

М-69

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.384.634.5

9-89-265

МИХАЙЛОВ

Владимир Афанасьевич

**ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ НУКЛОТРОНА**

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат технических наук
старший научный сотрудник

ИССИНСКИЙ
Игорь Борисович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

ДАНИЛОВ
Владимир Иванович

кандидат технических наук
старший научный сотрудник

ФЕДОТОВ
Юрий Сергеевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт теоретической и экспериментальной физики, г.Москва.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1989 года
в "___" часов на заседании специализированного совета
Д-047.01.01 при Лаборатории высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований, г.Дубна Московской области.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1989 г.

Ученый секретарь

специализированного совета

М.Ф.Лихачев

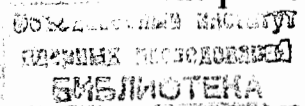
АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В 1970 году на синхрофазотроне ОИЯИ впервые в мире были ускорены до релятивистских энергий ядра изотопа водорода, дейтроны. Целью первого эксперимента являлось решение конкретной задачи по изучению свойств ядерной материи на малых расстояниях. Однако открывшиеся возможности оказались настолько уникальными, что уже в 1971 году А.М.Балдиным была предложена широкая программа исследований фундаментальных проблем физики ядра и элементарных частиц на пучках релятивистских ядер.

Результаты проведенных в последующие годы экспериментов подтвердили актуальность и перспективность нового научного направления - релятивистской ядерной физики. Полученные на синхрофазотроне ОИЯИ физические результаты стимулировали реконструкцию ряда действующих протонных синхротронов и разработку проектов новых комплексов тяжелых ионов на средние и высокие энергии.

В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в целях адекватного обеспечения экспериментальных исследований ионными пучками был разработан проект ускорительного комплекса релятивистских ядер - нуклотрона. Основным его элемент - сооружаемый в настоящее время сверхпроводящий синхротрон - по своим параметрам должен превосходить синхрофазотрон и призван в дальнейшем его заменить.

Первоначальный вариант физического обоснования нуклотрона /1/ неоднократно подвергался пересмотру с позиций достижений ускорительной и криогенной техники. Работа, проводимая в рамках проекта, была направлена на поиски оптимальных решений, которые могли бы поставить задачу сооружения комплекса на реальную основу как с технической, так и с экономической точек зрения. При этом в качестве наиболее важных были сформулированы следующие требования:

- существенное продвижение по массам ускоряемых ионов - вплоть до урана;
- увеличение интенсивности и длительности вывода пучков тяжелых ионов;
- снижение энергопотребления и эксплуатационных затрат;
- максимальное использование имеющихся зданий, оборудования и коммуникаций;
- обеспечение перспективы развития комплекса.



ЦЕЛЮ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ являлось:

- 1) исследование возможных вариантов магнитных структур нуклотрона, выбор оптимального варианта с учетом перечисленных выше требований;
- 2) расчет основных параметров комплекса, его магнитных элементов, характеристик пучков тяжелых ионов;
- 3) выбор оптимальных технических решений схем ввода и вывода пучка;
- 4) разработка заданий на проектирование и создание систем и элементов основного кольца нуклотрона.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Проведено комплексное исследование магнитных структур синхротронов, предназначенных для ускорения тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий.

Изучены возможности оптимальной расстановки структурных элементов с целью коррекции замкнутой орбиты, сдвигов частот и резонансов бетатронных колебаний.

Исследованы дисперсионные свойства магнитной структуры синхротрона, сформулированы условия получения однородного по составу пучка на выходе из ускорителя.

Произведен расчет двух оригинальных методов накопления тяжелых ионов в синхротронах: многократной инжекции ступок малой протяженности и инжекции ионов с перезарядкой.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ. Результаты проведенных исследований легли в основу технических заданий на проектирование основных систем нуклотрона, который в настоящее время сооружается.

АВТОР ЗАЩИЩАЕТ:

- 1) выбор оптимальной конфигурации магнитной структуры нуклотрона, расчет ее основных параметров;
- 2) анализ особенностей синхротронного ускорения тяжелых ионов;
- 3) разработку трех вариантов магнитных структур тяжелоионных синхротронов – бустеров на средние энергии с различными типами источников и инжекторов;
- 4) методы и результаты расчета двух способов накопления тяжелых ионов в синхротронах;
- 5) результаты моделирования возможностей оптимальной расстановки структурных элементов по данным магнитных измерений;
- 6) исследование дисперсионных свойств магнитной структуры нуклотрона;
- 7) схемы и основные параметры систем ввода и вывода нуклотрона.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах ЛВЭ ОИЯИ, на всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, на Национальной ускорительной конференции США. По материалам выполненных исследований опубликовано 15 печатных работ, приведенных в списке литературы.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 102 страницы текста, включая 42 рисунка и библиографический список литературы из 62 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ определены задачи исследования и приведен краткий обзор наиболее важных работ по данной тематике, выполненных в ЛВЭ и других лабораториях мира.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ приведены результаты расчета бистроциклических ионных синхротронов на средние энергии, способных работать как в режиме бустера нуклотрона, так и на физический эксперимент.

В основном особенности синхротронного ускорения тяжелых ионов обусловлены: сравнительно низкой эффективностью взаимодействия ионов с внешними электрическими и магнитными полями (отношение заряда к массовому числу для протонов $q/A = 1$, для ядер $q/A \leq 0,5$); малой фазовой плотностью инжектируемых ионных пучков; высокой вероятностью перезарядки ионов на молекулах остаточного газа; возможностью ускорения пучков, обладающих спектром зарядностей и масс.

Из приведенного в диссертации анализа этих факторов следует, что

1) к основным системам ионного синхротрона (магнитной, электрической, вакуумной и ускоряющей) предъявляются достаточно жесткие для данного класса ускорителей требования;

2) максимальные значения энергии, интенсивности, а также диапазон масс ускоряемых ионов взаимосвязаны и в значительно большей степени, чем в протонных синхротронах, определяют размеры и стоимость комплекса;

3) принципиально новой для синхротронов является проблема парциального состава пучка и ее решение в основном определяется возможностями источников и инжекторов.

Включение в схему комплекса промежуточного ускорителя, бустера, позволяет существенно ослабить требования к системам основного кольца. Описание трех таких ускорителей, предложенных в разное время в качестве вариантов бустера нуклотрона, приведено ниже (основные параметры даны в таблице I). Динамические характеристики их магнитных структур рассчитаны по программе SYNCSEL^{12/}.

Промежуточный кольцевой ускоритель (ПКУ) ^{/3/}. В качестве инжектора был выбран модернизированный линейный ускоритель ЛУ-20 на энергию 12 МэВ/нуклон и с отношением заряда к массовому числу ионов $0,3 \leq q/A \leq 0,5$. Из ряда рассмотренных магнитных структур перечисленным выше требованиям наиболее полно удовлетворяет шестипериодная структура типа ФФДЮД. Максимальное значение аксептанса в обеих плоскостях $S_{x,z} = 220 \pi$ мм.мрад достигается при частотах бетатронных колебаний $Q_x = Q_z = 2,25$. При эмиттансе инжектируемого пучка $\epsilon_{x,z} = 30 \pi$ мм.мрад и импульсном разбросе $(\Delta p/p) = 5 \cdot 10^{-3}$ возможно накопление ионов по двум степеням свободы с использованием резонанса связи $Q_x - Q_z = 0$ в течение 25 оборотов с эффективностью ~50%.

Тяжелоионный синхротрон (ТИС) ^{/4/}. При проектировании комплекса ^{/5,6/} были рассмотрены два типа инжекторов для ТИСа: линейный и коллективный ускорители на энергию 10 и 20 МэВ/нуклон соответственно. Магнитная структура ^{/7/} состоит из 16 периодов, в каждый из которых входят два дипольных магнита и симметричный триплет квадрупольных линз.

Продольные размеры сгустков на выходе коллективного ускорителя в 12 раз меньше периметра синхротрона, что позволяет осуществлять многократный ввод сгустков в ТИС ^{/8/} по классической схеме однооборотной инжекции, когда каждый последующий сгусток инжектируется после заполнения предыдущим всего периметра ускорителя. При этом происходит выбивание части накопленного пучка, имеющего сравнительно малую фазовую плотность, и посадка очередного, более плотного сгустка в освободившуюся часть продольного фазового пространства. Расчеты показали, что при пятикратной инжекции интенсивность ионов урана будет в 2,7 раза больше по сравнению с однооборотной.

Наряду с разработкой "классических" способов инжекции было проведено изучение накопления пучка с изменением зарядностей ионов, аналогично инжекции H^- . Для реализации данного метода была предложена симметричная двенадцатипериодная структура ^{/9/} с периметром 150 м, элемент периодичности которой, аналогично ТИСу, состоит из триплета квадрупольных линз ФДФ и двух дипольных магнитов. Для компенсации разброса частот бетатронных колебаний в структуру вводятся секстипольные и октупольные корректоры ^{/10/}.

На основании имеющихся данных о сечениях перезарядки ионов были выполнены расчеты трансформации зарядовых состояний при взаимодействии ионов урана с азотной мишенью и проведено численное моделирование накопления частиц в синхротроне. Показано, что для технически реализуемых напряжений $U < 100$ кВ/оборот, необходимых

для компенсации потерь энергии, наиболее предпочтительным является диапазон энергий инжекции от 3 до 7 МэВ/нуклон. Импульсная интенсивность синхротрона в этом случае может быть увеличена в $(10 \div 30)$ раз.

В рассмотренном варианте магнитной структуры существует также возможность повышать среднюю зарядность пучка тяжелых ионов в процессе ускорения за счет постепенной обдирки. В таблице I приведены основные параметры такого синхротрона, способного ускорять ионы как с изменяющейся зарядностью ($q = \text{var}$), так и с постоянной ($q = \text{const}$).

Таблица I

Основные параметры магнитных структур бустеров нуклотрона

№ Параметр	ПКУ	ТИС	Синхротрон	
			q=var	q=const
1. Максимальная энергия ядер с $q/A = 0,5$	МэВ/н. 520	620	250*	920
2. Энергия инжекции	МэВ/н. 12	20	3	10
3. Максимальная магнитная жесткость	Тл.м 7,4	8,3	6,3	10,7
4. Периметр	м 84	155	150	150
5. Число периодов	6	16	12	12
6. Частота бетатронных колебаний:				
горизонтальных		2,25	4,75	7,25 3,25
вертикальных		2,25	3,75	3,25 3,25
7. Индукция в дипольных магнитах	Тл 1,4	1,1	0,73	1,24
8. Градиент в квадрупольных линзах	Тл/м 10,3	8,7	11,2	10,6
9. Апертура дипольных магнитов:				
горизонтальная	мм 180	150	240	240
вертикальная	мм 90	54	100	100
10. Апертура квадрупольных линз (диаметр вписанной окружности)	мм 130	130	240	240
11. Частота повторения циклов	Гц 1	1	10	10
12. Время инжекции	мкс 40	2,5x5	240	20

* Энергия ионов урана при $q = 92$.

Уже из простого сравнения параметров этих ускорителей следует, что поиски экономичных вариантов бустеров и инжекторов следует в первую очередь искать в разработках сильноточных источников с высокой степенью ионизации атомов и малой длительностью импульса. С учетом возможного прогресса в создании таких источников (электронно-

лучевого, лазерного и других) предпочтение следовало бы отдать первому варианту бустера – промежуточному кольцевому ускорителю. Оставляя данный вопрос открытым, на первом этапе сооружения комплекса было принято решение инжектировать ионы в нуклотрон непосредственно из существующего линейного ускорителя ЛУ-20.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ произведен расчет магнитной структуры основного кольца нуклотрона /11/.

Характеристики дипольных и квадрупольных магнитов с железным ядром и обмотками из трубчатого сверхпроводника, размещение систем комплекса в существующих зданиях, максимальное использование имеющегося оборудования и экспериментальных залов определили требования к структуре /12/, которые сводятся к следующим:

- достижение максимально возможной энергии ускоренных ядер при заданных размерах кольцевого тоннеля здания синхрофазотрона, в котором размещается нуклотрон;
- получение высокой интенсивности легких ядер с возможностью повышения в дальнейшем также до предельных значений интенсивности тяжелых ионов;
- создание двух направлений медленного вывода пучка в экспериментальные залы 1Б и 205;
- обеспечение высокой эффективности вывода пучка в широком диапазоне энергий, предельного снижения радиационного фона вокруг ускорителя;
- выбор минимально возможных апертур сверхпроводящих элементов кольца и поперечных сечений их магнитопровода в целях снижения энергопотребления;
- использование в качестве инжектора линейного ускорителя ЛУ-20 и его модификаций;
- принципиальная возможность использования нуклотрона как инжектора ускорителя на более высокие энергии.

Форма кольцевого тоннеля, а также имеющиеся направления ввода и вывода пучка позволяют разместить в цокольном этаже корпуса синхрофазотрона ускоритель с периметром 250 м и числом суперпериодов, кратным 4. Схема расположения нуклотрона приведена на рис. 1.

Перечисленным выше требованиям наиболее полно удовлетворяет магнитная структура типа ФОДО, состоящая из 8 суперпериодов, в каждый из которых входят 3 регулярных периода и один период, не содержащий дипольных магнитов. Динамические характеристики суперпериода для частот бетатронных колебаний $Q_x = Q_z = 6,75$ приведены на рис. 2.

Основные параметры пучка и магнитной структуры нуклотрона даны в таблице 2.

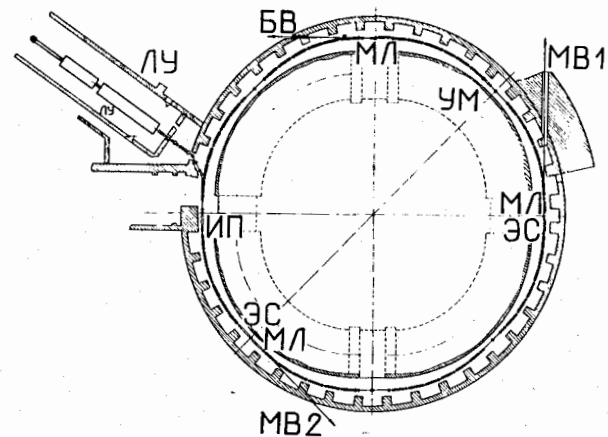


Рис.1. Схема размещения нуклотрона (ЛУ – линейный ускоритель – инжектор, МВ1 и МВ2 – направления медленного вывода, БВ – быстрый вывод, ИП – инфлекторные пластины, ЭС – электростатический септум, МЛ – магнит Ламбертсона, УМ – ударный магнит).

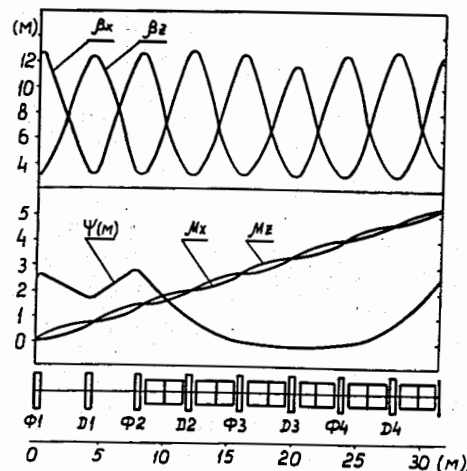


Рис.2. Динамические характеристики суперпериода нуклотрона. $\beta_{x,z}$ – параметры Твисса, Ψ – дисперсионная функция, $M_{x,z}$ – набег фаз в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Таблица 2

Основные параметры пучка и магнитной структуры нуклотрона.

Энергия инъекции ядер	5 МэВ/нуклон
протонов	20 МэВ
Максимальная энергия ядер с $q/A=0,5$	6 ГэВ/нуклон
протонов	12,8 ГэВ
Магнитная жесткость при инъекции	0,647 Тл·м
максимальная	45,83 Тл·м
Периметр	251,52 м
Кулоновский предел по интенсивности	$5 \cdot 10^{11}$ А/м ² част/цикл
Длительность инъекции	8,2 мкс
Длительность ускорения	(0,5 ÷ 1,5)с
Ускоряющее напряжение, максимальное	50 кВ
Критическая энергия	7 ГэВ
Индукция в дипольных магнитах:	
при инъекции	0,029 Тл
максимальная	2,083 Тл
Градиент в линзах Ф при инъекции	0,493 Тл/м
максимальный	34,892 Тл/м
Градиент в линзах Д при инъекции	-0,486 Тл/м
максимальный	-34,456 Тл/м
Частоты бетатронных колебаний	6,75
Акцептанс горизонтальный	40 л мм.мрад
вертикальный	45 л мм.мрад
Эмиттанс пучка при инъекции	$\epsilon_{x,z}$ 30 л мм.мрад
в конце ускорения: ϵ_x	1,7 л мм.мрад
ϵ_z	2,0 л мм.мрад
Импульсный разброс при инъекции	$\pm 10^{-3}$
максимальный	$\pm 4 \cdot 10^{-3}$
в конце ускорения	$\pm 8 \cdot 10^{-4}$

Далее отметим, что задача обеспечения максимального динамического акцептанса структуры крайне актуальна для нуклотрона, поэтому оценка допусков на погрешности магнитного поля производилась исходя из условия минимального воздействия погрешностей на пучок. При этом большинство из допусков оказалось технически реализуемо. Основные трудности возникли при индукциях $B \geq 1,8$ Тл, когда средняя величина и разброс нелинейностей резко возрастают. Размещение в

кольце нуклотрона большого числа сильноточных корректоров приводит к увеличению нагрузки на криогенную и вакуумную системы. Поэтому наиболее эффективными оказываются процедуры, не требующие установки дополнительных элементов и систем питания. К ним, в частности, относится метод оптимальной расстановки структурных элементов в кольце синхротрона по результатам магнитных измерений, подробно исследованный в диссертации /13/.

Для оценки воздействия погрешностей поля магнитных элементов на параметры пучка численно моделировались возможные расстановки структурных элементов в кольце нуклотрона и с помощью итерационного метода контролируемого случайного поиска находился оптимальный вариант. Исследования показали большие возможности данного метода коррекции горизонтальной проекции орбиты (ее амплитуда уменьшается примерно в 6 раз) и резонансов бетатронных колебаний (ширина резонансной полосы сокращается в 30 раз).

Как уже отмечалось, принципиально новой для ионных синхротронов является проблема получения однородных по зарядностям и массам ионных пучков. Очевидно, что такие "чистые" пучки крайне необходимы для проведения большинства физических экспериментов. В работе в линейном по $\Delta q/q$ и $\Delta p/p$ приближении рассмотрены дисперсионные свойства электрического и магнитного полей нуклотрона. Полученные аналитические выражения позволяют оценить условия сепарации многокомпонентного пучка. Показано, что при настройке нуклотрона на ускорение ионов с отношением заряда к массовому числу q_0/A_0 другие сорта ионов в интервале зарядностей и масс

$$0,995(q_0/A_0) \leq (q/A) \leq 1,005(q_0/A_0)$$

могут быть также захвачены в режим ускорения. Такая ситуация имеет место, как правило, при ускорении ионов с $(q_0/A_0) = 0,5$.

Однородные по составу пучки могут быть получены за счет применения в качестве рабочего вещества ионных источников изотопов, для которых по отношению к примесям более легких элементов данные ограничения не выполняются.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ получены аналитические выражения для оценки параметров медленного вывода /14/, выбраны схемы и произведен расчет систем ввода и вывода /15/ пучков нуклотрона.

На первом этапе создания комплекса в нуклотроне предусмотрена однооборотная инъекция ионов с энергией 5 МэВ/нуклон в диапазоне зарядностей и масс $q/A = 0,33 \div 0,5$ и протонов с энергией 20 МэВ. Медленный вывод реализуется в непрерывном диапазоне энергий от 0,2

до 6 ГэВ/нуклон длительностью до 10 с по двум существующим на синхрофазотроне направлениям МВ1 и МВ2.

Размещение кольца нуклотрона на отметке - 3,9 м по высоте относительно действующих линейного ускорителя и физических установок требует разработки сравнительно сложных схем ввода, вывода и транспортировки с поворотом пучков в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Во избежание дополнительных нагрузок на криогенную и вакуумную системы устройства ввода и вывода, расположенные непосредственно в криостате ускорителя, должны иметь низкие уровни тепло- и газовыделения.

С учетом перечисленных выше особенностей нуклотрона выбрана схема инъекции с поворотом пучка в вертикальной плоскости. Данная схема представлена на рис. 3. Система инъекции включает в себя септум-магнит (СМ) и импульсное устройство (ИУ), с помощью которых осуществляются, соответственно, предварительный поворот пучка и окончательная посадка его на центральную орбиту. Инжектируемые пучки с параметрами $\varepsilon_{x,z} = 30\pi$ мм.мрад и $\Delta p/p = 0,001$ должны быть полностью согласованы по поперечному фазовому объему и дисперсии с магнитной структурой синхротрона.

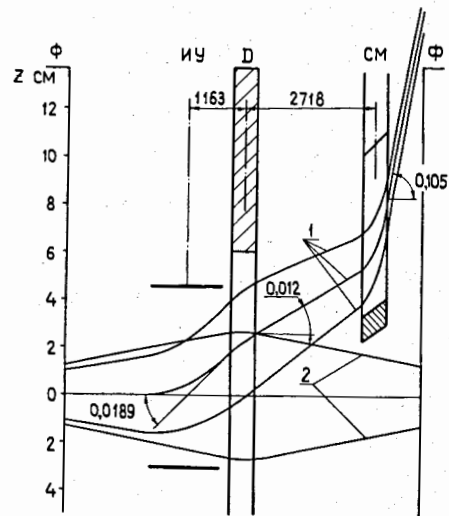


Рис.3. Схема инъекции пучка. 1 - осевая траектория и огибающая инжектируемого пучка; 2 - огибающая циркулирующего пучка в вертикальной плоскости.

Сравнительно малые поля септум-магнита при эффективной длине 0,5 м и большая толщина септума (10 мм) позволяют сделать токовый септум и обмотку сверхпроводящими. В качестве импульсного устройства

с эффективной длиной 1,5 м используются электростатические пластины. Параметры элементов системы ввода даны в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры элементов системы ввода

№ Параметр	Энергия (МэВ/нуклон)		
	5	20	
1. Отношение заряда к массовому числу (q/A)	0,33	0,5	1,0
2. Время инъекции	мкс 8,152	8,152	4,125
3. Индукция в септум-магните	Тл 0,180	0,120	0,121
4. Напряженность в зазоре между инфлекторными пластинами	кВ/м 376,2	250,9	497,7
5. Напряжение на инфлекторных пластинах	кВ 28,22	18,82	37,33

В соответствии с выбранными в нуклотроне частотами бетатронных колебаний ($Q_x = Q_z = 6,75$) для медленного вывода целесообразно использовать ближайший резонанс третьего порядка $3Q_x = 20$. Рабочая точка подводится к полосе этого резонанса изменением токов в обмотках структурных квадрупольных линз. Одновременно с помощью секступольных линз создается 20-я гармоника квадратичной нелинейности. Медленное смещение частоты бетатронных колебаний внутри резонансной полосы производится за счет программируемого изменения токов в дополнительных квадрупольных линзах. Вывод пучка осуществляется с помощью электростатического септума и магнита Ламбертсона (рис.4).

Секступольные линзы каждой пары ЛС1 - ЛС3 и ЛС2 - ЛС4 располагаются на диаметрально противоположных участках структуры, соответствующих минимальным значениям дисперсионной функции, и запитываются одинаковыми токами. Пары линз сдвинуты по азимуту друг относительно друга на угол $\theta = 7\pi/16$, что позволяет варьировать фазу секступольной гармоники в процессе настройки медленного вывода от 0 до 2π . Кроме того, такое расположение линз исключает возбуждение резонансов $2Q_x \pm 2Q_z = 2m + 1$ и сводит к минимуму хроматические эффекты, обусловленные введением квадратичных нелинейностей.

Установка равномерно по кольцу четырех квадрупольных линз ЛК1, ЛК2, ЛК3 и ЛК4 с последовательно соединенными обмотками обеспечивает требуемый когерентный сдвиг частоты и исключает возбуждение опасных

параметрических резонансов $2Q_{x,z} = I3$ и $2Q_{x,z} = I4$. Последнее обстоятельство является весьма существенным, т.к. полуширина полосы резонанса $3Q_x = 20$ оказывается сравнительно большой, особенно при выводе частиц в области средних энергий.

Для отклонения пучка за пределы ускорителя на каждом из двух направлений (МВ1 и МВ2) приняты двухступенчатые схемы вывода.

В качестве первой ступени используется электростатический септум (ЭС), отклоняющий частицы в горизонтальной плоскости. Для второй ступени взят магнит Ламбертсона (МЛ), применение которого позволяет, во-первых, обеспечить подъем пучка в вертикальной плоскости до уровня существующих каналов транспортировки в экспериментальных залах синхрофазотрона и, во-вторых, использовать обмотки из трубчатого сверхпроводника, аналогичные обмоткам структурных элементов нуклотрона. Немаловажным с точки зрения длительности вывода является тот факт, что выбранные устройства способны работать в практически непрерывном режиме.

Основные параметры электростатического септума, магнита Ламбертсона и характеристики выведенного пучка даны в таблице 4. Огибающие пучка ионов с энергиями 0,2 и 6 ГэВ/нуклон на участке вывода приведены на рис. 4.

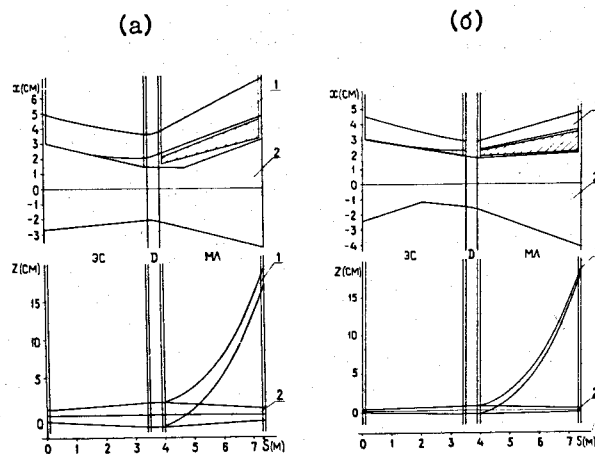


Рис.4. Схема участка вывода. 1 - огибающие выведенного пучка, 2 - огибающие циркулирующего пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях при энергиях 0,2 (а) и 6 ГэВ/нуклон (б).

Таблица 4
Основные параметры системы медленного вывода

П а р а м е т р	Энергия (ГэВ/нукл.)		
	0,2	6	
I. Резонансная система			
Амплитуда возмущения	$m^{-I/2}$ 0,706	0,595	
Фаза возмущения	рад 4,6I	3,64	
Полуширина резонансной полосы	0,0I2	0,0I6	
Диапазон изменения резонансной расстройки	0,035	0,0I6	
Эффективные длины квадрупольных и секступольных линз	м 0,3	0,3	
Производные квадратичных нелинейностей:			
в ЛС1, ЛС3	Тл/м ² 7,6	233	
в ЛС2, ЛС4	Тл/м ² -I3,I	-II0	
Градиенты в ЛК1 - ЛК4	Тл/м 0,I4	0,68	
2. Выводные устройства			
Угол поворота пучка в ЭС	мрад 5,7	2,38	
Угол поворота пучка в МЛ	мрад 80	80	
Эффективные длины ЭС и МЛ	м 3,3	3,3	
Напряженность электрического поля в ЭС	МВ/м I,26	I0	
Индукция магнитного поля в МЛ	Тл 0,I	I,I	
Эффективная толщина септума ЭС	мм 0,42	0,3I	
3. Выведенный пучок			
Эффективный эмиттанс:	горизонтальный	мм.мрад 9,5 л	2,5 л
	вертикальный	мм.мрад 20 л	2,0 л
Мгновенный импульсный разброс		$\pm 7 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$
Длительность вывода	с	(I ÷ IO)	
Коэффициент однородности тока выведенного пучка	%	95	95
Эффективность медленного вывода	%	95	96

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты исследований.

1. Выбрана схема и произведен расчет параметров сверхпроводящего синхротрона релятивистских ядер нуклотрона. Результаты проделанной работы легли в основу технических заданий на проектирование и создание магнитных элементов этого ускорителя.

2. Дан анализ особенностей синхротронного ускорения тяжелых ионов, на основании которого сделан вывод о целесообразности включения в схему ускорительного комплекса бустера и проведены исследования различных типов магнитных структур бустера и основного кольца.

3. Предложено три варианта магнитных структур бустера нуклотрона на энергии от 250 до 920 МэВ на нуклон с различными типами источников и инжекторов. Эти ускорители способны также работать на физический эксперимент. С учетом возможного прогресса в разработке сильноточных источников с высокой степенью ионизации атомов и малой длительностью импульса предпочтение отдано промежуточному кольцевому ускорителю (ПКУ) как наиболее экономичному и простому в реализации варианту из числа рассмотренных в диссертации.

4. Применительно к двум бустерам исследованы оригинальные методы накопления тяжелых ионов: многократная инжекция сгустков малой протяженности и многооборотная инжекция ионов с перезарядкой, позволяющие повысить импульсную интенсивность ускорителя в 3 и 20 раз, соответственно.

5. Сформулированы требования и произведен расчет возможных вариантов магнитной структуры нуклотрона. Проведено сравнение параметров структур, пучков и магнитных элементов. Изучены возможности размещения различных вариантов в цокольном этаже корпуса синхрофазотрона. Выбран оптимальный вариант структуры типа ФОДО, включающий в себя 8 суперпериодов и 32 периода по градиенту и обеспечивающий ускорение ионов в интервале энергий от 5 МэВ/нуклон до 6 ГэВ/нуклон. Ввод и вывод пучков реализуется по существующим на синхрофазотроне направлениям.

6. Выполнен расчет допусков на пространственные и временные неоднородности магнитного поля нуклотрона в режимах инжекции, ускорения и вывода. Показано, что с учетом погрешностей, измеренных на модели структурного дипольного магнита, коррекция магнитного поля может быть реализована с помощью неявнополюсных сверхпроводящих мультипольных корректоров с косвенным охлаждением обмоток.

7. Изучены возможности оптимальной расстановки структурных элементов нуклотрона по данным магнитных измерений. Численное модели-

рование показало большие возможности метода: при расстановке в определенной последовательности дипольных магнитов (с учетом их эффективных длин) максимальное отклонение горизонтальной проекции замкнутой орбиты уменьшается в среднем в 5 ÷ 6 раз, при аналогичной расстановке квадрупольных линз ширина полосы отдельно взятого параметрического резонанса сокращается примерно в 30 раз.

8. Исследованы дисперсионные свойства магнитной структуры нуклотрона. Показано, что при настройке синхротрона на ускорение ионов с отношением заряда к массовому числу q_0/A_0 другие сорта ионов в интервале зарядностей и масс $0,995(q_0/A_0) \leq (q/A) \leq 1,005(q_0/A_0)$ могут быть также захвачены в режим ускорения. Однородные по составу пучки могут быть получены за счет применения в качестве рабочего вещества ионных источников изотопов, для которых по отношению к примесям других, как правило, более легких элементов, данные ограничения не выполняются.

9. Предложены схемы и произведен расчет систем однооборотного ввода пучка ионов с энергией 5 МэВ на нуклон и протонов – 20 МэВ, а также медленного вывода в интервале энергий от 200 МэВ/нуклон до 6 ГэВ/нуклон с эффективностью 96% и длительностью до 10 с.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Балдин А.М., Василишин Б.В., Михайлов В.А. и др. Нуклотрон – ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, М., "Наука", 1975, с. 4 – 8.
2. Михайлов В.А., Щепунов В.А. SUNCAL – программа для расчета магнитной структуры синхротрона. ОИЯИ, БЭ, 9-88-II2, Дубна, 1988, 38 с.
3. Балдин А.М., Белов В.П., Михайлов В.А. и др. Промежуточный кольцевой ускоритель инжекционного комплекса ЛВЭ. ОИЯИ, Р9-9702, Дубна, 1976, 18 с.
4. Беляев Л.Н., Глейман Э.М., Михайлов В.А. и др. Состояние работ по ускорительному комплексу тяжелых ионов. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. I, Дубна, 1983, с. 58 – 68.
5. Балдин А.М., Безногих Ю.Д., Михайлов В.А. и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов. ОИЯИ, 9 – II796, Дубна, 1978, с. 130 – 138, 180 – 197.
6. Александров В.С., Белошницкий П.Ф., Михайлов В.А. и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983, с. 90 – III, I2I – I34.

7. Белов В.П., Казаринов Н.Ю., Михайлов В.А. и др. Магнитная структура тяжелоионного синхротрона. Препринт НИИЭФА, П-Е-0745, М., ЦНИИАтоминформ, 1986, 18 с.
8. Казаринов Н.Ю., Михайлов В.А., Саранцев В.П., Белов В.П. Особенности многократной инжекции ионов из коллективного ускорителя в синхротрон ускорительного комплекса тяжелых ионов. Труд VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, Дубна, 1983, с.203 - 206.
9. Веников Н.И., Галицкий В.М., Михайлов В.А. и др. Ускоритель тяжелых ионов на энергии сотни МэВ/нуклон. Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, М., "Наука", 1977, с.88 - 91.
10. Белов В.П., Василишин Б.В., Михайлов В.А. и др. Магнитная структура для ускорения тяжелых ионов с изменяющейся зарядностью. ОИЯИ, 9-II650, Дубна, 1978, 35 с.
11. Baldin A.M., Averichev S.A., Mikhailov V.A. et al. Nuclotron status report. Proc. 1983 Particle Accelerator Conf. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, No 4, 1983, p.3247 - 3249.
12. Василишин Б.В., Иссинский И.Б., Михайлов В.А., Таровик М.Н. Расчет магнитной структуры нуклотрона. ОИЯИ, 9-86-512, Дубна, 1986, 10 с.
13. Дянев Д.Х., Михайлов В.А., Щепунов В.А. Возможности оптимальной расстановки структурных элементов нуклотрона. ОИЯИ, 9-88-302, Дубна, 1988, 9 с.
14. Казаринов Н.Ю., Михайлов В.А. Оценка эффективности медленного вывода пучка из синхротрона. ОИЯИ, 9-86-503, Дубна, 1986, 8 с.
15. Василишин Б.В., Иссинский И.Б., Михайлов В.А., Таровик М.Н. Схема и основные параметры системы медленного вывода пучка из нуклотрона. ОИЯИ, 9-86-511, Дубна, 1986, 12 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1989 года.