

Р009303284



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.В. Анашин, С.А. Беломестных, А.Н. Ворошилов,
Б.И. Гришанов, А.А. Диденко, Н.С. Диканский,
М.Н. Захваткин, В.Я. Корчагин, Н.А. Кузнецов,
И.В. Купцов, В.А. Лебедев, П.В. Логачев,
С.И. Мишнев, А.Ю. Носарев, В.В. Пархом'ук,
С.В. Тамбовцев, В.Е. Якименко

НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ
ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
ВЭПП-5

ИЯФ -- 92-44.

ИЯФ 92-44



НОВОСИБИРСК

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. БУДКЕРА, СО РАН

**В.В. Анашки, С.А. Беломестных, А.Н. Ворошилов,
Б.И. Гришанов, А.А. Диденко, Н.С. Диканский,
М.Н. Захваткин, В.Я. Корчагин, Н.А. Кузнецов,
И.В. Купцов, В.А. Лебедев, П.В. Логачев,
С.И. Машнев, А.Ю. Носарев, В.В. Пархомчук,
С.В. Тамбовцев, В.Е. Лкименко**

НАКОПИТЕЛЬ-ОХЛАДИТЕЛЬ
ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
ВЭПП-5

ИЯФ 92-44

НОВОСИБИРСК
1992

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разворачиваются работы по созданию нового поколения коллайдеров, характеризующихся предельно высокой интенсивностью взаимодействующих пучков заряженных частиц, так называемых Ф- и Б- фабрик. В рамках этого проекта необходимо создание нового инжекционного комплекса, обеспечивающего достаточный темп накопления позитронов. функционально инжекционный комплекс состоит из линейного ускорителя с $\lambda_{rf} = 10.7$ см и энергией частиц на выходе 510 МэВ и накопителя-охлаждителя на эту же энергию. Электронный и позитронный пучки, ускоренные линейным ускорителем, захватываются поочередно в накопитель, охлаждаются в нем, уменьшая за счет радиационного трения свои поперечный и продольный фазовые объемы, и выпускаются для дальнейшего ускорения в линейном ускорителе с длиной волны $\lambda_{rf} = 2$ см, либо для инжекции в Ф-фабрику. Для получения предельно высокой светимости порядка $10^{33} - 10^{34}$ в Ф- и Б- фабриках и одновременной инжекции в электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М (доускоряя пучок в линейном ускорителе либо через бустер ВЭПП-3) требуется обеспечить накопление, охлаждение и выпуск электронных и позитронных сгустков с частотой 1 - 4 Гц и числом частиц $2 \cdot 10^{10}$.

Накопитель-охлаждитель представляет из себя накопительное кольцо, зеркально симметричное относительно двух перпендикулярных осей. Магнитная структура накопителя включает в себя четыре квадранта, магнитные элементы каждого из которых запитаны последовательно с аналогичными в другом квадранте. Полярность магнитного поля накопителя не меняется, электроны и позитроны инжектируются (и выпускаются) в противоположных промежутках и вращаются в накопителе в противоположных направлениях. Полный цикл работы с частицами одного знака занимает 1 с (хотя предусматривается возможность работы с большей частотой - до 4 Гц), после примерно 40 тактов инжекции следует пауза, необходимая для охлаждения накопленного пучка. Затем происходит перестройка режима накопителя для выпуска (в течение 25 мс), выпуск, возврат к режиму инжекции (15 мс). Инжекция частиц в накопитель и выпуск их из него осуществляются с помощью системы электронно-оптических

каналов, структура и необходимое число элементов в которых определяются физическими требованиями на пучок, а также конкретным местом расположения инжекционного комплекса.

1. СТРУКТУРА НАКОПИТЕЛЯ

Структура накопителя разрабатывалась с учетом требований, определяемых конкретной схемой инжекции в накопительное кольцо ВЭПП-5. В частности, предполагаемая инжекция электронных и позитронных сгустков в линейный ускоритель с ускоряющей структурой, аналогичной разрабатываемой для проекта ВЛЭПП с $\lambda_{\text{гг}} = 2$ см, требует иметь на выходе из накопителя сгусток длиной $\sigma_1 = 0.4$ см, с тем, чтобы, используя схему группирователя, сжать сгусток до размеров $\sigma_1 = 0.04$ см, что необходимо для устойчивой инжекции в линейный ускоритель. Кроме того, высокая частота инжекции в накопитель делает проблематичным использование импульсных септум-магнитов, а малое время перехода с одного сорта частиц на другой ($t < 1$ с) и необходимость частого повторения данной процедуры в случае работы на большое количество установок делает нежелательным использование схемы переполняемого накопителя. Эти соображения были учтены при разработке его конкретной схемы.

Магнитная структура накопителя зеркально-симметрична относительно двух взаимно-перпендикулярных осей, проходящих через центры коротких и длинных прямолинейных промежутков, и состоит из четырех квадрантов. Каждый квадрант содержит элементы основной магнитной структуры с постоянным питанием, корректоры с постоянным питанием, и две пары корректоров с импульсным питанием, обеспечивающих выпуск пучка. В таблице 1.1 представлены основные параметры накопителя-охладителя и параметры пучка на входе и на выходе из накопителя, а на рисунке 1 изображены флюке и дисперсионные функции для одного квадранта накопителя. Дисперсионная функция зануляется в коротких и длинных прямолинейных промежутках, что полезно с точки зрения экономии апертуры вакуумной камеры при инжекции и позволяет избежать синхро-бетатронных резонансов в резонаторах. Кроме того, это позволяет иметь малую величину коэффициента уплотнения орбиты α , что полезно для уменьшения продольного размера сгустка.

Выбранная рабочая точка $Q_x = 4.78$, $Q_z = 2.86$ была оптимизирована с целью получения максимальной динамической апертуры и лежит вдали от целочисленных и суммовых резонансов низкого порядка.

Расчетные фазовые объемы инжектируемых в накопитель электронных и позитронных пучков равны 1.5 мрад·см по вертикали и по горизонтали. Адмитансы накопителя выбраны равными 10 мрад·см и 4 мрад·см по горизонтали и по вертикали соответственно, что позволяет надеяться иметь устойчивую инжекцию.

Выбранная схема инжекции предполагает использование вертикальных септум-магнитов с постоянным магнитным полем и радиального удара кикера. Такая схема выглядит экономичнее по сравнению со схемой с вертикальным ударом кикеров, т.к. при этом существенно экономится вертикальная апертура вакуумной камеры в поворотных магнитах. С другой стороны, зануление горизонтальной дисперсионной функции в прямолнейных

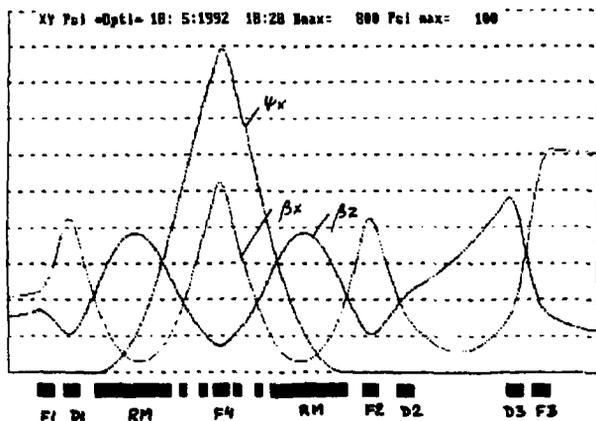


Рис. 1. Флоке и дисперсионные функции квадранта накопителя-охладителя.

промежутках не приводит к увеличению размеров пучка и, соответственно, зазора между пластинами кикеров из-за энергетического разброса в сгустке.

На выходе септум-магнита накопленный и инжектируемый сгустки находятся в medianной плоскости по разные стороны ножа септум-магнита. Используется однооборотная инжекция с предупреждением. При этом накопленный пучок сдвигается к ножу септум-магнита на край апертуры ударом прединфлектора, расположенного симметрично к инфлектору относительно середины септум-магнита на расстоянии половины горизонтального бетатронного колебания. После удара инфлектора накопленный пучок возвращается на равновесную орбиту практически без остаточных когерентных бетатронных колебаний, а инжектируемый сгусток осуществляет остаточные затухающие бетатронные колебания относительно накопленного пучка.

При выпуске используется тот же септум-магнит, что и при инжекции, в качестве дефлектора используется прединфлектор. При этом пара импульсных корректоров осуществляет локальное искажение орбиты, за время порядка 25 нс подводя накопленный охлажденный пучок к ножу септум-магнита, который затем ударом дефлектора забрасывается через нож. На рисунке 2 и 3 изображены траектория накопленного и огибающая инжектируемого пучков при инжекции и фазовая диаграмма, поясняющая схему инжекции.

Так как частота инжекции и накопитель-охладитель равна 50 Гц и период T между тактами инжекции равен 20 нс, а постоянная времени затухания вертикальных бетатронных колебаний τ_2 для данной энергии 510 МэВ и данных параметров накопителя составляет величину порядка 17 нс, то для устойчивой инжекции необходимо перераспределить декременты синхротронных и радиальных бетатронных колебаний. С этой целью предполагается использование поворотных магнитов с градиентом. При этом для поля 15.2 кГс в магнитах с градиентом - 0.4 кГс/см декременты синхротронных и радиальных бетатронных колебаний примерно равны между собой. Это позволяет иметь между тактами инжекции около $2 \tau_x$ затухания радиальных бетатронных колебаний, что вполне достаточно для устойчивой инжекции. В принципе предусмотрена возможность уменьшить частоту инжекции в одну сепаратрису при переходе в режим накопления двух сгустков в накопителе. На рис. 4 изображена схема накопителя-охладителя.

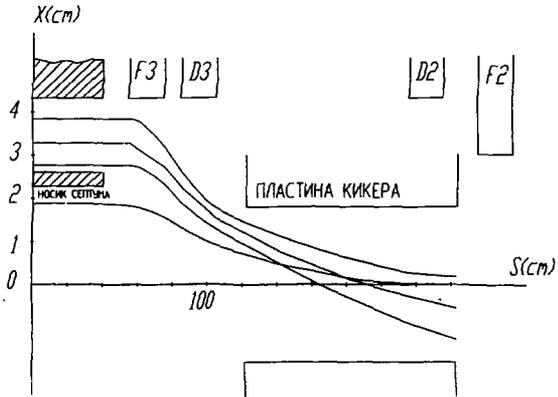


Рис. 2. Траектории пучков при инжекции.

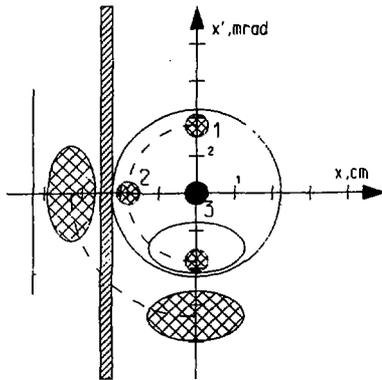


Рис. 3. Фазовая диаграмма движения пучков при инжекции: 1 - пучок после удара преинфлектора, 2 - у кола септум-магнита, 3 - после удара инфлектора.

Таблица 1.1. СПИСОК ПАРАМЕТРОВ.

Энергия	E	510 МэВ
Периметр	П	2740.11 см.
Ток пучка максимальный	I	35 мА
Число частиц	N	$2 \cdot 10^{10}$
Частота повторений		1 - 4 Гц
Частота обращения	$f_{об}$	10.9375 МГц.
Гармоника ВЧ	q	64
Частота ВЧ	f_{rff}	700 МГц.
Напряжение ВЧ	V_0	800 кВ.
Потеря энергии за оборот	DE	5.3 кВ.
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	α	0.028
Адмитансы :	A_x	10 мрад·см
	A_z	4 мрад·см
Ширина сепаратрисы	DE/E	0.024
Частоты бетатронных колебаний:	$Q_{x,z}$	4.78; 2.86
Частота синхротронных колебаний:	ν_s	0.021.
Хроматизм (естественный):	$C_{x,z}$	-7.66; -4.94
Времена радиационного затухания:	τ_z	17.5 мс;
	τ_x	11.3 мс;
	τ_s	11.9 мс.
Параметры пучка:		
Входные:		
Энергетический разброс	DE/E	1.0 %.
Адмитансы:	$E_{x,z}$	1.5 мрад·см
Продольный размер:	σ_1	2.5 см
Выходные:		
Энергетический разброс	DE/E	.07 %
Адмитансы:	E_x	2.3 мрад·см
	E_z	0.5 мрад·см
Продольный размер:	σ_1	0.40 см
(с учетом эффекта Тушека для связи 0.2)		

2. РАЗМЕЩЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯ

Весь инжекционный комплекс, включающий в себя линак-форнижектор и накопитель-охладитель, размещается в 13-м здании, на глубине -4.6 м относительно нуля пола здания. Медянная плоскость накопителя-охладителя, а также выпускные и выпускные электронно-оптические каналы размещаются в плоскости линейного ускорителя на высоте 1000 мм относительно отметки -4.6 м. Электронный и позитронный пучки из линака к накопителю-охладителю доставляются по двум электронно-оптическим каналам для инжекции в двух симметричных длинных прямолинейных прожекторах. Выпускные каналы служат для инжекции электронных и позитронных пучков в Ф-фабрику, также расположенную в 13-м здании, в линейный ускоритель с $\lambda_{rf} = 2$ см, а также для инжекции в канал транспортировки пучков к накопителю ВЗПП-3. (Использование нового инжекционного комплекса могло бы приблизительно на два порядка увеличить скорость накопления позитронов в коллайдере ВЗПП-4М.) На рисунке 5 изображена схема расположения накопителя-охладителя и электронно-оптических каналов.

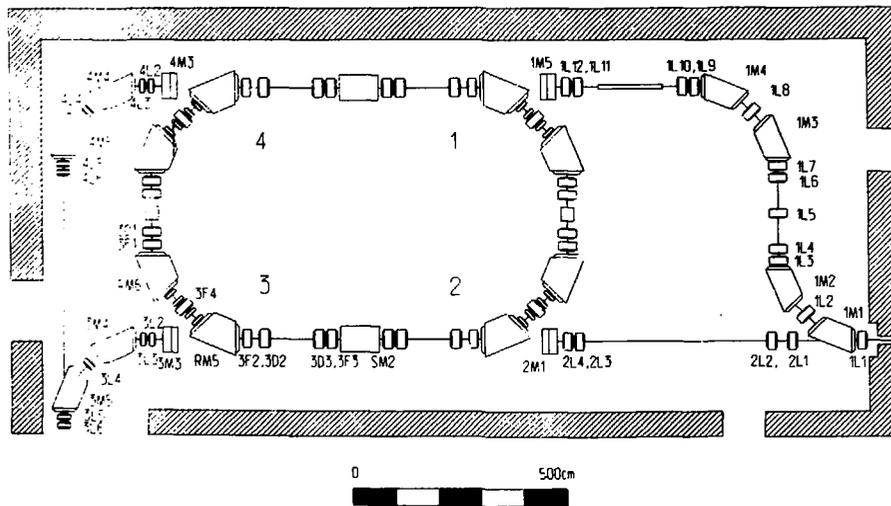
3. ВПУСКНЫЕ КАНАЛЫ

1. Физические требования

Транспортировка электронного и позитронного пучков из форнижектора - линейного ускорителя к накопителю-охладителю осуществляется по двум несимметричным электронно-оптическим каналам (рис 5). При смене сорта частиц магнит IM1, который включен в схему ахроматического параллельного переноса, должен включаться или выключаться за время не более 1 сек. Ниже приводятся параметры пучков на выходе линейного ускорителя.

Таблица 3.1

Энергия	$E = 510$ МэВ
Число частиц в сгустке	$N = 5 \cdot 10^9$
Энергетический разброс	$dE/E = 3.0 \%$
Эмиттансы:	$E_{x,z} = 1.5$ мрад·см;
Продольный размер:	$\sigma_l = 0.4$ см.



Ри 5. Размещение накопителя-охлаждителя.

Электронный и позитронный пучки инжектируются в накопитель-охладитель в противоположных длинных прямолинейных промежутках по вертикали с помощью вертикальных впускных магнитов с постоянным магнитным полем. Для согласования пучков требуется обеспечить нулевую вертикальную и горизонтальную функции дисперсии в месте инжекции в накопитель, а также оптимальные функции флюке. Кроме того, поскольку энергетический разброс позитронного сгустка на выходе лянана слишком велик для эффективной инжекции, для его уменьшения предполагается использовать схему дебанчировки пучка, используя участок магнитной структуры и ускоряющую секцию, аналогичную используемым в линейном ускорителе. Все выше перечисленные факторы, а также конкретная привязка к планируемому помещению сформулировали требования на систему инжекционных каналов накопителя-охладителя.

2. Схема дебанчера

Как уже говорилось, на выходе линейного ускорителя предполагается иметь сгусток с $\sigma_1 \leq 0.4$ см и $\sigma_c = 0.03$. Для эффективного захвата в накопитель-охладитель необходимо иметь энергетический разброс $\sigma_c \leq 0.01$. Уменьшить энергетический разброс на входе в накопитель можно используя схему т.н. дебанчера, который состоит из магнитной структуры, в которой осуществляется модуляция длины сгустка собственным энергетическим разбросом, и ускоряющей секции, в которой ускоряющее напряжение и фаза подобраны таким образом, что происходит уменьшение энергетического разброса сгустка.

Пусть s_0 и ϵ_0 - исходные длина и энергетический разброс частицы. На выходе поворотной магнитной системы имеем:

$$s = s_0 + \psi_s \epsilon_0 \quad 1a$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \quad 1b$$

здесь $\psi_s = \int \psi_x(l) \cdot k(l) dl$ - продольная функция дисперсии, $k(l)$ - кривизна. После прохождения ускоряющей секции:

$$s = s_0 + \psi_s \epsilon_0 \quad 2a$$

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{eV}{E} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (s_0 + \psi_s \epsilon_0)\right), \quad 2b$$

здесь eV - напряжение на ускоряющей секции с учетом

пролетного фактора. E - энергия пучка, λ - длина волны ускоряющего напряжения. Для того, чтобы определить среднеквадратический разброс энергии сгустка на выходе дебаечера, необходимо усреднить по всем ϵ_0 и ϵ_0' .

$$\sigma_{\epsilon}^2 = \left[\epsilon_0 + \frac{eV}{E} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\epsilon_0 + \psi_s \epsilon_0') \right) \right]^2 \quad 3$$

Разлагая синус в ряд и пренебрегая нелинейными поправками получаем:

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{eV}{E} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sigma_{\epsilon 0} \quad 4$$

При $V = 20$ кВ, $E = 510$ МэВ, $\lambda = 10.7$ см, $\sigma_{\epsilon 0} = 0.4$ см имеем $\sigma_{\epsilon \text{ min}} = 0.0092$, При этом $\psi_s = 43.4$ см.

Выбранная схема ахроматического параллельного переноса на четырех магнитах (1M1 - 1M4) и линзах (1L2 - 1L8) позволяет менять величину продольной дисперсии от 15 до 70 см, меняя градиент в линзах. При этом входные и выходные параметры пучка остаются неизменными. На рисунке 6 представлены флоче-функции и дисперсия пучка для случая $\psi_s = 43.4$ см.

3. Икшекция в накопитель

Для эффективного захвата электронного и позитронного сгустков в накопитель-охладитель необходимо обеспечить согласование флоче функций впускаемого пучка с флоче функциями накопителя в месте икшекции, а также обеспечить нулевые дисперсионные функции. Выбранная схема икшекции - по вертикали в септум-магнит с постоянным магнитным полем - позволяет это сделать при помощи схемы т.н. моста, в котором осуществляется параллельный перенос пучка из меданной плоскости накопителя в меданную же с занулением вертикальной дисперсии в месте впуска. Схема моста включает в себя три вертикальных 20-градусных магнита, 20-градусный септум-магнит, являющийся в то же время элементом магнитной структуры накопителя, а также квадрупольную линзу 1L14, которая позволяет занулить дисперсию. При этом ось канала в самой верхней точке выше меданной плоскости накопителя прикмерно на 83 см, что позволяет обойти элементы магнитной структуры накопителя. Схема канала включает в себя также дублиты линз 1L9 - 1L10 и 1L11, - 1L12, которые необходимы для согласования оптических функций

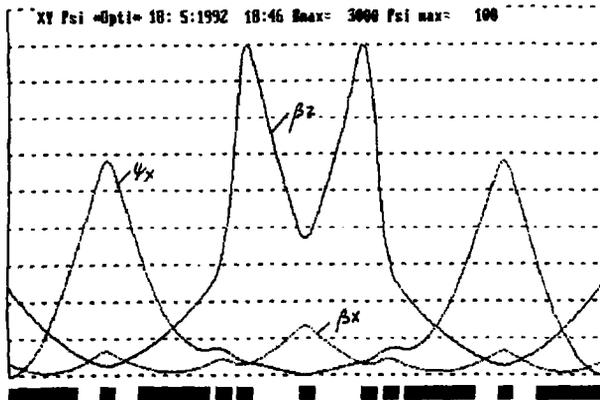


Рис. 6. Флоке и дисперсионные функции дебанчера при $\Psi_B = 43.4$ см.

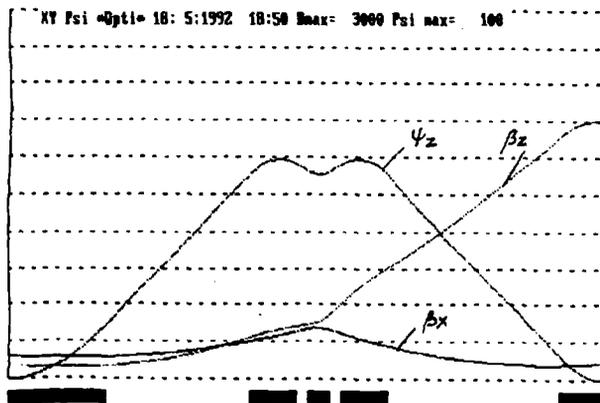


Рис. 7. Флоке и дисперсионные функции "моста".

пучка на выходе параллельного переноса и на входе в кость. На рис. 7 изображены оптические функции коста. В начале канала предполагается использовать линзу 1L1 для согласования пучка с магнитной структурой каналов независимо от параметров пучка на выходе линейного ускорителя. Эта линза является общей для позитронного и электронного каналов. Электронный инжекционный канал включает в себя линзу 1L1, два фокусирующих дублета - 2L2, 2L3 и 2L4, 2L5, а также схему моста, аналогичную той, которая применяется в позитронном канале.

4. СИСТЕМА ВПУСКА И ВЫПУСКА

В накопителе-охладителе используется схема однооборотной инжекции с предупреждением накопленного пучка. Инжекция осуществляется по вертикали с ударом инфлектора по горизонтали. Частицы одного знака впускаются и выпускаются в одном и том же промежутке. Всего под выпуск-впуск занято два длинных прямолинейных промежутка накопителя - отдельно для электронов и для позитронов. Используется вертикальный септум-магнит с постоянным полем, смещенный по радиусу от равновесной орбиты. Инжектируемый пучок приводится септум-магнитом в медленную плоскость накопителя, радиальные колебания пучка частично гасятся инфлектором, расположенным через $1/4$ длины волны радиальных бетатронных колебаний от кеста впуска. Накопленный пучок в момент впуска ударом прединфлектора подводится к "ножу" септум-магнита, инфлектор гасит колебания накопленного пучка. После затухания остаточных колебаний процесс повторяется с частотой 50 Гц до накопления необходимого числа частиц в сгустке.

Поскольку диапазон перестройки накопителя по энергии не превышает $\pm 5\%$, устройства впуска и выпуска должны обеспечивать возможность перестройки ударов в этих же пределах. Выбранная схема инжекции и выпуска не требует переполюсовки кикеров и изменения направления волны в них при любых режимах работы комплекса. Основные требования к кикерам приведены в таблице 4.1.

Кикеры выполнены в виде симметричных полосковых линий с волновым сопротивлением каждой пластины около 50 Ом, размещенных в промежутках и частично в квадрупольных линзах.

На рис. 8 показан профиль верхней половины пластины кикера, размещенной в линзе. Замтрихована область с неоднородностью поля не хуже $\pm 5\%$, точками отмечена граница рабочей апертуры. Каждый кикер запитывается парой разнополярных импульсов.

Поскольку инжектируемый пучок имеет малую длину ($\sigma = 1.5$ см), а накопитель работает в одногустковом режиме, время нарастания (и спада) удара кикеров может почти достигать длительности периода обращения, составляющего 91,5 нс. При этом время пробега волны в кикере оказывается много меньше длительности фронта или спада питающего импульса при выбранной длине кикеров. Это позволяет обеспечить достаточно качественное прохождение питающего импульса по пластинам кикеров без заметных отражений даже при значительном рассогласовании пластины с генераторами при условии равенства сопротивлений нагрузки и волнового сопротивления генераторов.

С учётом этих соображений питание кикеров осуществляется по схеме, приведенной на рис. 9. Генератор формирует пару разнополярных импульсов на входах 25-Омных передающих линий, по которым импульсы синхронно поступают на 50-Омные пластины кикеров, нагруженные на 25 Ом каждая. По отношению к пучку направление волны встречное. В режиме бегущей волны в линзе, когда соотношение между током и напряжением определяется выражением $I = V / W$, где I - ток в волне, V - напряжение, а W - волновое сопротивление, встречная релятивистская частица получает одинаковые по величине удары как за счёт электрического поля, так и за счёт магнитного, удары при этом суммируются. В принятой же схеме при выбранных величинах инпедансов создаётся режим, когда согласование и режим бегущей волны выполняется лишь для генератора, передающей линии и нагрузки. В этой схеме пластины кикера можно рассматривать как короткий несогласованный участок, который слабо влияет на прохождение импульсов. При заданной величине напряжения ток в пластинах определится волновым сопротивлением генератора, а не пластины и в рассматриваемом случае вдвое превышает ток, соответствующий режиму бегущей волны при этом напряжении. То есть в таком режиме кикер действует на пучок с учётом электрической составляющей в 1,5 раза сильнее, чем в режиме бегущей волны при одинаковых амплитудах импульсов напряжений, формируемых генератором. Заметим, что такой подход приемлем лишь в тех случаях, когда

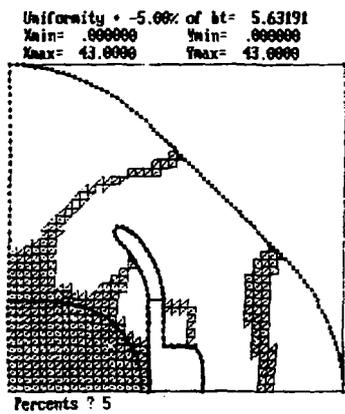


Рис. 8. Профиль верхней половины пластины кикера.

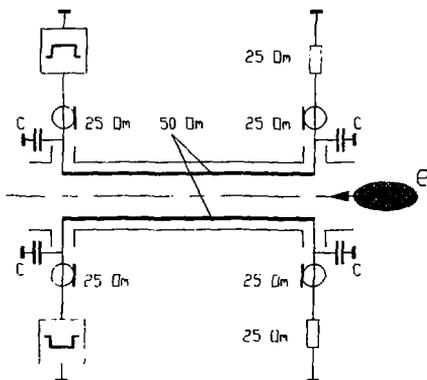


Рис. 9. Схема питания пластин кикера.

от микера не требуется предельное быстродействие и его можно питать импульсом с относительно большим временем установления, во много раз превышающим время пробега волны по кикеру. Если длительность фронта импульса соизмерима со временем пробега волны в кикере, относительная величина отражений, а соответственно и искажений формы импульса, может возрасти до значений порядка единицы.

Предложенный подход позволяет снизить напряжение на кикерах до ± 40 кВ против ± 60 кВ, указанных в Табл. 4.1, а в качестве коммутаторов в генераторах применять мощные импульсные водородные тиратроны на напряжение 50 кВ.

В качестве септум-магнита используется магнит типа Ламбертсона с постоянным магнитным полем (см. рис. 10). Магнит используется как для впуска, так и для выпуска частиц, поэтому имеет большую вертикальную апертуру. Циркулирующий пучок проходит через отверстие в магнитопроводе, смещенное относительно оси симметрии магнита. Вакуумная камера магнита (2) охватывает часть магнитопровода с каналом для циркулирующего пучка (1), соединяясь на торцах с вакуумными камерами накопителя и каналов впуска и выпуска. Инжектируемый пучок впускается в магнит сверху и после поворота на 20° оказывается в меданной плоскости накопителя, отделенный от циркулирующего пучка ножом септум-магнита с толщиной 3 мм.

Для уменьшения проникания магнитного поля внутрь отверстия для циркулирующего пучка, по контуру отверстия в магнитопроводе устанавливается защитный пермаллоевый экран толщиной 0.2 мм, отделенный от железа магнитопровода зазором 0.1 мм. Остаточная величина паразитного поля не превышает 3 Гс, что соответствует искажению орбиты пучка на величину $1.3 \cdot 10^{-4}$ рад. Для экранирования рассеянных магнитных полей от обмоток на торцах магнита используются защитные экраны, уменьшающие интеграл рассеянных полей, действующий на пучок до величины 100 Гс·см, что соответствует повороту пучка на угол $6 \cdot 10^{-5}$ рад. В таблице 4.1 приведены технические параметры септум-магнита.

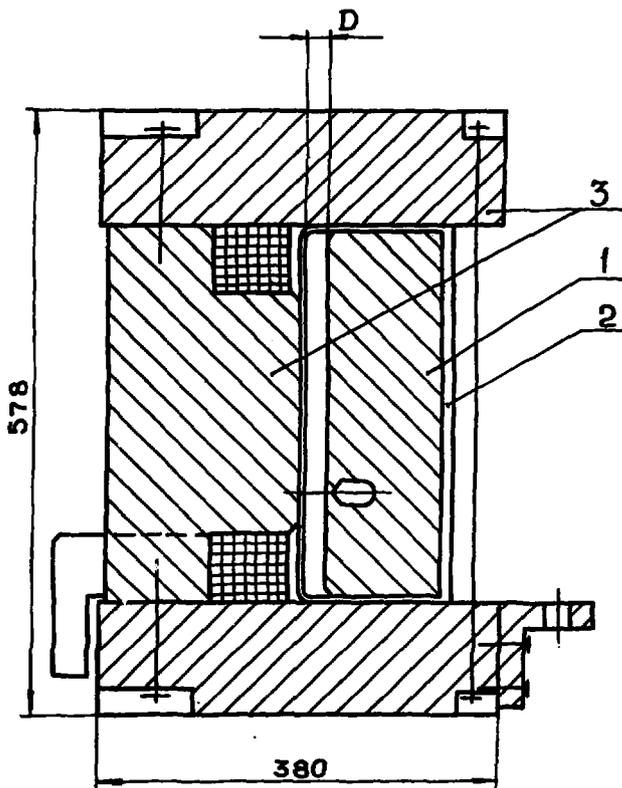


Рис. 10. Поперечное сечение септум-магнита. 1 - магнитопровод с отверстием для циркулирующего пучка, 2 - вакуумная камера, 3 - основной магнитопровод, D - апертура септум-магнита.

5. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ

Для обеспечения необходимой скорости накопления позитронов в коллайдер ВЭПП-5 необходимо обеспечить выпуск позитронного сгустка из накопителя-охлаждителя с числом частиц $2 \cdot 10^{10}$ и длиной $\sigma_1 = 0.4$ см с частотой не менее 1 Гц. Энергия частиц определяется энергией 4-фабрики и равна приблизительно 510 МэВ. Радиальный фазовый объем, энергетический разброс и длина сгустка, которые могут быть получены при конкретных параметрах накопителя, определяются радиационным затуханием вследствие синхротронного излучения и многократным рассеянием частиц внутри сгустка (эффект Тушета). При данных параметрах накопителя этот эффект, по-видимому, будет играть существенную роль. При достаточно больших токах в накопителе могут развиваться разного рода когерентные неустойчивости сгустка, приводящие к увеличению его энергетического разброса и длины, влияние которых также следует учитывать. Вертикальный фазовый объем, по-видимому, будет определяться остаточной величиной связи вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний $\kappa = \sqrt{E_z/E_x}$. Здесь E_z и E_x - соответственно вертикальный и горизонтальный эмиттансы пучка. Рассмотрим процессы, которые определяют параметры пучка в накопителе.

1. Параметры, определяемые квантовыми флуктуациями

Синхротронное излучение сгустка заряженных частиц происходит отдельными квантами и статистически независимо для различных частиц друг относительно друга с характерной частотой гамма-квантов:

$$\omega_c = \frac{3}{2} \frac{c\gamma^3}{R_0} \quad 1$$

Здесь R_0 - радиус поворота в магните, γ - релятивистский фактор. Равновесный энергетический разброс определяется равенством диффузии частиц пучка вследствие квантовой раскачки и затухания синхротронных колебаний.

$$\Delta E^2 = \frac{1}{4} \dot{N} \bar{\epsilon}^2 \tau_s \quad 2$$

Здесь \dot{N} - частота испускания фотонов, $\bar{\epsilon}^2$ - квадрат средней энергии возмущения, τ_s - постоянная времени затухания синхротронных колебаний. Мгновенная излученная мощность P_γ в

потери энергии за оборот U_0 равны:

$$P_{\gamma} = \frac{2}{3} r_e mc^2 c \frac{\gamma^4}{2} - (E H)^2 \quad 3$$

$$U_0 = \frac{2}{3} r_e \gamma^4 mc^2 \Pi \langle K^2 \rangle \quad 4$$

Здесь E - энергия сгустка, H - магнитное поле в поворотных магнитах, $r_e = 2.82 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона, Π - периметр накопителя, K - кривизна, $\langle \rangle$ - усреднение по периметру кольца, mc^2 - энергия покоя электрона. Здесь и далее предполагается, что пучок релятивистский в лабораторной системе отсчета. Квадрат установившегося энергетического разброса равен:

$$\sigma_c^2 = \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 = \frac{55}{3243} \Lambda \gamma^2 \frac{\langle |K|^3 \rangle}{\langle K^2 \rangle} \frac{\Gamma_z}{\Gamma_s} \quad 5$$

Здесь $\Lambda = 3.8 \cdot 10^{-10}$ см, - комптоновская длина волны электрона, Γ_z , Γ_s - декременты затухания вертикальных бетатронных и синхротронных колебаний соответственно. В случае, если магнитное поле в магнитах накопителя можно считать постоянным, то справедлива формула:

$$\frac{\langle |K|^3 \rangle}{\langle K^2 \rangle} = \frac{1}{R_0}$$

Продольный размер сгустка связан с энергетическим разбросом через частоту синхротронных колебаний:

$$\sigma_l = \frac{\alpha R}{v_s} \cdot \sigma_c \quad 6$$

$$\text{где } v_s = \left(\frac{\alpha q V_0 \cdot \cos \phi_s}{2\pi E} \right)^{1/2} \quad 7$$

Здесь α - коэффициент уплотнения орбиты, R - средний радиус накопителя, v_s - синхротронная частота, нормированная на частоту обращения, q - кратность напряжения ВЧ, V_0 - его амплитуда с учетом пролетного фактора, ϕ_s - равновесная фаза. Для параметров накопителя: $R_0 = 112$ см, $\Gamma_z/\Gamma_s = 1/1.47$, $E = 510$ МэВ, $\gamma \approx 1000$, $R = 436$ см, $\alpha = 0.028$, $V_0 = 800$ кВ, $q = 64$, икем $\sigma_c = 4.8 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_l = 0.28$ см.

Равновесная величина горизонтального эмиттанса связана с энергетическим разбросом следующим образом:

$$E_x = \langle I_x \rangle \frac{\Gamma_s}{\Gamma_x} \sigma_c^2 \quad \text{где} \quad 8$$

$$I_x = \frac{1}{\beta_x} (\psi_x^2 + [\beta_x \psi_x' - \frac{1}{2} \beta_x' \psi_x]^2) \quad 9$$

есть инвариант для функции дисперсии, β_x и ψ_x - значения радиальных β и ψ - функций, β_x' и ψ_x' - их производные, Γ_x - декремент затухания радиальных бетатронных колебаний. Для параметров накопителя величина горизонтального эмиттанса равна $E_x = 2.6 \cdot 10^{-6}$ рад·см.

2. Многократное рассеяние частиц внутри сгустка

Вследствие рассеяния частиц внутри сгустка происходит перекачка энергии поперечных колебаний частиц в энергию продольных колебаний. Случайные изменения энергии частиц при этом могут быть весьма значительны вследствие преобразования Лоренца при переходе в лабораторную систему отсчета, что может приводить к выходу частицы за пределы сепаратрисы и потере ее при рассеянии на большие углы. Этот процесс накладывает ограничение на время жизни, которое может быть получено в накопителе. Кроме того, важное значение имеет процесс рассеяния частиц на малые углы (многократный эффект Тушека), который хоть и не приводит к потере частиц, но приводит к увеличению энергетического разброса и эмиттанса пучка, что препятствует укорочению сгустка.

Предположим, что сгусток нерелятивистский в системе центра масс и установившийся энергетический разброс определяется процессом многократного рассеяния на малые углы частиц внутри сгустка. При этом, поскольку акты рассеяния частиц происходят статистически независимо друг относительно друга, то справедливо выражение (2) для энергетического разброса.

Выражение для ΔE^2 можно переписать через импульс, получаемый частицей в поперечном к горизонтальному направлению (предполагается что взаимодействие происходит только в горизонтальной плоскости).

$$\dot{N} \frac{\delta p_{\perp}^2}{\tau} = \frac{1}{2} c^2 \left(\dot{N} \delta p_{\perp}^2 \right), \quad 10$$

Здесь δp_{\perp}^2 - квадрат средней поперечной составляющей импульса после взаимодействия частиц. Множитель 1/2 возникает вследствие того, что вероятность рассеяния частиц в продольном направлении и вертикальном одинакова. В свою очередь:

$$\dot{N} = n v \sigma \quad 11$$

Здесь n - плотность частиц, v - скорость частицы в

радиальном направлении, σ - сечение взаимодействия. Заметим здесь, что выражение $(N \delta p_1^2)$ одинаково в лабораторной системе отсчета и в системе центра масс частиц. Используя (11), получаем:

$$(N \delta p_1^2) = n (v \sigma \overline{\delta p_1^2}) \quad 12$$

$$n = \frac{N}{2^3 \pi^{3/2} \sigma_x \sigma_z \sigma_1} \quad 13$$

Здесь n - плотность частиц, N - их число. Горизонтальный размер сгустка квадратично складывается из синхротронного и бетатронного размеров:

$$\sigma_x = (\beta_x \cdot U_x + \psi_x^2)^{1/2} \sigma_c \quad 14$$

Здесь $U_x = I_x \frac{\Gamma_s}{\Gamma_x}$, I_x был определен ранее (9);

В случае, если вертикальный размер сгустка определяется коэффициентом связи вертикальных к горизонтальным бетатронным колебаний κ , справедливо соотношение:

$$\sigma_z = \kappa \left(\frac{\beta_z}{\beta_x} \right)^{1/2} \sigma_x = \kappa (\beta_z U_x)^{1/2} \sigma_c \quad 15$$

Подставляя (6), (14) и (15) в (13) получим для n :

$$n = \frac{N v_s}{2^3 \pi^{3/2} R \alpha \kappa (\beta_z U_x)^{1/2} \cdot (\beta_x U_x + \psi_x^2)^{1/2}} \quad 16$$

Для $(v \sigma \overline{\delta p_1^2})$, согласно [2], справедливо выражение:

$$(v \sigma \overline{\delta p_1^2}) = \frac{2 \sqrt{\pi} r_e^2 p_0^2 c \beta_x}{\gamma \sigma_x} f(\chi_m) \quad 17$$

Здесь $f(\chi_m)$ - логарифмически меняющаяся функция, зависящая от причесного параметра столкновения частиц.

$$f(\chi_m) = \int_{\chi_m}^{\infty} \frac{1}{x} \ln \left(\frac{x}{\chi_m} \right) e^{-x} dx \quad 18$$

$$\chi_m = \frac{r_e \beta x^2}{b_{\max} (\gamma \sigma_x)^2} \quad 19$$

$b_{\max} = n^{-1/3}$ - максимальное причесное расстояние взаимодействующих частиц. Для рассматриваемых параметров макопитая $f(\chi_m) = 100 + 200$. Используя (17) и (18) и подставляя (14) в (2), в итоге получаем выражение для

энергетического разброса сгустка:

$$\sigma_c^6 = \frac{N \chi_e^2 \beta_x \nu_s \tau_s f(\chi_m)}{2^5 \pi^3 \alpha \kappa (\beta_z U_x)^{1/2} (\beta_x U_x + \psi_x^2)} \quad 20$$

Поскольку $\tau_s \sim 1/\gamma^3$; $\sigma_c \sim \frac{N^{1/6}}{\gamma}$; σ_c — энергетический разброс сравнительно медленно растет с увеличением числа частиц в сгустке. Очевидно, что рассматриваемый эффект определяет размеры сгустка при низких энергиях частиц. При возрастании энергии энергетический разброс в сгустке будет определяться квантовыми флуктуациями, поскольку $\sigma_{c\gamma} \sim \gamma$. Численное моделирование показывает, что при данных параметрах накопителя для числа частиц в сгустке $N = 2 \cdot 10^{10}$ и коэффициенте связи $\kappa = 0.2$ энергетический разброс, вносимый эффектом Тушенка, и энергетический разброс вследствие квантовых флуктуаций дают приблизительно одинаковый вклад в суммарный энергетический разброс в сгустке, т.е. $\sigma_{c\gamma} \approx \sigma_{ct}$. При $V_0 = 800$ кВ, $\sigma_c = 7 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_1 = 0.44$ см. Время жизни, определяемое процессом однократного рассеяния $\tau_1 \approx 1000$ сек.

3. Когерентная устойчивость движения сгустка

Получение достаточно короткого сгустка в накопителе является серьезной физической проблемой. (Предполагается иметь на выходе накопителя сгусток с длиной $\sigma_1 \approx 0.4$ см, с тем чтобы после группирователя иметь длину сгустка порядка 0.04 см, что необходимо для эффективной инжекции в линейный ускоритель с $\lambda = 2.14$ см). Для реализации этой задачи при проектировании накопителя закладываются следующие особенности:

- малая величина коэффициента уплотнения орбиты $\alpha = 0.028$
- высокая гармоника ВЧ $q = 64$
- максимально высокая амплитуда напряжения ВЧ

При числе частиц N порядка $2 \cdot 10^{10}$ и длине сгустка порядка нескольких миллиметров основными факторами, ограничивающими минимально достижимую длину сгустка, являются когерентные неустойчивости, обусловленные взаимодействием электромагнитных полей сгустка с неоднородностями вакуумной камеры, впускными и выпускными устройствами, ВЧ резонаторами и т.д. Это взаимодействие может проявляться во-первых, в удлинении сгустка и, во-вторых, в возбуждении его когерентных колебаний.

Оценки продольного широкополосного импеданса:

Удлинение сгустка происходит вследствие воздействия на него собственных полей излучения и определяется величиной широкополосного продольного импеданса Zn на длине волны порядка или меньше длины сгустка. При заданном числе частиц в сгустке N и длине сгустка σ_1 величина широкополосного импеданса на гармониках $n > n_{CG} = R/\sigma_1$ частоты обращения не должна превышать предельного значения, ограниченного неравенством:

$$|Zn/n| \leq \frac{Z_0 \sqrt{2\pi} qV_0 \cos\phi_s \sigma_1^3}{4\pi NeR^2} \quad 21$$

или, используя выражение, связывающее длину и энергетический разброс пучка:

$$|Zn/n| \leq \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{Z_0 E \alpha \sigma_1}{Ne^2} \sigma_E^2 \cos\phi_s \quad 22$$

Здесь $Z_0 = 377 \text{ Ом}$ - импеданс свободного пространства. Для накопителя-охлаждителя при $R = 436 \text{ см}$, $E = 510 \text{ МэВ}$, $N = 2 \cdot 10^{10}$, $\sigma_E = 4.8 \cdot 10^{10}$, $\alpha = 0.028$, $\cos\phi_s \approx 1$, $\sigma_1 = 0.4 \text{ см}$ получаем $|Zn/n| \leq 0.22 \text{ Ом}$, что является очень жестким ограничением и, по-видимому, такую величину импеданса не удастся получить в *реальном* накопителе.

Прежде чем проводить оценки величины широкополосного импеданса, рассмотрим другое важное ограничение на напряжение ВЧ системы - энергетический аксептанс накопителя, равный

$$\left(\frac{\delta E}{E} \right)_{\max} = \left(\frac{eV_0}{\pi \alpha E q} \cdot G(\phi_s) \right)^{1/2} \quad 23$$

Здесь $G(\phi_s) = 2$ при $\phi_s = \pi$.

В таблице 5.1 приведена зависимость энергетического аксептанса накопителя, установившийся равновесный продольный размер сгустка σ_{10} из-за квантовых флуктуаций, σ_1 - продольный размер с учетом многократного рассеяния для связи 0.2 и ограничение на широкополосный продольный импеданс $|Zn/n|$, не приводящий к удлинению сгустка, при числе частиц $N = 2 \cdot 10^{10}$.

Таблица 5.1.

$V_0, \text{ kV}$	200	400	600	800	1000
$(\delta E/E)_{\text{max}}, \%$	1.18	1.67	2.04	2.36	2.64
$\sigma_{10}, \text{ см}$	0.57	0.4	0.33	0.28	0.25
$\sigma_1, \text{ см}$	0.78	0.58	0.48	0.44	0.39
$ Zn/n , \text{ Ом}$	0.32	0.25	0.19	0.16	0.14

Основными вкладками в величину широкополосного продольного импеданса будут:

- импеданс за счет конечной проводимости стенок вакуумной камеры:

$$|Zn/n| = \frac{Z_0}{a} \cdot \left(\frac{\sigma_1}{4\pi\kappa} \right)^{1/2} \approx 0.026 \cdot \frac{\sigma_1 [\text{см}]}{a [\text{см}]}, \text{ [Ом]} < 10 \text{ мОм} \quad 24$$

Здесь a - радиус вакуумной камеры, $\kappa = 5 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}$ (для меди) - электрическая проводимость стенок вакуумной камеры, c - скорость света;

- импеданс резонатора:

$$|Zn/n| = \frac{Z_0}{2\pi^2} \cdot \frac{(2\pi g \sigma_1^3)^{1/2}}{aR} = 48 \text{ [Ом]} \cdot \frac{(g \sigma_1^3)^{1/2}}{aR} \quad 25$$

Здесь g - длина резонатора. При $g = 43 \text{ см}$, $\sigma_1 = 0.4 \text{ см}$, $R = 436 \text{ см}$, $a = 2 \text{ см}$ для одиночного резонатора получается

$$|Zn/n| \approx 0.1 \text{ Ом};$$

- импеданс переходов с изменением сечения вакуумной камеры в том числе и кикер-магнитов, который можно оценить при помощи следующего выражения:

$$|Zn/n| = \frac{Z_0}{\pi} \cdot \frac{\sigma_1}{R} \cdot \ln \left(\frac{b}{a} \right) \quad 26$$

Здесь a и b - радиусы вакуумной камеры, и нужно учитывать только вклады переходов от большего радиуса к меньшему. Учитывая, что на накопителе предполагается использовать 4 кикер-магнита ($b/a = 80 \text{ мм}/36 \text{ мм}$) и диаметр вакуумной камеры

резко изменяется при переходе от прямолинейных промежутков к полукольцам ($b/a \approx 80$ м/50 м), получаем:

$$|Zn/n| \approx \frac{377}{\pi} \cdot \frac{0.4}{436} \cdot \left(41n \frac{80}{36} + 21n \frac{80}{50} \right) = 0.45 \text{ Ом} \quad 27$$

Заметим, что величина всех приведенных импедансов увеличивается с длиной сгустка (все значения даны для $\sigma_1 = 0.4$ см), что будет приводить к большему удлинению, чем определяется выражением (21) при постоянном $|Zn/n|$.

По-видимому, наибольший вклад (κ в то же время имеющий наибольший разброс в теоретических оценках) дает импеданс за счет мягкой компоненты СИ. Для вакуумной камеры, открытой в радиальном направлении, его величина будет определяться следующим выражением:

$$|Zn/n| \approx 300 \text{ (Ом)} \cdot \frac{a}{R} \approx 1 \text{ Ом}, \quad a \approx 1.5 \text{ см}, \quad R \approx 436 \text{ см} \quad 28$$

Максимум этого импеданса достигается для длины волны:

$$\lambda_{кр} \approx 10 \cdot \left(\frac{a^3}{R} \right)^{1/2} \approx 2\pi \cdot 0.14 \text{ см} \quad 29$$

Это значительно меньше длины сгустка ($\sigma_1 \ll \lambda_{кр}/2\pi$). Для закрытой в радиальном направлении вакуумной камеры величина этого импеданса будет заметно меньше за счет дополнительного экранирования и отражения СИ от стенок. Поскольку величина этого импеданса заметно превышает суммарный вклад остальных слагаемых и он "пикован" в диапазоне коротких длин волн, то величина импеданса будет слабо зависеть от длины сгустка.

Подводя итог вышесказанному, можно оценить величину широкополосного импеданса порядка $1 + 1.5 \text{ Ом}$, что и наблюдается в большинстве установок, где его минимизации придавали серьезное значение: CESR (Cornell), Damping Ring (SLAC).

Как видно из выражения (21), при величине импеданса порядка 1 Ом минимальная длина сгустка будет порядка 1.7 см для $N = 2 \cdot 10^{10}$. В действительности ситуация будет лучше, так как эта неустойчивость не приводит к потере пучка и можно заметно переходить за порог ее возбуждения. В этом случае можно добиться уменьшения длины сгустка за счет увеличения напряжения ВЧ. В таблице 5.2 приведены установившийся энергетический разброс κ и длина сгустка в зависимости от напряжения ВЧ системы для $|Zn/n| = 1 \text{ Ом}$.

Таблица 5.2

$V_0, \text{ kV}$	200	400	600	800	1000
$(\delta E/\delta E_0)$	1.46	1.59	1.75	1.85	1.93
$\sigma_1, \text{ см}$	0.83	0.64	0.57	0.51	0.48

Из сравнения таблиц 5.1 и 5.2 кажется разумным выбрать напряжение ВЧ $V_0 = 600 + 800 \text{ кВ}$. Длина густка в этом случае будет порядка $5 + 6 \text{ мк}$, что примерно вдвое больше установившегося размера по квантовым флуктуациям. Захватываемый энергетический разброс при этом составит величину порядка $\pm 2 \%$. Подводя итог, необходимо заметить, что рассмотренный эффект, по-видимому, внесет больший вклад в удлинение густка и увеличение его энергетического разброса, нежели многократное рассеяние и, следовательно, именно он будет определять минимальную достижимую длину густка в накопителе.

4 Перераспределение декрементов затухания

Частицы, двигаясь по замкнутой орбите в накопителе, теряют свою энергию вследствие синхротронного излучения. Поскольку в ускоряющих резонаторах происходит компенсация потерь только продольной составляющей энергии, то колебания частиц в поперечном направлении затухают во времени, т.е. имеет место так называемое "радиационное затухание". В случае, если вертикальное движение частиц происходит независимо от горизонтального, между декрементами затухания синхротронных и горизонтальных бетатронных колебаний Γ_v и Γ_x существует простая связь:

$$\frac{\Gamma_v}{\Gamma_z} + \frac{\Gamma_x}{\Gamma_z} = 3 \quad 30$$

Декремент затухания вертикальных колебаний определяется следующим выражением:

$$\Gamma_z = \frac{1}{2T_0} \cdot \frac{U_0}{E} \quad 31$$

Здесь T_0 - период обращения. Для параметров накопителя $U_0 = 5.3$ кэВ, $T_0 = 9.13 \cdot 10^{-8}$ сек. $\tau_z = 1/\Gamma_z = 17.5$ мсек. Выражение для Γ_s можно получить продифференцировав потери энергии за оборот:

$$\Gamma_s = \frac{1}{2T_0} \cdot \frac{dU_0}{dE} \quad 32$$

При этом, поскольку Γ_x и Γ_s связаны между собой:

$$\Gamma_s = \Gamma_z \cdot (2 + J), \quad \Gamma_x = \Gamma_z \cdot (1 - J) \quad 33$$

$$J = \frac{\int K^3 \cdot \left(1 + \frac{G}{HK}\right) \psi_x ds}{\int K^2 ds}, \quad \text{здесь } G = -\frac{dH}{dz}, \quad 34$$

интегрирования ведется по периметру накопителя. Для случая постоянной кривизны магнитов это выражение можно упростить:

$$J = K_0 \cdot \left(1 + \frac{G}{H K_0}\right) \bar{\psi} \quad 35$$

$\bar{\psi}$ - усредненная по магнитному полю функция дисперсии.

В общем случае, если не предпринимать специальных мер, интеграл J мал и $\Gamma_s \approx 2\Gamma_z$; $\Gamma_x \approx \Gamma_z$. Поскольку для накопителя-охладителя $\tau_z \approx 17.5$ мс, а период следования тактов инжекции $\tau_{in} = 20$ мс, очевидно что этого времени недостаточно, чтобы сгусток, захваченный в предыдущем такте инжекции и размазанный после этого практически по всей апертуре вакуумной камеры, в достаточной степени успел уменьшить свой горизонтальный размер вследствие радиационного трения. Эту ситуацию можно попытаться улучшить, если перераспределить декременты синхротронных и горизонтальных бетатронных колебаний. Для этих целей предполагается использовать поворотные магниты с заложенным в их профиль отрицательным градиентом. Эта процедура полезна также с точки зрения конструирования оптики накопителя, поскольку происходит фокусировка движения пучка в вертикальной плоскости, хотя при этом несколько увеличивается энергетический разброс и длина сгустка. При $G = -0.4$ МэВ/см $\Gamma_x = 1.53$ и $\tau_x \approx 11.5$ мс, что выглядит вполне приемливо с точки зрения уменьшения времени радиационного затухания бетатронных колебаний.

6. ДИНАМИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА

Важным параметром накопителя является величина его динамической апертуры. Вследствие наличия таких нелинейных элементов как секступольные линзы, необходимых для коррекции естественного хроматизма, а также из-за неидеальности изготовления и выставки квадрупольных линз и дипольных магнитов, приводящей к появлению мультипольных моментов в магнитном поле, движение частиц при больших амплитудах становится существенно нелинейным, что может приводить к ограничению апертуры накопителя. Это накладывает ограничение на расстановку секступольных линз и определяет требования на качество изготовления и точность выставки магнитных элементов. Особое внимание для данного варианта накопителя необходимо было уделить получению достаточно большой величины динамической апертуры для радиального движения, т.к. накопитель существенно жестче по x нежели по z , а величина динамической апертуры падает при увеличении жесткости ускорителя.

Исходя из этих соображений, была выбрана рабочая точка ($Q_x = 4.78$, $Q_z = 2.62$). Численное моделирование показывает, что нелинейные эффекты для накопителя-охладителя, вызванные секступолями, компенсирующими естественный хроматизм, достаточно слабы. Динамическая апертура, посчитанная для идеальной расчетной структуры различными пакетами программы (MAD, SpinLie, TRACK), превышает вакуумную камеру даже при энергетическом разбросе $\pm 5\%$.

Моделирование показывает, что для данного варианта накопителя граничный эмиттанс устойчивого движения составляет величину порядка 30 мрад·см в горизонтальном и более 100 мрад·см в вертикальном направлении (для $\sigma_z = 0.02$), что в несколько раз больше чем аксептанс накопителя. На рисунке 11а показана динамическая апертура для пучков с кулевым энергетическим разбросом, а на рисунке 11б - зависимость горизонтальной динамической апертуры от энергетического разброса.

При внесении ошибок в поля магнитов до 1% динамическая апертура уменьшалась примерно в 3 раза, хотя и оставалась достаточно большой. Но после просчета крайних сдвигов частоты стало ясно, что ограничение связано с достаточно сильными октупольными компонентами введенного возмущения. Этот эффект

достаточно легко компенсируется парой октуполей, что и было проверено расчетом.

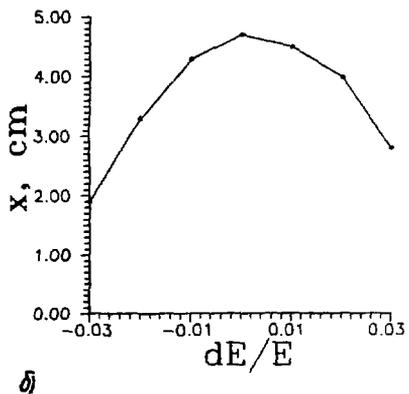
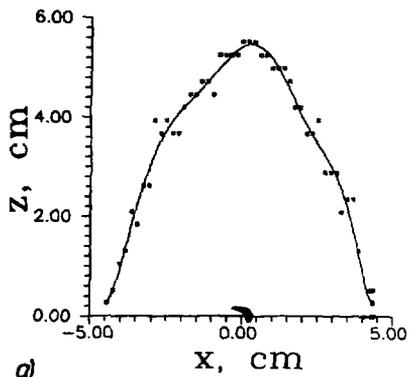


Рис. 11 а) - динамическая апертура накопителя-охладителя при нулевом энергетическом разбросе, б) - зависимость горизонтальной динамической апертуры от энергетического разброса.

7. ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

1. Поворотный магнит

Магнитная структура накопителя содержит 8 45-градусных поворотных магнитов - по два на каждый квадрант. Магниты 0-образные, поперечное сечение магнита показано на рис. 12. В таблице 7.1 приведены технические характеристики магнита. Магнит и остальные магнитные элементы выполнены из железа марки 08-СП. Полюс магнита выполнен в виде концентратора магнитного потока. Номинальная величина магнитного поля равна 15.2 кГс. Большая величина магнитного поля нежелательна, т.к. в профиль полюса закладывается сильный градиент - -0.4 кГс/см и магнитное поле на краю полюса, который расположен на расстоянии 70 мм внутрь от равновесной орбиты, достигает величины 18 кГс, и при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля будет сказываться насыщение железа. Расчетные кривые градиента магнитного поля приведены на рис. 13. Расчет магнитных полей всех магнитных элементов производился при помощи пакета программ MERMAID, разработанного в нашем институте. Требуемая область хорошего поля для пучка составляет величину ± 30 мм по горизонтالي. При этом однородность градиента $\Delta G/G \leq 1\%$. Обмотки магнитов выполнены медной шиной сечением 13.5×13.5 мм², с водяным каналом диаметром $\phi = 8$ мм и общей площадью сечения 130 мм². Для уменьшения насыщения краев на торцах магнита сделаны фаски.

2. Квадрупольные линзы

В накопителе используются 28 линз двух типов - с вписанным диаметром 60 и 80 мм. Это вызвано тем, что вакуумные камеры длинных прямолинейных промежутков и полукольца имеют разное сечение. Технические характеристики линз представлены в таблице 7.1. На рис. 14 изображено сечение линзы ДУ 60, линза ДУ 80 имеет практически те же габариты. Линзы выполнены в виде четырех симметричных четвертинок. Для увеличения области однородного градиента применен шим в виде отрезков прямой, продолжающих по касательной гиперболический профиль. Для уменьшения величины кубической нелинейности, вносимой квадрупольными линзами, на их торцах применяются фаски под углом 45° на расстоянии $D/4$ от края линзы, здесь D - величина вписанного диаметра. Обмотки линзы ДУ 60 выполнены из

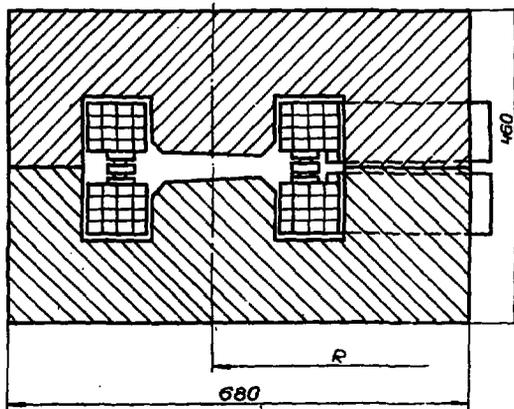


Рис. 12. Поперечное сечение поворотного магнита.

Graph: Gn Min: -408195 Max: -401541
 Line(000000 , 109.000) -> (000000 , 115.000)
 Integrat -2.43035

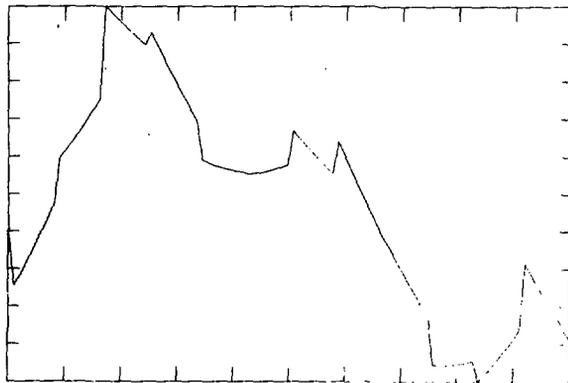


Рис. 13. Расчетная зависимость градиента поворотного магнита от апертуры вакуумной камеры.

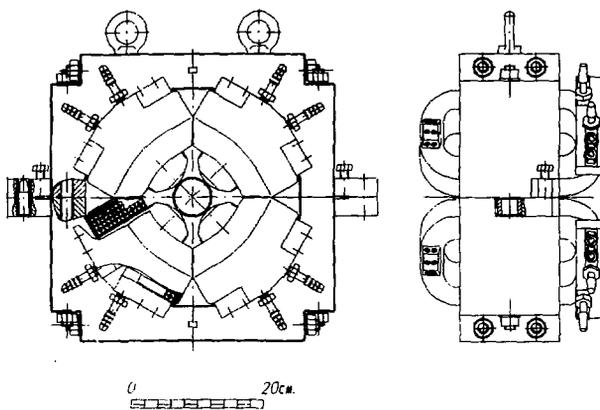
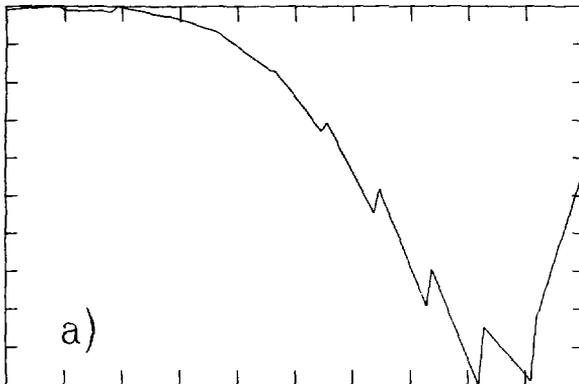


Рис. 14 Поперечное сечение линзы ДУ 60.

медной шинки $12.5 \times 12.5 \text{ мм}^2$ с водяным каналом $\varnothing = 7.5 \text{ мм}$ и площадью сечения 112 мм^2 . Обмотки линзы ДУ 80 выполнены из шинки $8.5 \times 8.5 \text{ мм}^2$, $\varnothing = 5.0 \text{ мм}$, $S = 50 \text{ мм}^2$. Уменьшение сечения обмотки линзы ДУ 80 было вызвано желанием уменьшить поперечные размеры линзы. На рис. 15 а) и б) представлены кривые градиента магнитного поля.

Graph: G_n Min: 2.75511 Max: 2.75553
Line#: .001000 .000000) -> (3.00000 .000000)
Integral: 8.20341



Graph: G_n Min: 1.71757 Max: 1.71821
Line#: .001000 .000000) -> (3.00000 .000000)
Integral: 5.75575

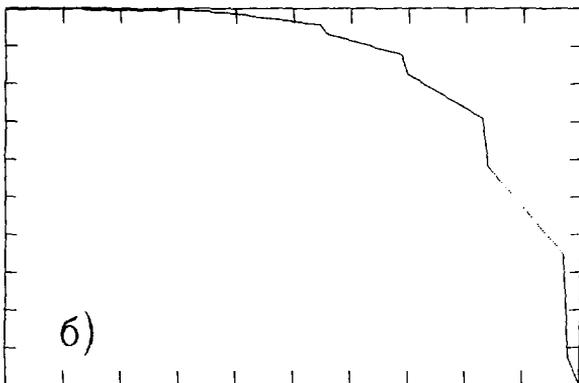


Рис. 15. Расчетные зависимости градиентов магнитного поля
а) - в линзе ДУ 60, б) - в линзе ДУ 80.

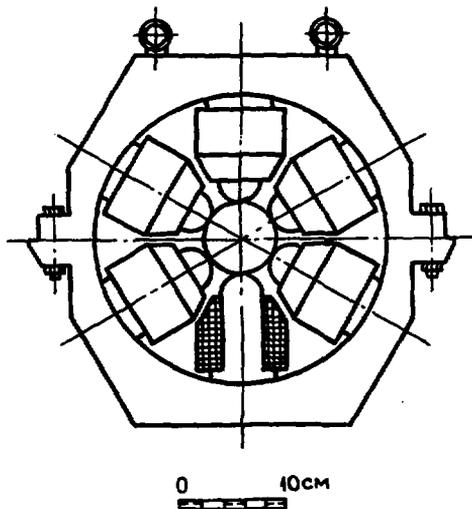


Рис. 16 Поперечное сечение секступольной линзы.

3 Линзы секступольной коррекции

В накопителе используются два семейства секступольных линз - для коррекции вертикального и горизонтального естественного хроматизма - по две линзы каждого семейства на квадрант. В таблице 7.1 представлены технические характеристики секступольной линзы, а на рисунке 18 изображено ее поперечное сечение. Профиль полюса линзы выполнен в виде окружности, приближенно заменяющей гиперболу второго порядка. Обмотка намотана проводом ПЭВ-2, площадь сечения 3.9 мм^2 . Для улучшения теплового контакта между обмоткой и охлаждаемым железом обмотка приклеена прямо на полюс. Диаметр вписанной окружности линзы выбран исходя из размеров вакуумной камеры. Необходимая величина области однородности секступольного градиента равна $\pm 30 \text{ мм}$. При этом расчетная величина секступольного градиента в апертуре линзы $\Delta S/S \leq 10 \text{ ‰}$.

Таблица 7.1

Параметры магнита.

Межполюсной зазор *	36 мм
Магнитная длина	880 мм
Длина по железу	856 мм
Ток питания обмотки	1000 А
Число витков на полюс	24
Величина поля *	15.2 кГс
Градиент	-0.4 кГс/см
Потребляемая мощность	17 кВт
Вес магнита	2500 кг

* - параметры даны для равновесной орбиты

Параметры линзы ДУ 60

Диаметр вписанной окружности	60 мм
Магнитная длина линзы	180 мм
Длина по железу	150 мм
Ток питания обмотки (макс.)	1000 А
Число витков в обмотке	10
Градиент поля (макс.)	2.7 кГс/см
Потребляемая мощность	6 кВт
Вес линзы	200 кг

Параметры линзы ДУ 80

Диаметр вписанной окружности	80 мм
Магнитная длина линзы	200 мм
Длина по железу	160 мм
Ток питания обмотки (макс.)	1000 А
Число витков в обмотке	11
Градиент поля (макс.)	1.6 кГс/см
Потребляемая мощность	14 кВт
Вес линзы	200 кг

Параметры секstupольной линзы

Диаметр вписанной окружности	68 мм
Магнитная длина линзы	80 мм
Длина по железу	57 мм
Ток питания обмотки (макс.)	12 А
Число витков в обмотке	237
Секstupольный градиент поля (макс.)	0.50 кГс/см ²
Потребляемая мощность	276 Вт
Вес линзы	60 кг

8. КОРРЕКЦИЯ ОРБИТЫ

Система коррекции включает в себя витки дипольной коррекции магнитного поля в поворотных магнитах и квадрупольных линзах и витки квадрупольной коррекции в квадрупольных линзах. Всего предполагается использовать в накопителе 64 канала слаботочной коррекции - 8 в поворотных магнитах и 56 - в квадрупольных линзах, по 2 в каждой из 28 линз. Кроме того, предполагается использовать две пары импульсных корректоров для локального искажения орбиты пучка перед выпуском. Ниже приводятся параметры корректирующих элементов.

Таблица 8.1

1. Коррекция основного магнитного поля в магните.

Величина коррекции (450 Гс) соответствует $\Delta H/H = 3 \cdot 10^{-2}$.

Число витков на полюс - 160

Ток питания - 10 А

Сечение провода - 3.2 км^2

Полное омическое сопротивление - 2.5 Ом

Полная потребляемая мощность - 25 Вт

2. Дипольная коррекция в линзе ДУ 60.

Применяется для коррекции орбиты по горизонтали (в фокусирующих линзах) и по вертикали (в дефокусирующих линзах).

Величина коррекции (148 Гс) соответствует $\Delta\phi = 1.57$ мрад.

Число витков на полюс - 50

Ток питания - 10 А

Сечение провода - 2 км^2

Полное омическое сопротивление - 1.25 Ом

Полная потребляемая мощность - 12.5 Вт

3. Дипольная коррекция в линзе ДУ 80.

Величина коррекции (133 Гс) соответствует $\Delta\phi = 1.57$ мрад.

Число витков на полюс - 60

Ток питания - 10 А

Сечение провода - 2 км^2

Полное омическое сопротивление - 1.4 Ом

Полная потребляемая мощность - 14 Вт

4. Квадрупольная коррекция в линзе ДУ 60.

Величина коррекции (40 Гс/см) соответствует $\Delta G/G=1.5 \cdot 10^{-2}$
Число витков на полюс - 15
Ток питания - 10 А
Сечение провода - 2 мм²
Полное омическое сопротивление - 0.36 Ом
Полная потребляемая мощность - 3.6 Вт

5. Квадрупольная коррекция в линзе ДУ 80.

Величина коррекции (23 Гс/см) соответствует $\Delta G/G=1.4 \cdot 10^{-2}$
Число витков на полюс - 15
Ток питания - 10 А
Сечение провода - 2 мм²
Полное омическое сопротивление - 0.36 Ом
Полная потребляемая мощность - 3.6 Вт

9. ВЧ - СИСТЕМА

Параметры высокочастотной системы определяются несколькими требованиями:

- 1) необходимо иметь короткий сгусток в накопителе;
- 2) ВЧ система должна обеспечить устойчивость когерентных колебаний частиц;
- 3) выбранная частота ускоряющего напряжения должна быть кратна частотам ВЧ систем других установок, входящих в комплекс (для удобства синхронизации инжекционных накопитель-охладитель и выпуска из него);
- 4) нужно ориентироваться на доступный ВЧ генератор.

Перечисленные выше требования определили частоту ВЧ накопителя равной $f_{ВЧ} = 700$ МГц (64-ая гармоника частоты обращения). Эта частота позволяет достаточно просто синхронизировать инжекцию в накопитель-охладитель из форсиратора (отношение частот ВЧ систем $\frac{2856 \text{ МГц}}{700 \text{ МГц}} = \frac{102}{25}$) и выпуск частиц из накопителя в Ф-фабрику (частота ВЧ 700 МГц), двухсантиметровый линак (частота 14 ГГц) и В-фабрику (частота ВЧ 500 МГц). Источником ВЧ мощности для ускоряющей системы будет пролетный усилительный клистрон с выходной мощностью 100 кВт.

Выше обсуждалась величина ускоряющего напряжения.

необходимая для получения приемлемых параметров сгустка. Требуемое напряжение 800 кВ можно получить на двух одинаковых резонаторах по 400 кВ на каждом, расположенных в двух противоположных прямолинейных промежутках. Резонаторы медные, теплые. Перестройка частоты осуществляется при помощи плунжера, расположенного на обечайке резонатора. Связь с генератором осуществляется при помощи петли. Резонатор изображен на рис. 17.

Поскольку на энергии 510 МэВ мощность потерь на СИ составляет порядка 200 Вт, требуемая от генератора ВЧ мощность определяется потерями в стенках резонаторов. При величине эффективного шунтового сопротивления резонатора 2,3 МОм и при ускоряющем напряжении на одном резонаторе 400 кВ мощность потерь составит около 70 кВт в двух резонаторах. Основные параметры ВЧ системы к ускоряющего резонатора приведены в таблицах 9.1 и 9.2.

Для обеспечения устойчивости когерентных колебаний необходимо искусственно понизить добротности высших мод колебаний резонаторов до величины порядка 700. Предполагается демпфировать высшие моды в резонаторах при помощи поглотителей, установленных в трех связанных с резонатором волноводах. Волноводы имеют прямоугольное сечение с размерами 165,1 мм x 12,5 мм ($f_{кр} = 908$ МГц) и расположены на обечайке через 120° .

Таблица 9.1 ПАРАМЕТРЫ ВЧ

Частота ускоряющего напряжения	$f_{rf} = 700$ МГц
Кратность ВЧ	$q = 64$
Суммарное ускоряющее напряжение	$U_{rf} = 800$ кВ
Количество резонаторов	$N = 2$
Ток пучка	$I_0 = 40$ мА
Ток, инжектируемый за один такт	$\Delta I \leq 4$ мА
Потери на СИ за оборот	$W_{об} = 5,3$ кэВ
Средняя мощность потерь на СИ	$P_{СИ} \approx 200$ Вт
Частота синхротронных колебаний	$f_s = 230$ кГц
Частота синхротронных колебаний, нормированная на частоту обращения	$\nu_s = 0.021$
Требуемая перестройка частоты обращения	$\Delta f_{об} \pm 10$ кГц
Мощность, потребляемая от ВЧ генератора	$P_{rf} = 70$ кВт

Таблица 9.2 ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРА

Рабочая частота	$f_{\text{рт}} = 700 \text{ МГц}$
Перестройка частоты	$\Delta f = \pm 0,8 \text{ МГц}$
Характеристическое сопротивление	$\rho = 212 \text{ Ом}$
Добротность	$Q = 21000$
Шунтовое сопротивление	$R_{\text{ш}} = 4,45 \text{ МОм}$
Эффективное шунтовое сопротивление	$R_{\text{шэф}} = 2,31 \text{ МОм}$
Коэффициент пролетного времени	$k_{\text{пр}} = 0,72$
Ускоряющее напряжение	$U = 400 \text{ кВ}$
Мощность, рассеиваемая в стенках резонатора	$P_{\text{пот}} = 35 \text{ кВт}$

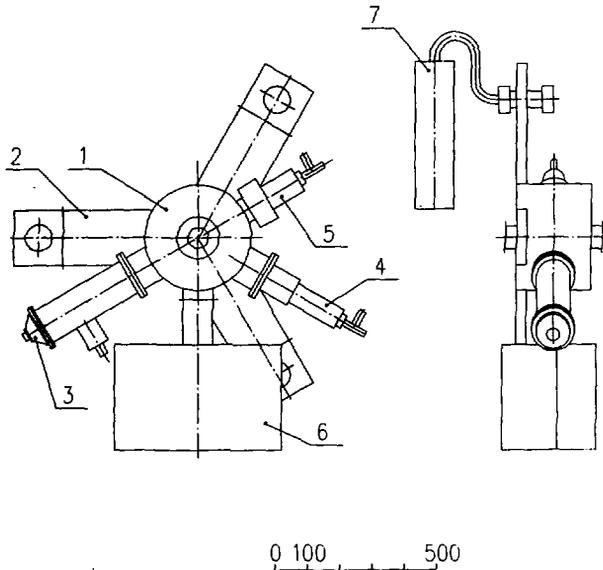


Рис. 17. Резонатор накопителя-охлаждителя. 1 - корпус резонатора, 2 - волновод откачки высших мод, 3 - ввод мощности, 4 - петли измерительная, 5 - узел перестройки, 6 - вакуумный насос, 7 - нагрузка.

10. НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ПУЧКАМИ

Система диагностики пучка должна обеспечивать:

1. Проводку пучка в накопителе в режиме инжекции;
2. Измерение замкнутой орбиты пучка в накопителе;
3. Измерение параметров пучка: поперечных и продольных размеров, разброс бетатронных частот и т. д.

Состав аппаратуры включает в себя:

- а) Измеритель постоянного тока - БИТ.
- б) Резистивный датчик, позволяющий различать сгустки в различных сепаратриксах.
- в) Измерение орбиты - по 4 пикапа на квадрант (всего 16 пикапов).
- г) Пикап для наблюдения за поперечными бетатронными колебаниями.
- д) Кикер для возбуждения поперечных бетатронных колебаний и пикап для наблюдения за ними.
- е) 2 системы для оптического наблюдения за пучками (отдельно для позитронов и электронов), включающие в себя:
 - 1) телекамеру;
 - 2) ФЭУ (наблюдение за инжекцией);
 - 3) диссектор для наблюдения поперечных размеров сгустков;
 - 4) систему для измерения продольного размера сгустка с разрешением ≈ 0.5 нс;
 - 5) систему измерения «паразитных» сепаратрис.
- ж) Датчик потерь пучка для изучения «хвостов» распределения.
- з) Пробники механические:
 - 1) пробники-карманы на «носиях» септум-магнитов (4 шт.);
 - 2) пробники-карманы в районе инфлекторов - для наблюдения за траекторией пучка при инжекции (2 шт.);Пробники-карманы могут играть роль апертурного пробника в радиальном и вертикальном направлениях.

11. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА НАКОПИТЕЛЯ

Поскольку схема работы накопителя не предполагает иметь циркулирующий пучок внутри него длительное время, достаточно иметь время жизни пучка на уровне несколько десятков или сотен секунд. Требования на вакуум, по-видимому, будут определяться желанием избежать нелинейных резонансов, возникающих при накоплении в электронном пучке положительных ионов остаточного газа. При этом рабочий вакуум накопителя p не должен быть хуже $5 \cdot 10^{-9}$ Торр.

Величина рабочего вакуума определяется газоотделением стенок вакуумной камеры под действием синхротронного излучения.

$$Q = \frac{\dot{N} \cdot \eta}{3.5 \cdot 10^{19}} \quad 1$$

Здесь Q - газоотделение под действием СИ $\frac{\text{л} \cdot \text{торр}}{\text{сек}}$
 \dot{N} - число фотонов, приводящих к десорбции фотон/сек
 η - коэффициент газоотделения мол/фотон

В свою очередь:

$$\dot{N} = 7 \cdot 10^{20} E \cdot I \quad 2$$

Здесь E в Гэв, I в А. После тренировки вакуумной камеры пучком можно надеяться иметь коэффициент газоотделения η на уровне $1 + 3 \cdot 10^{-5}$. При $E = 0.51$ Гэв, $I = 0.04$ А, $Q \approx 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{л} \cdot \text{торр}}{\text{сек}}$ (для $\eta = 1 \cdot 10^{-5}$). Суммарная эффективная скорость откачки, определяемая как:

$$S_{\text{эф}} = \frac{Q}{p}, \quad 3$$

для $p = 5 \cdot 10^{-9}$ Торр равна 800 л/торр. При этом необходимо иметь некий запас, т.к. в начальный период работы накопителя коэффициент газоотделения будет достигать большей величины: $\eta \approx 10^{-3} + 10^{-4}$.

Исходя из выбранной магнитной структуры накопителя расположение откачных устройств изображено на рис 4. Предполагается использовать 18 откачных узлов на базе магнитоэлектрического насоса и испарителя титана ПВИГ-100/160 с производительностью 100 л/сек и диапазоном рабочего давления $10^{-7} + 10^{-10}$ Торр. При величине $\eta = 1 \cdot 10^{-3}$ среднее давление будет на уровне $2 \cdot 10^{-7}$ Торр. После набора интеграла тока порядка 10 А·час рабочее давление должно быть не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ Торр в азотном эквиваленте при $\eta = 3 \cdot 10^{-5}$. Измерение давления будет производиться с помощью вакууметров типа ВМБ 1/4

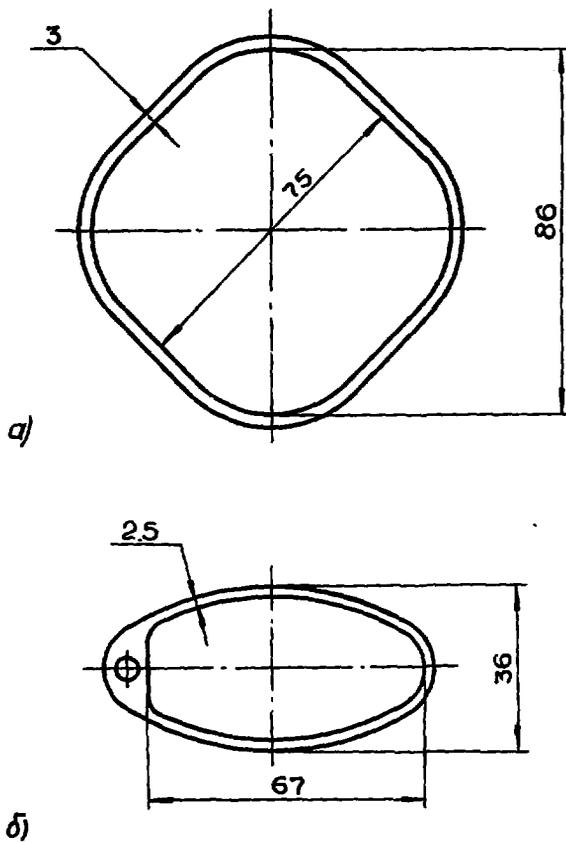


Рис. 18. Сечение вакуумной камеры а) - в прямолинейных промежутках, б) - в поворотных магнитах.

оперативный контроль за вакуумом предполагается осуществлять по току магнито-разрядных насосов.

Вакуумная камера полуколец и коротких прямолинейных промежутков изготавливается из алюминиевого сплава АИЦС. Длинные прямолинейные промежутки будут изготовлены из нержавеющей стали 1Х18Н10Т. При этом поперечное сечение длинных прямолинейных промежутков существенно отличается от поперечного сечения вакуумной камеры полуколец. Это вызвано необходимостью иметь достаточно высокое волновое сопротивление пластин кикеров, расположенных в длинных прямолинейных промежутках. На рис. 18 а) и б) изображено поперечное сечение вакуумной камеры обоих типов.

Накопитель по периметру рассекается чистометаллическими прямопролетными затворами, закорачиваемыми на вакуумную камеру в выведенном состоянии для сохранения ее гладкости. Всего предполагается использовать 6 затворов. Их расположение определяется желанием иметь возможность вскрытия прямолинейных промежутков не нарушая вакуума полуколец. Предполагается иметь возможность прогрева вакуумной камеры полуколец до температуры порядка 150°C , прямолинейных промежутков - 300°C . При этом начальную откачку вакуума предполагается осуществлять при помощи черновых магниторазрядных насосов типа НОРД-100, которые отсекаются от основных вакуумных элементов шиберами ДУ-25.

ЖИТЕРАТУРА

- 1 - H. Bruck : Accélérateurs Circulaires de Particules,
Press Universitaires de France, 1966.
- 2 - J. Le Duff : Single and multiple Touschek effects,
Proc. of the CERN Accelerator School, Berlin, 1987

*В.В. Акашич, С.А. Беломестный, А.Н. Ворошилов,
Б.И. Гришинов, А.А. Диденко, Н.С. Диканский,
М.Н. Захваткин, В.Я. Корчагин, Н.А. Кузнецов,
И.В. Курцов, В.А. Лебедев, П.В. Логачев,
С.И. Мишнев, А.Ю. Носарев, В.В. Пархомчук,
С.В. Тамбовцев, В.Е. Якименко*

**Накопитель-охладитель
для инжекционного комплекса
ВЭПП-5**

ИЯФ 92-44

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 18 июня 1992 г.
Подписано в печать 18 июня 1992 г.
Формат бумаги 60×90 1/16. Объем 3,4 печ.л., 2,7 уч.-нод.л.
Тираж 220 экз. Бесплатно. Заказ N 44.

Обработано на IBM PC и отпечатано на
роталпринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.