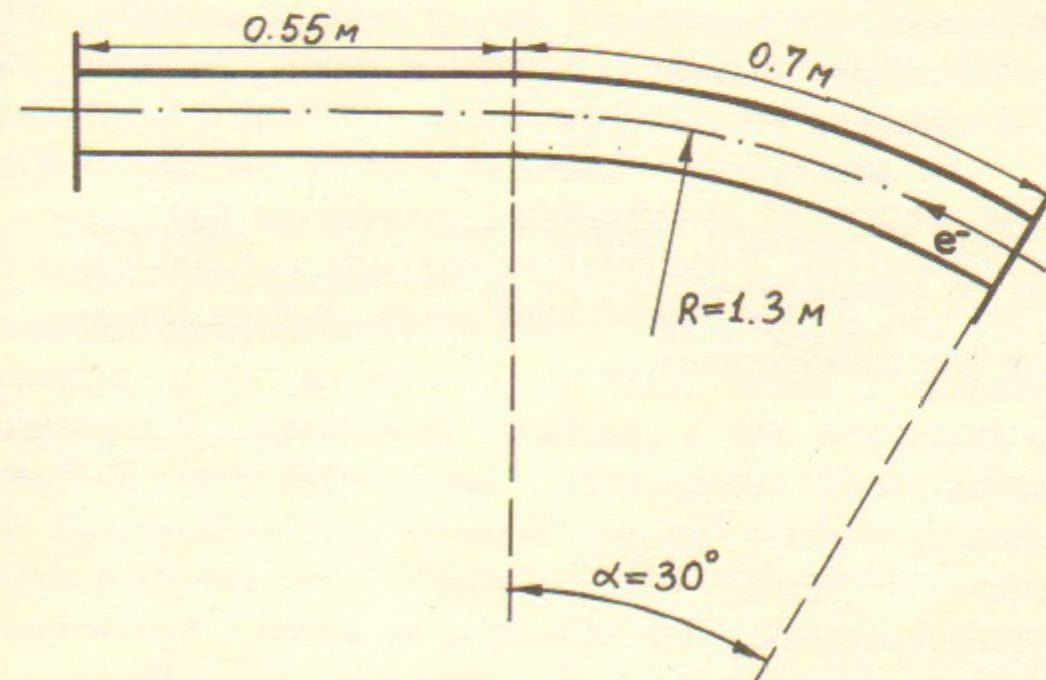


Рис. 35 Алюминиевая вакуумная камера. Вид сверху.

IX. МЕРЫ ПО БОРЬБЕ С КОГЕРЕНТНЫМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ

Отработка методики накопления интенсивных электронных пучков с параметрами, близкими к требованиям проекта ВЛЭШ, является одной из основных задач БЭП. В проекте ВЛЭШ предполагается инжектировать в линейный ускоритель короткий сгусток электронов (10 см в накопителях и 1 см после однопролетного бунчирования) с интенсивностью 10^{12} частиц, с малым эмиттансом $\epsilon_z = 10^{-8}\text{ см}\cdot\text{рад}$, $\epsilon_x = 6 \cdot 10^{-6}\text{ см}\cdot\text{рад}$ и энергетическим разбросом 10^{-3} . Опыт работы на ВЭПП-2 и ВЭПП-3 показывает, что при интенсивностях, приближающихся к 10^{12} , характеристики пучка далеки от этих требований — возбуждаются нестационарные коллективные колебания, которые приводят к резкому увеличению эффективного эмиттansa пучка и энергетического разброса по сравнению с параметрами слабого пучка. При высокой интенсивности и малых размерах пучка серьезную роль играет также приводящее к диффузии некогерентное взаимодействие частиц, то есть эффект Тушека, который здесь не рассматривается — см. раздел III.2.

Основной причиной когерентных возбуждений для ультрарелятивистских пучков является электромагнитное поле, индуцированное летящим пучком на неровностях вакуумной камеры, пластинах впуска-выпуска, ускоряющих резонаторах и прочих компонентах накопителя, нарушающих гладкость окружающей пучок структуры. Сила взаимодействия с этими полями определяет пороговые для тех или иных конкретных типов возбуждений значения интенсивности, инкременты, и в конечном итоге ограничивает возможности накопления интенсивного пучка с заданными параметрами.

Идеальным, с этой точки зрения, окружением пучка была бы гладкая, с неизменным сечением, вакуумная камера из материала с большой проводимостью (во всей полосе частот, присутствующих в спектре пучка, то есть $\lesssim 10\text{ ГГц}$). Вводя для характеристики продольных сил продольный импеданс, а для поперечных сил — когерентный сдвиг бетатронных частот, можно взять характеристики (см. Приложение) этой идеальной камеры в качестве масштаба при оценке роли тех неизбежных нарушений гладкости, которые всегда присутствуют в реальном накопителе по причинам принципиального (ускоряющий резонатор, системы впуска-выпуска) либо конструктивного характера (вакуумные клапаны, сильфоны, сочленения одного

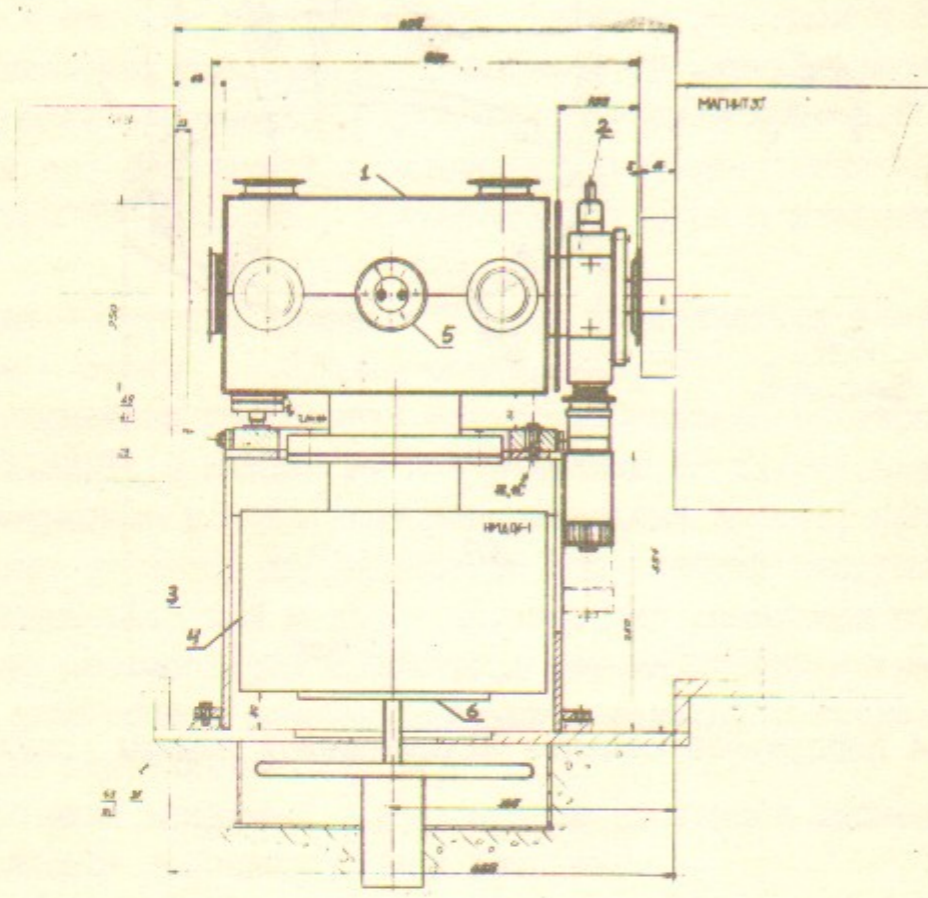


Рис.36 Вид снаружи на прямолинейный промежуток БЭП.
1-корпус промежуток, 2-высоковакуумный шибер, 3-подставка под промежуток, 4-магниторазрядный насос, 5-блок зеркала, 6-домкрат для подъёма насоса.

стандарта ДУ с другим). Устройства диагностики пучка также требуют нарушения гладкости: окна и каналы вывода СИ, пикап-электроды, феррозонд и т.п.

Таким образом, взаимодействие пучка с окружающей его структурой можно минимизировать на этапе конструирования накопителя лишь до некоторого предела. На этапе работы с пучком важно иметь средства диагностики когерентных колебаний (см. раздел X) и способы управления их параметрами:

- усиление некогерентного (радиационного) трения с помощью сверхпроводящих змеек-затухателей;
- регулирование величины и знака квадратичной и кубической нелинейности ведущего поля с помощью достаточного набора коррекций (см. раздел VII), что позволяет использовать режим быстрого затухания либо быстрой расфокусировки когерентного движения;
- перестройка параметров ВЧ-системы (см. раздел XI) и т.д. Можно также использовать специальные согласованные пластины для усиления быстрого затухания коллективных мод. Подобные пассивные воздействия на динамику пучка в БЭП адекватны лишь на низкой энергии, когда эмиттанс и длина сгустка еще велики (см. раздел III). Использование активных широкополосных малошумящих систем с обратной связью, состоящих из чувствительных пикап-станций и многочисленных корректоров, подобных системам стохастического охлаждения, в принципе позволило бы бороться с любыми типами когерентных возбуждений. Однако, создание столь сложных систем подавления для первой очереди БЭП не планируется.

Невыгодное отличие БЭП от накопителей ВЛЭП состоит в том, что инжекция ведется на низкой энергии (≤ 250 МэВ, во всяком случае на первых этапах работы) и невозможно получить достаточно большой радиационный декремент у инжектированного пучка. Таким образом, к чисто ВЛЭП-овским проблемам добавляется еще одна: накопление на низкой энергии и сохранение при ускорении до 700-900 МэВ пучка с интенсивностью $\geq 10^{12}$. Ситуация облегчается тем, что эмиттанс и длина инжектируемого сгустка велики.

При конструировании вакуумной системы БЭП основной акцент сделан на сохранении везде, где возможно, проходного сечения стандартной цельно-алюминиевой вакуумной камеры, проходящей че-

рез магнит и квадрупольный дублет (см. раздел VIII). "Стандартный" прямолинейный промежуток (рис. 37) имеет достаточно плавное расширение поз. 2 для вывода СИ (для диагностики!) из магнита на слабо выступающее зеркало поз. 7; отверстие для вывода СИ в окно снабжено экранирующим патрубком поз. 2. Многочисленные щелевые отверстия откачки поз. 2 дают лишь слабую связь внутреннего объема с резонансными модами большого откачиваемого объема промежутка поз. 1. Электрод для аргонной тренировки поз. 4 плотно прижимается к трубе промежутка. Вакуумный клапан (поз. 2, рис. 36) в открытом состоянии не нарушает непрерывности камеры (см. раздел VIII). Фланцы - развязки поз. 9 снабжены вкладной контактной шайбой, гофры сильфона поз. 5 прикрыты изнутри гибкими полосками, которые соединены сваркой с его фланцами. Внутренняя труба промежутка крепится к фланцам сильфона и вакуумного клапана с помощью зажимов поз. 8. Эти меры должны обеспечить непрерывность продольного тока, индуцированного пучком в вакуумной камере. Такой подход дает возможность локализовать принципиально неустраняемые "источники неприятностей" в нестандартных прямолинейных промежутках.

Нестандартные промежутки впускного и выпускного магнитов содержат ступенчатые изменения сечения под впускаемый пучок, летящий из магнита (рис. 9), и сообщаются с вакуумными объемами каналов впуска-выпуска. Эти неоднородности, возможно, придется прикрыть решеткой из тонких продольных проволок на точечной сварке. Промежутки с пластинами удара и предудара предполагается сконструировать так, чтобы уменьшить коэффициент включения пучка относительно этих несогласованных отрезков длинной линии (рис. 31). Будут рассматриваться варианты конструкции этих промежутков, позволяющие закорачивать инфлекторные линии на корпус по вводу либо по всей длине после инжекции длинного сгустка за время ускорения его до максимальной энергии, на которой и предполагается получать сгусток малой длины и малого эмиттанса. Один из прямолинейных промежутков займет ускоряющий резонатор 2-й гармоники (рис. —), свойства которого вплоть до высоких частот хорошо описываются в приближении радиальной линии с малым зазором.

Рассмотрение электродинамических свойств вакуумной камеры и многочисленных аспектов когерентной устойчивости пучка БЭП

еще не закончено, его предварительные выводы оптимистичны. Наиболее серьезные проблемы, по-видимому, будут связаны с однопролетным взаимодействием интенсивного короткого сгустка с оставшимися неоднородностями, которое может приводить к так называемой *head-tail* неустойчивости со связью мод, действительно наблюдаемой в сравнительно гладких накопителях (например PETRA) и с ростом тока вызывающей вначале увеличение поперечного фазового объема, не сопровождающееся заметными дипольными когерентными колебаниями, а затем и гибель части пучка. Пороговое значение когерентного сдвига и инкремент этой неустойчивости совпадают по порядку величины с безразмерной синхротронной частотой ν_s . В первой очереди БЭП принято довольно низкое значение $\nu_s = 1.2 \cdot 10^{-3}$, и есть опасение, что в будущем придется переходить на другой вариант ВЧ-системы с более высокой кратностью и величиной ускоряющего напряжения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАДКОЙ КАМЕРЫ С КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

В гладкой части камеры БЭП с радиусом апертуры $a \sim 2$ см мощность потерь за счет конечной проводимости $P = 0,5 I^2 R_3$ и амплитуда тормозящего напряжения $U = IR_3$ определяются эффективным сопротивлением:

$$R_3 (\text{Ом}) = 460 \left(\frac{R}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{cl}{2\pi\sigma a^2}},$$

где σ — проводимость, а l — гауссова длина сгустка. Для $l = 10$ см получаем $R_3 \approx 100$ ом. Дополнительная продольная фокусировка эквивалентна приложенному ВЧ напряжению с амплитудой U и длиной волны $\sim 2\pi l$.

Поперечные компоненты наведенных полей, возникающие при отклонении летящего сгустка от оси камеры, приводят к появлению когерентного сдвига бетатронных частот:

$$\Delta\nu_k \approx 0,7 \frac{N_e}{\gamma a^3} \beta \frac{R}{l} \sqrt{\frac{cl}{2\pi\sigma}},$$

что для параметров БЭП дает:

$$\Delta\nu_k \approx \frac{0,018}{\gamma} \cdot I (\text{А}).$$

Х. ДИАГНОСТИКА ПУЧКА

Основным способом измерения параметров пучка избран традиционный для ИЯФ метод регистрации синхротронного излучения. В частности, измерение малого вертикального размера сгустка с целью повышения пространственного разрешения предполагается производить не в видимом свете, а в жестком вакуумном ультрафиолете ($\lambda \sim 100-200 \text{ \AA}$). Эта методика сейчас обрабатывается на накопителе ВЭПП-2М.

Для вывода СИ наружу в прямолинейных промежутках устанавливаются охлаждаемые водой металлические зеркала (рис.37). Стеклообразные окна пропускают видимую часть спектра СИ. Наряду с привычными методами регистрации с помощью ФЭУ, телекамер и диссекторов планируется освоить ПЭС-структуры.

Изучается также возможность использования пикап-электродов слабо связанных с пучком.

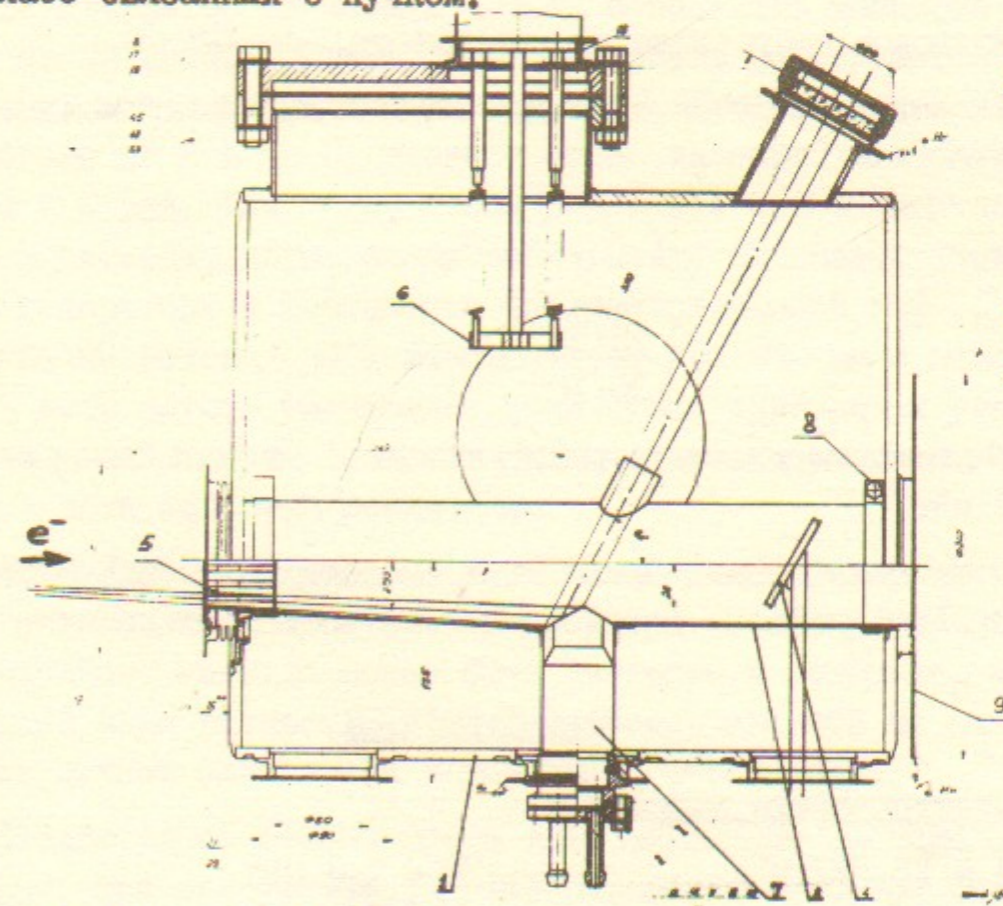


Рис.37 Горизонтальный разрез промежутка. 1-корпус, 2-перфорированная внутренняя камера, 3-окно вывода СИ, 4-выводной электрод газовой очистки, 5-фальшсильфон, 6-распылитель титана, 7-зеркало

XI. ВЧ СИСТЕМА БЭП

Кратность частоты ускоряющего напряжения $q = 2$.

Частота ускоряющего напряжения $f = 26,826$ МГц.

Отношение частоты обращения частиц в БЭП к частоте в ВЭП-2М 4:5.

Энергия инъекции в БЭП электронов $E = 250$ МэВ, позитронов $E = 125$ МэВ. Ускоряющее напряжение при этом $U = 30$ кВ.

Максимальное ускоряющее напряжение $U = 50$ кВ.

Ток пучка $I_n = 2$ а.

Радиационные потери частиц на оборот при $E_{max} = 700$ МэВ $\Delta E = 17$ кэВ.

Ток частиц, инжектируемый за один выстрел $\Delta I_n = 0,2$ а.

Частоты синхротронных колебаний $F = 13-25$ кГц.

Волновое сопротивление резонатора $\rho = 25$ Ом.

Перестройка резонатора для компенсации реактивного сопротивления пучка

$$\Delta f = -f \frac{\rho \cdot I_n}{U} =$$
$$= -27 \cdot 10^6 \frac{25 \cdot 2}{30 \cdot 10^3} = -44 \text{ кГц.}$$

Максимальная мощность, потребляемая от в.ч. генератора $P = 42$ кВт.

Мощность, потребляемая от в.ч. генератора при инъекции $P = (2,5 \pm j6)$ кВт.

Резонатор БЭП

Электрические параметры

$f = 26,827$ МГц	$P = 7,8$ кВт
$\rho = 25$	$\Delta f = \pm 2\% = \pm 0,54$ МГц
$Q = 6,5 \cdot 10^3$	$R = 160 \cdot 10^3$
$U = 50$ кВ	

Скорость перестройки частоты резонатора
 $8,2$ кГц/сек = 2 полосы/сек.

Размеры резонатора габаритные:

наружный диаметр $\phi 850$ мм
длина по фланцам 550 ± 570 мм
ускоряющий зазор 16 мм.

Резонатор вакуумный. Медный резонатор помещается в объем из нержавеющей стали. Перестройка рабочей частоты осуществляется с помощью прогиба торцевых медных дисков. Предусматриваются специальные механизмы для перестройки высших мод резонатора. Связь с генератором по существующему фидеру $\phi 300$ х $\phi 110$ мм с волновым сопротивлением 60 Ом. Трудоемкость резонатора 8000 н/ч.

ВЧ генератор

ВЧ генератор на 27 МГц должен обеспечить мощность в нагрузке около 45 кВт. Примерно $1/5$ мощности рассеивается в резонаторе, остальная забирается пучком. При изменении тока в накопителе от 2 а до 0 , входное сопротивление резонатора меняется в 5 раз. Для того, чтобы исключить перегрузку ламп выходного каскада, длина линии связи между эквивалентными сечениями генератора и резонатора выбирается равной $n \frac{\lambda}{2}$, а напряжение на резонаторе поддерживается неизменным с помощью АРУ. В этом случае уменьшение тока пучка приводит к уменьшению тока возбуждения выходного каскада, а напряжение на анодах его ламп остается неизменным.

АЧХ ускоряющей системы, при такой длине фидера, такая же, как у одиночного колебательного контура. Поэтому анодный контур выходного каскада может быть настроен в резонанс, а отрицательный знак разности ($R^+ - R^-$) обеспечивается за счет расстройки пучком накопителя ускоряющего резонатора.

Защита ввода резонатора и ламп выходного каскада от перегрузки, при расстройке резонатора, обеспечивается системой управления, понижающей уровень возбуждения при достижении критических уровней. Предполагаемая трудоемкость изготовления:

а) ВЧ - тракт генератора	5000 н/ч.
б) Питание и защита	2000 н/ч.
в) Фидерный тракт	1000 н/ч.

XII. Моделирование движения частиц в накопителе

Необходимость компенсации хроматизма заставляет вводить в линейную фокусирующую структуру нелинейные (прежде всего секступольные) поля. Однако, исправляя хроматизм малых колебаний, нелинейные поля могут нарушить устойчивость движения частиц с большими бетатронными отклонениями. С увеличением жесткости фокусировки эта опасность возрастает. Сделаем простую оценку размера области устойчивости в нашем случае. При пролете сквозь секступоль частица получает угол:

$$\Delta X' = \frac{H'' \ell}{HR} \cdot \frac{X^2}{2} \quad (1)$$

где X — отклонение частицы. Так как $H'' = H'/\ell$ то (1) можно переписать в виде:

$$\Delta X' = \frac{X^2}{2\ell f} \quad (2)$$

Здесь f — фокусное расстояние линзы с градиентом H' и второй производной H'' , хроматизм которой компенсируется секступольным полем. Если X настолько велико, что $\Delta X'$ сравнимо с угловым размером фазового эллипса X/β , то движение становится неустойчивым. Таким образом, получаем оценку:

$$X_{\max} \approx \frac{\ell}{2} \frac{2f}{\beta} \quad (3)$$

В нашем случае $\beta/f = 6$ (для стандартной ФОДО-структуры $\beta/f = 4,82$ при $\Delta \mu = \frac{\pi}{2}$), поэтому окончательно получаем:

$$X_{\max} \approx \frac{\ell}{3} \quad (4)$$

Результаты численного моделирования влияния секступолей на движение частиц в накопителе БЭИ хорошо согласуются с приведенной выше оценкой, если рабочая точка выбрана вдали от целочисленных резонансов. Вблизи значений $\nu_x = 3$, $\nu_x = 4$ зона устойчивости резонансно сужается, вплоть до нуля. Для $\nu_x = 3,06$, например, $X_{\max} = 4,3$ см. Рабочая точка БЭИ-а $\nu_x = 3,61$ лежит далеко от целых резонансов, поэтому даже искажения формы фазового эллипса в нашем случае весьма невелики (для амплитуд $X \approx 2$ см-около 5%).

Тем не менее ограничение (4) необходимо иметь в виду при конструировании более жестких накопителей, т.к. дисперсионная функция быстро падает с ростом ν : $\ell \approx R_0/\nu^2$.

Наличие секступолей приводит к появлению связи поперечных колебаний, возникающей из-за искажений орбиты в вертикальном направлении. Поскольку рабочая точка выбрана вдали от резонансов связи, то аналитические оценки, основанные на однорезонансном приближении, здесь несправедливы.

Для определения величины бетатронной связи, как и при изучении устойчивости движения на больших амплитудах, использовалась программа, изучающая пооборотное прохождение частицы через элементы накопителя. Вводилось искажение орбиты с помощью одиночного корректора, такое, что среднеквадратичное отклонение в линзах при этом составляло 1 мм, а максимальное — 1,5 мм. Полученная при этом величина связи составила:

$$\mathcal{X} \equiv \sqrt{\frac{\beta_x \langle A_z^2 \rangle}{\beta_z \langle A_x^2 \rangle}} = 1,3 \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

Здесь $\langle A_{x,z}^2 \rangle$ — среднеквадратичное отклонение частицы по X или Z , соответственно. Начальные условия по Z были нулевыми.

Для того, чтобы учесть вклад в вертикальный эмиттанс от вертикальной дисперсионной ℓ_z -функции, генерируемой секступолями при наличии в них вертикальных искажений орбиты, использовалась программа В.Н.Литвиненко [1], рассчитывающая параметры ускорителя со связью. Поскольку данная программа оперирует только с линейными элементами фокусирующей структуры, то для того, чтобы учесть вклад секступолей в связь колебаний в местах их расположения вводились "повернутые" квадрупольные с эффективным градиентом $G = \frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial z} \cdot \Delta z$ где $\frac{\partial^2 B_x}{\partial x \partial z}$ — сила секступоля, Δz — вертикальное отклонение орбиты в секступоле.

Полученная таким образом связь составила $\mathcal{X} = 5,6 \cdot 10^{-2}$. Сравнивая эту величину с полученной выше (5), видим, что основной вклад в вертикальный эмиттанс в данном случае вносит вертикальная дисперсионная функция. Для возможности управления величиной связи предусмотрена система из 12 повернутых квадруполей (по одному на элемент периодичности), стоящих между квад-

рупольными линзами. Возможности такой системы существенно меньше, чем используемой на ВЭП-2М, однако и требования к ней гораздо меньше, поскольку на БЭП-е расстройка от резонансов связи на порядок больше, чем на ВЭП-2М и по-видимому для БЭП-а более актуальной может оказаться возможность увеличивать связь для улучшения времени жизни.

Л и т е р а т у р а

Г. В.Н.Литвиненко, Е.А.Переведенцев. "Расчет параметров пучка в накопителях со связью колебаний". Труды УИ-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, стр.285, Дубна, 1978.

ХIII. Новый этап автоматизации комплекса ВЭП-2М

Для управления установок БЭП - ВЭП-2М предполагается следующая структура системы управления:

- Центральная ЭВМ - Одра-1305
- Периферийные процессоры - крейт-контроллеры "Одренок" -
- 6+8 шт.

- Контрольно-управляющая аппаратура - в основном в стандарте КАМАК - до четырех-пяти крейтов на каждый периферийный процессор. Подключение дополнительных крейтов к "Одренку" предполагается по стандарту "Системы связи" (блок связи ЕС и крейт-контроллер СС-М).

Предполагаемое разделение задач между периферийными процессорами:

- Управление импульсными установками (ИЛУ, БЗ-М, каналы, Впуск-Выпуск) и системой синхронизации,
- Управление системами питания и ВЧ БЭПа,
- БЭП-контроль параметров пучка, исследовательские задачи,
- Управление ВЭП-2М,
- Контроль и обслуживание аварийных ситуаций (термоконтроль, дозиметрия, контроль вакуума и т.д.),
- Контроль параметров пучка в Б-3М, каналах.

Предполагается работа периферийных процессоров в многопрограммном режиме (под операционной системой) с использованием в качестве внешней памяти дисков центральной машины.

Управление периферийными процессорами, выполняющими технологические функции, возможно с помощью терминалов, подключенных к центральной ЭВМ (до 4-х терминалов). Процессоры для экспериментальных задач; а также технологические - на время наладки и запуска установки - предполагается снабдить местными терминалами (до 4-х на каждый "Одренок") - всего 10+12 терминалов на всей установке.

В будущем, по мере разработки, предполагается осуществить прямую связь между периферийными процессорами и оснастить их внешней памятью ("твердотельные диски", 128к слов).

НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО ВЭП

Рабочие материалы

Работа поступила - 19 июля 1983 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 17.08.83г. МН 03307

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.3,2 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.

Тираж 25 экз. Бесплатно. Заказ № 98

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90