

СЗ45е2
Б-202

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3093 / 2-76

9/III-76

P9 - 9702

А.М.Балдин, В.П.Белов, Б.В.Василишин,
Г.М.Дерюгин, Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский,
Е.М.Кулакова, Л.Г.Макаров, В.А.Михайлов,
Н.А.Моносзон, В.П.Надгорный, И.Н.Семенюшкин,
И.А.Шукейло

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬ
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛВЭ

(Основные задачи и выбор структуры)

1976

P9 - 9702

А.М.Балдин, В.П.Белов,* Б.В.Василишин,
Г.М.Дерюгин,* Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский,
Е.М.Кулакова, Л.Г.Макаров, В.А.Михайлов,
Н.А.Моносзон,* В.П.Надгорный,* И.Н.Семенюшкин,
И.А.Шукейло*

**ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬ
ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ЛВЭ**

(Основные задачи и выбор структуры)

* НИИЭФА им. Д.В.Ефремова

Планами развития ОИЯИ предусматривается изучение возможности создания сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер на энергию до 15 ГэВ на нуклон, который впоследствии должен будет заменить синхрофазотрон. Вместе с тем уже в настоящее время в Лаборатории высоких энергий осуществляется большая экспериментальная программа по релятивистской ядерной физике, проводимая на пучках синхрофазотрона. В обоих случаях для ускорения полностью ионизированных ядер, полученных из инжектора, необходимо создание современного инжекционного комплекса на энергию порядка нескольких сот МэВ. Это позволит на несколько порядков снизить неприемлемо большие потери пучка на остаточном газе основного ускорителя, уменьшить влияние остаточных полей при инжекции, а также значительно отодвинуть ограничения по пространственному заряду, которые уже сейчас сказываются при получении ускоренного пучка высокой интенсивности.

Сооружение ускорителя на такую энергию обеспечивает также проведение экспериментальных программ в ряде прикладных областей, в том числе в медико-биологических исследованиях.

Предварительные соображения по созданию сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер, получившего название "Нуклотрон", были опубликованы в работе ^{1/}. В дальнейшем в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова и ЛВЭ ОИЯИ были проведены совместные детальные проработки этой установки ^{2/}. Они легли в основу технических предложений по созданию инжекционного комплекса ЛВЭ и, в частности, его промежуточного кольцевого ускорителя /ПКУ/, главные параметры и режимы работы которого описаны ниже.

1. Требования, предъявляемые к ПКУ

Размещение основного сверхпроводящего кольца /ОКУ/ нуклотрона в цокольном этаже существующего здания ускорителя, продиктованное рядом экономических и технических соображений, определило выбор его главных параметров: длина орбиты составляет около 250 м, магнитная структура ФОДО с разделенными функциями содержит 32 периода, сгруппированных в 8 суперпериодов. Ограниченность апертуры в сверхпроводящих магнитах ОКУ и уровень "замороженных" полей в области $\sim 0,2$ Т приводит к необходимости осуществлять инъекцию ядер при энергии 400-500 МэВ на нуклон. Основные параметры ОКУ, приведенные в табл. 1, определяют главные требования к ПКУ - его энергию, длину орбиты и т.д.

Таблица 1

Основные параметры ОКУ

Длина орбиты	249,6 м
Начальная энергия ядер	0,52 ГэВ/нукл.
Поле инъекции в диполях	0,34 Т
Конечная кинетическая энергия ядер при поле 5 Т	15,7 ГэВ/нукл.
Частота бетатронных колебаний	$\sim 6,75$
Зона рабочего поля в диполях и квадруполях	8 см
Акцептанс A_x	3 псм.мрад.
A_z	4,6 псм.мрад.
Длительность цикла	15-20 с.

Частота работы ПКУ определяется частотой посылок линейного ускорителя и в настоящее время ограничена 1 Гц. ПКУ, предназначенный для инъекции частиц в сверхпроводящее кольцо, еще до сооружения последнего может быть использован в качестве инжектора синхрофазотрона.

В этом случае требования к нему будут менее жесткими, в частности, инъекция будет производиться 1 раз в 9-10 секунд.

Поскольку пучок ПКУ в промежутках между инъекциями в следующий каскад может быть использован в экспериментальной онкологии^{/3/}, космической биологии^{/4/} и др., при проектировании ускорителя должны быть также приняты во внимание условия проведения этих экспериментов. В первом случае ставится вопрос о получении пучков легких ядер, имеющих пробег в живых тканях 20-30 см. Для этих целей необходима энергия до 500 МэВ/нуклон. Эта энергия удачно совпадает с энергией, получаемой в ПКУ для инъектирования.

Для решения поставленных выше задач необходимо создание двух систем вывода: быстрой /однооборотной/ для инъекции в ОКУ или синхрофазотрон и медленной, позволяющей использовать электронную регистрирующую аппаратуру при проведении экспериментов на внешнем пучке.

Получение полностью ионизированных ядер с отношением заряда ядра к его массе $1/2$ /в относительных единицах к водороду/ планируется осуществлять с помощью разрабатываемого в ЛВЭ электронно-лучевого источника "Крион"^{/5/}.

Сравнительно большая длительность импульса тока частиц / ~ 40 мкс/, получаемых в этом источнике, приводит к необходимости создания системы многооборотной инъекции. Предварительные расчеты показали возможность заполнения поперечного 4-мерного фазового объема ускорителя с помощью резонанса связи $Q_x - Q_z = 0$ ^{/6,7/} в течение ~ 25 оборотов. Связь колебаний можно осуществить, например, созданием постоянной составляющей продольного магнитного поля.

При инъекции в горизонтальной плоскости начальное смещение пучка относительно равновесной орбиты определяет характер изменения амплитуд бетатронных колебаний: горизонтальные амплитуды изменяются по косинусному, а вертикальные по синусному законам. Инъекция будет наиболее эффективной, если колебания в обеих плоскостях синфазны или противофазны^{/7/}. В этом случае

на первых, наиболее опасных оборотах, вследствие быстрого роста вертикальных амплитуд частицы будут обходить инфлектор по вертикали. За время, равное периоду модуляции амплитуд, равновесная орбита должна сместиться к центру камеры на расстояние, равное горизонтальному размеру инжектируемого сгустка.

При эмиттансе пучка на выходе из линейного ускорителя $\epsilon_{x,z} = 2,8 \text{ п.с.м.рад.}$ и эффективности заполнения поперечного фазового объема 0,6-0,7 аксептанс ПКУ для данного числа оборотов должен составлять $A_x = A_z = \sqrt{20-23/\pi} \text{ с.м.рад.}$

Для исключения потерь ядер в процессе инжекции и на начальной стадии ускорения должны выполняться требования, касающиеся как энергии инжектируемого пучка, так и поддержания в камере достаточно высокого вакуума. При запланированной энергии инжекции 12 МэВ/нукл. потери за счет перезарядки^{/8/} для ядер вплоть до Ca^{+20} будут достаточно малыми при давлении в камере не выше 10^{-8} Тор.

2. Оценка основных параметров и расчет магнитной структуры

При разработке ПКУ были рассмотрены два варианта его расположения относительно основного ускорителя:

1/ ПКУ и ОКУ имеют одинаковый радиус и располагаются в кольцевом тоннеле один над другим;

2/ промежуточное кольцо имеет радиус 13-14 м и расположено в существующем здании рядом с линейным ускорителем. В первом варианте предполагается однократная инжекция, во втором-инжекцию целесообразно сделать многократной /до 4-х импульсов в ОКУ/.

Детальная проработка и сравнение этих вариантов показали, что целесообразно выбрать ПКУ малого радиуса /рис. 1/.

Такой вариант обладает рядом преимуществ, в частности, дает возможность уже в ближайшее время приступить к созданию ПКУ, получив тем самым существенный выигрыш во времени сооружения ускорительного

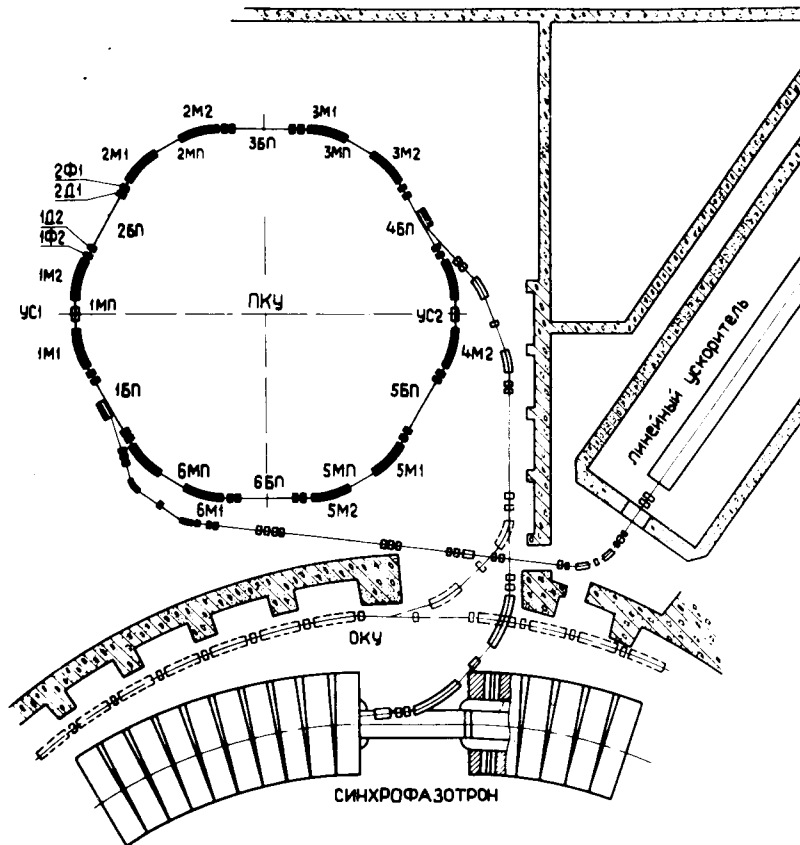


Рис. 1. Общая схема ПКУ. БП и МП - большие и малые прямолинейные промежутки. М - дипольные, Ф - и Д - квадрупольные фокусирующие и дефокусирующие в горизонтальной плоскости магниты. /Цифра перед обозначением указывает на номер периода, цифра после обозначения - номер элемента в периоде/. УС1 и УС2 - ускоряющие станции.

комплекса, и на первом этапе использовать ПКУ как инжектор синхрофазотрона.

Однооборотный перевод пучка из ПКУ в синхрофазотрон, а впоследствии в ОКУ, будет производиться с помощью ударного и септум-магнитов. Для синхронизации работы ОКУ и ПКУ необходимо наложить ограничение на соотношение их параметров:

$$\frac{P_{\text{ОКУ}}}{P_{\text{ПКУ}}} = \frac{m}{n} \pm \delta, \quad /1/$$

где m и n - небольшие целые числа, δ - малая величина, обеспечивающая скольжение фазы инжектируемого в ОКУ пучка.

В нашем случае отношение m/n было взято равным 3. При этом потребуется сравнительно небольшое расширение существующего здания, в котором предполагается разместить ПКУ, а общая длина дипольных магнитов с максимальной индукцией 1,4 Т составит примерно 40% периметра ПКУ. Дальнейшее уменьшение периметра ПКУ при сохранении максимальной энергии приведет к увеличению доли периметра, занятой дипольными магнитами, и к нежелательному сокращению общей длины прямолинейных промежутков. Перевод пучка в ОКУ должен производиться в момент достижения требуемой фазы в окрестности максимальной энергии без перестройки режима ускорения ПКУ. Параметр δ определяется максимально допустимым радиальным разбросом в ОКУ ($\Delta r_{\text{ОКУ}}$) различных инжектируемых сгустков, вызванным их разбросом по импульсам в момент перевода. В нашем случае $\delta = 0,017$, что соответствует $\Delta r/p = 0,03\% / \Delta r_{\text{ОКУ}} = 0,1 \text{ см/}$.

Важным фактором при выборе типа структуры ПКУ /совмещенные или разделенные функции фокусировки и поворота/ явилось то, что требование равенства горизонтального и вертикального аксептансов приводит к необходимости увеличения вертикального зазора дефокусирующих блоков в случае ускорителя с совмещенными функциями. Для синхротрона с разделенными функциями поворотные магниты можно установить в минимуме вертикальной огибающей, существенно уменьшив вертикальный зазор и, следовательно, энергию, запасаемую в магнитах. Энергия, запасаемая в линзах, относительно мала, что позволяет сделать их большей апертуры. Таким образом, с точки зрения потребляемой электрической мощности ПКУ с разделенными функциями будет более экономичным. Другим важным преимуществом является возможность изменения частот бетатронных колебаний в широком диапазоне, что существенно при ускорении высокоинтенсивных сгустков.

При выборе конкретного вида структуры ПКУ учитывался ряд требований, связанных с решением задач многооборотной инъекции, быстрого и медленного вывода, введения коррекций и др.

Для размещения необходимого оборудования общая длина свободных промежутков должна составлять 30-35 м. При окончательном отклонении пучка за наружные габариты элементов структуры при выводе, а также для инъекции необходимы промежутки длиной ~4 м. Как быстрый, так и медленный вывод предполагается осуществлять в горизонтальной плоскости. Для обеспечения высокой эффективности медленного вывода горизонтальная огибающая пучка в промежутке, где расположен первый отклоняющий септум-магнит, должна быть максимальной. Этому же условию должна удовлетворять горизонтальная огибающая пучка в промежутке, где находится ударный магнит быстрого вывода, чтобы уменьшить требуемое поле в этом магните. Для размещения первой ступени отклонения пучка при медленном выводе длина соответствующего промежутка должна составлять ~2 м. Так как обход инфлектора при многооборотной инъекции будет происходить по вертикали, для снижения потерь вертикальная огибающая пучка на участке инъекции должна быть максимальной.

Из сказанного следует, что в структуре должно быть предусмотрено 2 типа прямолинейных промежутков:

- 1/ промежутки с максимальной вертикальной огибающей;
- 2/ промежутки с максимальной горизонтальной огибающей;

Один из промежутков первого типа будет использован для инъекции, и поэтому длина его должна быть ~4 м. Следовательно, в промежутках этого типа целесообразно осуществлять окончательное отклонение пучка при быстрым и медленном выводе. Дипольные магниты выгодно располагать там, где вертикальная огибающая пучка существенно меньше горизонтальной.

Для упрощения схем вывода и инъекции желательна параллельность огибающих пучка в свободных промежутках.

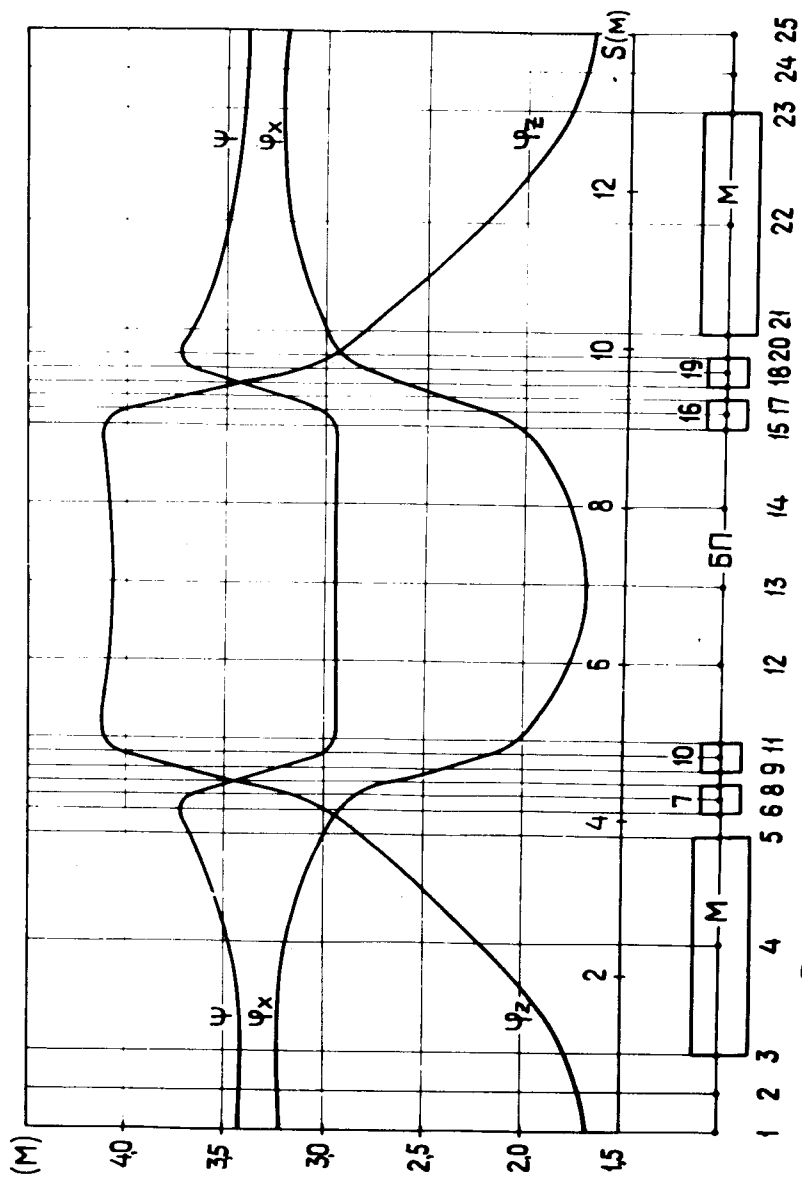


Рис. 2. Структура периода ПКУ, ϕ_x и ϕ_z - модули горизонтальной и вертикальной функций Флоке и ψ -функция.

Из ряда рассмотренных структур перечисленным требованиям наиболее полно удовлетворяет структура типа ФОФДОД. Между фокусирующими линзами находятся два дипольных магнита, разделенных промежутком с максимальной горизонтальной огибающей. Так как увеличение длины этого промежутка приводит к возрастанию требуемой вертикальной апертуры дипольных магнитов, длина его ограничена 2 м. При периметре ПКУ 84 м наиболее приемлемое с точки зрения свободного пространства, акцептанса и градиентов квадрупольных линз число периодов составляет $N = 6$ /рис. 1/. Максимальное значение акцептанса в обеих плоскостях достигается тогда при частоте, близкой к $Q = 2,25$. На рис. 2 схематически показан период ПКУ, а также модуль функций Флоке и ψ -функция. Тот факт, что в свободных промежутках модули горизонтальных и вертикальных функций Флоке достигают почти экстремальных значений, позволяет производить практически независимую коррекцию параметров в горизонтальной и вертикальной плоскости /горизонтальная и вертикальная проекции орбиты, частота горизонтальных и вертикальных колебаний и т.д./, что является еще одним важным преимуществом данной структуры.

Применение в структуре ПКУ стандартных квадрупольных линз 15К, 30А-1000 обеспечивает требуемое значение акцептанса в обеих плоскостях, которое в этом случае составляет 22π см.мрад. Эта величина была взята в дальнейшем в качестве исходного значения при определении акцептанса и апертур магнитных элементов ОКУ.

В табл. 2 приведен расчет горизонтального и вертикального акцептансов ПКУ на основе рабочего значения апертур линз. Табл. 3 показывает расчет апертур диполей в соответствии с полученным акцептансом. Значения модуля горизонтальной и вертикальной функций Флоке, а также значения ψ -функции в различных точках периода ПКУ приведены в табл. 4.

Следующей важной характеристикой является предельная интенсивность ускоренных частиц, определяемая эффектом некогерентного сдвига частот бетатронных

Таблица 2

Расчет аксептанса ПКУ

Параметр	Формула	Горизонтальная Плоскость	Вертикальная Плоскость
1. Рабочая полуапертура линзы 15к 30А-(см)	$\alpha_{л1}$	6,75	6,75
	$\Delta_{л1} = \Delta_{мин} \frac{19/линзы}{19/линзы}$		
2. Нестабильность орбиты в линзе (см)	$\Delta_{мин} = 0,25 \text{ см}$	0,44	0,61
3. Амплитуда радиальных синхротронных колебаний в линзе (см)	$\Delta_{сл} = \frac{\Delta P}{P} \Psi_{линзы}$		
	$\frac{\Delta P}{P} = 0,005$	1,86	-
4. Амплитуда бета-ронных колебаний в линзе (см)	$\Delta_{\beta} = \alpha_{л1} - \Delta_{л1} - \Delta_{сл}$	4,45	6,14
5. Аксептанс (см.мрад)	$\Lambda = \left(\frac{\Delta_{\beta}}{19/линзы} \right)^2$	23 П*	22 П

Таблица 3

Расчет апертур диполей ПКУ

Параметр	Формула	Горизонтальная Плоскость	Вертикальная Плоскость
1. Амплитуда бета-ронных колебаний в магните (см)	$\Delta_{\beta M} = 19/маг \cdot \sqrt{A}$	4,79	4,18
2. Амплитуда радиальных синхротронных колебаний в магните (см)	$\Delta_{сл} = \frac{\Delta P}{P} \Psi_{магн.}$	1,84	-
3. Нестабильность орбиты в магните (см)	$\Delta_{M} = \Delta_{мин} \frac{19/магн.}{19/линзы}$	0,48	0,42
4. Рабочая апертура магнита (см)	$\alpha_{M} = 2(\Delta_{\beta M} + \Delta_{сл} + \Delta_{M})$	14,2**	9,2

* Из условия равенства горизонтального и вертикального аксептансов в дальнейшем для Λ_{x} берется значение 22П.

** Для вывода пучка требуется дополнительное увеличение горизонтальной апертуры магнита на 3-4 см, но к полю в этой расширенной части апертуры предъявляются значительно менее жесткие требования.

Таблица 4

Характеристики магнитной структуры ПКУ

Точка	$ \varphi_x $ (м)	ψ (м)	$ \varphi_z $ (м)
I	3,213	3,410	1,682
2.	3,217	3,410	1,708
3	3,229	3,410	1,784
4	3,189	3,476	2,207
5	2,994	3,671	2,819
6	2,938	3,726	2,964
7	2,840	3,677	3,124
8	2,616	3,465	3,426
9	2,390	3,233	3,728
10	2,165	3,018	4,013
11	2,049	2,947	4,106
12	1,777	2,947	4,085
13	1,676	2,947	4,077
14	1,777	2,947	4,085
15	2,049	2,947	4,106
16	2,165	3,018	4,013
17	2,390	3,233	3,728
18	2,616	3,465	3,426
19	2,840	3,677	3,124
20	2,938	3,726	2,964
21	2,994	3,671	2,819
22	3,189	3,476	2,207
23	3,229	3,410	1,784
24	3,217	3,410	1,708
25	3,213	3,410	1,682

14 Номер точек соответствует рис. 2.

колебаний. Ограничивая сдвиг $|\Delta Q_{x,z}| < 0,2$, найдем предельный ток ядер $N_{\text{пред}}^{\text{я}} = 6 \cdot 10^{12}/z$.

Основные параметры ПКУ приведены в табл. 5.

При проектировании высокочастотной системы ПКУ предусматривается возможность ускорения протонов. В этом случае их максимальная энергия составит 1,5 ГэВ, диапазон изменения частот будет 0,57-3,3 МГц, предел интенсивности по объемному заряду - до $\sim 3 \cdot 10^{12}$ протонов/цикл.

Таблица 5

Основные параметры промежуточного кольца нуклотрона

1. Общие данные	
Максимальная энергия	0,52 ГэВ/нукл.
Энергия инжекции	12 МэВ/нукл.
Максимальное поле в дипольных магнитах	1,4 Т
Поле инжекции	0,187 Т
Максимальный градиент в квадрупольных линзах	10,3 Т/м
Градиент в квадрупольных линзах при инжекции	1,379 Т/м
Периметр, $2\pi R$	83,7 м
Радиус кривизны в дипольных магнитах, ρ	5,258 м
Отношение среднего радиуса к радиусу кривизны в дипольных магнитах, R/ρ	2,486 м
Диапазон изменения частоты ускоряющего напряжения	0,57-2,76 МГц
Кратность	1
Количество ускоряющих станций	2
Давление в вакуумной камере	$10^{-8} \div 10^{-9}$ Тор
Предельная интенсивность по объемному заряду в цикле	$6 \cdot 10^{12}/z$ ядер

2. Структура	
Количество периодов	6
Количество дипольных магнитов	12
Количество квадрупольных магнитов	24
Структура периода	ОМФДОДФМО
Длина периода	13,95 м
Длина большого прямолинейного промежутка	3,95 м
Длина малого прямолинейного промежутка	2 м
Эффективная длина дипольного магнита	2,8 м
Эффективная длина квадрупольного магнита	0,375 м
Расстояние между соседними линзами	0,15 м
Расстояние между соседними дипольными магнитом и линзой	0,3 м

3. Динамика	
Частота бетатронных колебаний, $Q_{x,z}$	2,25
Набег фазы за период, $\mu_{x,z}$	135°
Значение модуля функции Флоке в горизонтальной плоскости, $ \phi_x _{\max}$	3,23 м
$ \phi_x _{\min}$	1,68 м
Значение модуля Флоке в вертикальной плоскости, $ \phi_z _{\max}$	4,11 м
$ \phi_z _{\min}$	1,68 м
Максимальное значение ψ -функции	3,48 м
Акцептанс, $A_{x,z}$	22 п.с.м.град

Эмиттанс инжектируемого пучка $\epsilon_{x,z}$	2,8 п.с.м.град.
Эмиттанс пучка в конце ускорения, $\epsilon_{x,z}$	2,9 п.с.м.град
Импульсный разброс, $\Delta p/p$ при инжекции	$\pm 0,5\%$
в конце инжекции	$\pm 0,16\%$
Приведенная скорость, $\beta=v/c$ в начале ускорения	0,163
в конце ускорения	0,765
Отношение импульсов в конце и в начале ускорения	7,47

4. Цикл ускорения

Длительность цикла	1 с
Время инжекции	40 мкс
Длительность быстрого вывода	0,2 мкс
Длительность медленного вывода	0,1 с

Литература

1. В.П.Алексеев, А.М.Балдин, А.А.Васильев и др. ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.
2. А.М.Балдин и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, стр. 4, Москва, Наука, 1975.
3. В.П.Джелепов, Д.В.Савченко, А.И.Рудерман, Г.В.Макарова. Нуклотрон и релятивистская ядерная физика. Проблематика исследований и методика эксперимента. ОИЯИ, 8309, стр. 171, Дубна, 1974.
4. Н.И.Рыжов, Б.С.Федоренко. см. /3/, стр. 201.
5. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. ОИЯИ, Р7-7999, Дубна, 1974; те же, ЖТФ, XLV, 11, 2373 /1975/.

6. В.А.Тимов, И.А.Шукейло. ЖТФ, XXXVIII, 10, 1752 /1968/.
7. А.М.Громов, П.А.Черенков. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, II, 110, Москва, Наука, 1973.
8. В.С.Николаев. УФН, 84, №4, 679 /1965/.

*Рукопись поступила в издательский отдел
8 апреля 1976 года.*