

C-794



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-80-203

СТЕПАНОВ
Альберт Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОТРОНОВ
ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЦЕЛЕЙ**

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Дубна 1980

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
В.В.Кольга,
доктор технических наук
А.А.Арзуманов,
доктор технических наук
С.К.Есин.

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Физико-энергетический институт, г.Обнинск.

Защита состоится " " _____ 1980 г. в _____ часов
на заседании Специализированного ученого совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1980 г.

Ученый секретарь Специализированного
совета кандидат физико-математических
наук

Ю.А.Батусов

За последние годы значительно расширилась сфера применения ускорителей в ряде отраслей народного хозяйства и в медицине. Являясь носителями передовой технологии, новых методов и высокопроизводительных процессов, ускорители разных типов используются для радиационной обработки материалов и пищевых продуктов, стерилизации медицинских препаратов и инструментов, при испытании материалов без разрушения, элементном анализе состава вещества, при лучевой терапии опухолей, диагностике заболеваний и т.д.

Кроме традиционного использования для этих целей высоковольтных и линейных электронных ускорителей наблюдается все более широкое использование циклотронов, открывающих большие возможности решения широкого круга прикладных задач.

По данным состоявшейся в августе 1975 года в Цюрихе международной конференции практически на каждом из более чем 70 действующих циклотронов предусмотрено проведение прикладных исследований, а одна треть из общего числа целиком ориентирована на выполнение таких работ.

Параметры пучков циклотронов, используемых для прикладных целей, отличаются большим разнообразием. Так, если для решения многих задач элементного анализа подходит небольшой циклотрон с выходной энергией пучка дейтронов в 3 МэВ, то для проведения работ по лучевой терапии злокачественных новообразований быстрыми нейтронами энергия пучка протонов на мишени должна составлять до 70 МэВ. Еще более высокие требования по энергии (до 200 + 220 МэВ) предъявляются к ускорителям, предназначенным для терапии опухолей непосредственно протонным пучком и для радиографии.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Различны также требования к току пучка у этих машин. Максимальная интенсивность необходима циклотронам с энергией 22 - 28 МэВ, предназначенным для производства радионуклидов. На мишенях таких установок желательно иметь токи пучка, достигающие 1000 + 1500 мкА и выше, если это окажется практически возможным. С другой стороны, на ускорителе с энергией 200 + 220 МэВ ток пучка 0,1 + 1,0 мкА вполне достаточен для получения больших поглощенных доз в ткани.

В настоящее время в различных научных центрах нашей страны и стран СЭВ прикладные работы ведутся на отечественных циклотронах с диаметром полюсов 120 и 150 см. В пятидесятые годы эти ускорители были разработаны для проведения экспериментальных работ по ядерной физике. Их модернизация, осуществленная квалифицированным обслуживающим персоналом в основном в направлении введения регулирования энергии и изменения типа ускоряемых частиц, позволяет использовать установки для производства радиоактивных изотопов, элементного анализа, изучения износа, коррозии и т.д. В связи с моральным старением циклотронов, их малым числом и непригодностью к эксплуатации в неспециализированных научных учреждениях масштабы проводимых работ ограничены и не соответствуют современным требованиям.

Более того, систематический подход к решению ряда проблем в ядерной медицине (лучевая терапия быстрыми нейтронами и протонами, производство радиоактивных изотопов таллия-201 и иода-123) пока вообще не может быть осуществлен в связи с отсутствием нужных ускорителей. Не является выходом из положения использование для указанных целей уникальных синхротронов ОИЯИ, ЛИЯФ и протонного синхротрона ИТЭФ,

параметры пучков которых не всегда отвечают оптимальным требованиям.

Настоящая работа посвящена разработке циклотронов, предназначенных для проведения прикладных работ в научных учреждениях и на крупных промышленных предприятиях. Целью работы является обоснование технологического ряда циклотронов для прикладных целей, разработка и исследование входящих в него ускорителей.

При решении поставленных задач было необходимо обосновать минимальное число типов прикладных циклотронов, разработать современные экономичные установки, соответствующие уровню лучших зарубежных машин, обеспечить получение на них необходимых параметров пучка по энергии и интенсивности, а также предусмотреть меры по их надежной и безопасной эксплуатации.

С этой целью были обоснованы и внедрены оригинальные предложения по разработке различных систем и узлов циклотронов. Они связаны как с формированием необходимых магнитных полей, изучением динамики пучка в полях специальной формы, получением требуемой интенсивности пучка на мишенях, обеспечением высокоэффективного выпуска, определением полей допусков на элементы магнитной и ускоряющей систем, так и с решением ряда задач по повышению общей технической надежности работы ускорителей.

В существенной степени рассмотренные в диссертации вопросы являются общими для разработки циклотронов, поэтому её результаты могут быть использованы на действующих машинах и при сооружении новых циклотронных ускорительных комплексов.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Она содержит 210 страниц текста и 58 рисунков. Список использованной литературы состоит из 174 наименований.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ диссертации рассмотрены области прикладного применения циклотронов. В ней проанализированы требования, предъявляемые к параметрам пучков циклотронов, используемых в различных отраслях промышленности и в медицине, и предложен технологический ряд циклотронов прикладного назначения (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Параметры и области прикладного применения циклотронов

Параметры пучка циклотрона		Область применения	Примечание
Энергия, z^2/A , МэВ	Ток, мкА		
1	2	3	4
6-12	20-50	Элементный анализ	
12-16	20-50	Производство сверхкороткоживущих изотопов	
10-12	20-50	Изучение износа, коррозии, мониторинг движения деталей машин	Используются ядерные реакции вида (А, п)
20-25	50-100	Производство короткоживущих изотопов для медицинской диагностики	
22-28	200 (внутри 1500)	Производство изотопов широкого применения	Используются ядерные реакции вида (А, 2п) и (А, 3п)
30	20-50	Имитация радиационных повреждений	
100	10-20	Изучение радиационной стойкости конструкционных материалов	Предполагается ускорение тяжелых ионов
70	20-50	Терапия быстрыми нейтронами	Пучок используется на бериллиевой мишени

1	2	3	4
60	10-20	Производство иода-123	Используется ядерная реакция (А, 5п)
220	0,1-1,0	Протонная терапия и радиография	

Таблица 2

Технологический ряд циклотронов для прикладных целей

Тип циклотрона	Характеристики внешнего пучка		Диаметр полюсов, см
	Энергия, z^2/A , МэВ	Ток, мкА	
ДЦ	6	100	60
АЦ	12	50	80
МГЦ-20	5-20	50-100	103
РИЦ	28	200 (внутри 1500)	150
ММЦ	70	20	180
КЦ	220	1	Кольцевой циклотрон

В частности, показано, что для решения задач по элементному анализу, производству изотопов, изучению радиационной стойкости материалов и имитации их радиационных повреждений, лучевой терапии в медицине и т.д. достаточно иметь шесть типов циклотронов, перекрывающих диапазон энергий от 6 до 220 МэВ (по протонам). Диапазон более высоких энергий, также используемый для прикладных целей, не включен в предложенный технологический ряд. В настоящее время для работ в этом диапазоне, например, по лучевой терапии К - мезонами и тяжелыми ионами или по производству "ядерных фильтров" с использованием тяжелых ионов целесообразно применять ускорители, сооруже-

ные для проведения фундаментальных исследований в ядерной физике. Рост масштабов проведения подобных работ может, естественно, привести и к необходимости разработки специализированных машин.

Практическим результатом работы по классификации циклотронов является возможность проведения унификации их узлов и систем. Унификация способствует сокращению сроков проектирования, изготовления, ввода в действие ускорителей, а также снижает их стоимость и расходы на эксплуатацию.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ диссертации приводится техническое описание трех типов циклотронов технологического ряда: дейтронного циклотрона ДЦ, циклотрона с регулируемой энергией частиц МГЦ-20 и радиоизотопного циклотрона РИЦ, разработанных под руководством автора в период с 1968 по 1978 год.

При разработке ускорителей был использован накопленный в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова опыт создания "классических" циклотронов типа Р-7, У-120, У-150, У-300, а также изохронного циклотрона У-240. Автор принимал непосредственное участие в проектировании большинства этих машин и в получении на них проектных параметров пучка.

Из циклотронов нового поколения хронологически первым был разработан 103-см циклотрон МГЦ-20 (1968 + 1970 г.г.). Он предназначен для ускорения протонов, дейтронов, ионов $^3\text{He}^{+2}$ и $^4\text{He}^{+2}$ в диапазоне энергий от 5 до 20 z^2/A МэВ. При работе на внутреннюю и внешнюю мишени интенсивность пучка соответственно составляет 200 + 300 и 50 + 100 мкА. В 1972 + 1973 г.г. были успешно проведены стендовые испытания головного образца циклотрона, а в 1974 г. второй образец ускорителя совместно с разветвленной системой транспортировки пучка

к удаленным мишеням был сдан в Або Академии (г.Турку, Финляндия), где уже в течение более пяти лет эксплуатируется в целях реализации обширной научной и прикладной программ.

Сравнение циклотрона МГЦ-20 с зарубежными аналогами показывает, что он не уступает ускорителям ведущих фирм Западной Европы и США, а по основным показателям (ток и качество пучка) превосходит большинство из них.

В 1974 г. начато проектирование 60-см циклотрона типа ДЦ. Этот циклотрон предназначен для ускорения дейтронов до энергии 3 МэВ при интенсивности внешнего пучка 100 мкА. Ускоритель будет использован для элементного анализа низких концентраций легких элементов (бор, углерод, азот, кислород и др.) в матрицах тяжелых материалов. Эта проблема имеет важное народнохозяйственное значение и с необходимой точностью не может быть решена другими методами. К циклотрону ДЦ проявляют интерес не только научные учреждения, но и аналитические лаборатории крупных промышленных предприятий страны. Подсчитано, что только за счет снижения стоимости анализов в таких лабораториях годовой экономический эффект от внедрения циклотрона превышает его стоимость.

В 1977 г. начато проектирование циклотрона типа РИЦ, предназначенного для производства широкого набора радионуклидной продукции в полупромышленных масштабах (несколько сот кюри в год). Основной режим работы циклотрона РИЦ - ускорение протонов до энергии 28 МэВ. Отличительной особенностью машины является большая интенсивность пучка на мишенях.

В проекте ускорителя заложена возможность получения и использования на внутренней мишени пучка мощностью до 25 + 30 кВт.

На внешней мишени мощность пучка составляет 5 + 6 кВт.

Основные характеристики узлов циклотронов ДЦ, МГЦ-20 и РИЦ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные характеристики узлов циклотронов ДЦ, МГЦ-20 и РИЦ

Узлы циклотрона	ДЦ	МГЦ-20	РИЦ
I	2	3	4
Электромагнит:			
тип	Броневой	Ш-обр.	Броневой
диаметр полюсов, см	60	103	150
воздушные зазоры ("холм-долина"), см	6,5/10,3	7,2/12	14,2/22,2
число секторов (пар)	3	3	4
среднее поле, Т	1,4	0,7 ± ±1,45	1,15
число конц.обмоток, пар	-	4	4
число гармонических обмоток, групп	2	2	2
ВЧ-система:			
число дуантов	1	2	1
угловая протяженность дуантов, град	180	180... 140	180
апертура дуантов, см	2,9	1,9	5,0
ускоряющее напряжение, кВ	25	30	50
диапазон частот, МГц	10,7	8,5 ± ±26,0	17,3±0,5
мощность ВЧ, кВт	6	50	100
Источник ионов:			
тип	с "горячим" катодом		
ввод в камеру	аксиальный		
мощность разряда, кВт	0,7	0,7	1,5

I	2	3	4
Система выпуска:			
дефлектор			
угловая протяженность, град	40	37	40
макс. потенциал, кВ	45	45	50
магнитный канал			
длина, см	20	30	50
макс. градиент, Т/см	0,15	0,1	0,07
Вес циклотрона, т	7	27	90
Потребление электроэнергии, кВА	50	170	380

Отдельный параграф посвящен программе стендовой наладки узлов циклотрона, требованиям к помещениям, в которых предполагается установка машин, и программе приема-сдаточных испытаний ускорителей. Их выполнение позволяет проводить монтаж циклотронов как стандартного электротехнического оборудования, что сокращает сроки ввода ускорителей в действие. Например, в Финляндии циклотрон МГЦ-20 был собран и передан в эксплуатацию за 9 месяцев, причем до поставки машины работы с пучком не проводились.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ применительно к нерелятивистскому случаю систематизирована динамика пучка в секторно-фокусирующих циклотронах. Даны основные выводы теории, касающиеся расчета условий формирования пучка высокого качества в центре циклотрона, обеспечения изохронного и стабильного ускорения, а также эффективного выпуска. Приводится предложенная автором методика определения исходной радиальной зависимости среднего магнитного поля, реализация которой дает возможность существенно снизить число ампер-витков концентрических обмоток при получении любого режима ускорения.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена обоснованию выбора узлов циклотронов типа ДЦ, МГЦ-20 и РИЦ. В ней собраны результаты расчетных и экспериментальных работ на моделях, выполненных в процессе разработки циклотронов.

Наибольший объем исследований по обоснованию параметров узлов выполнен при проектировании циклотрона МГЦ-20. С некоторыми модификациями, вызванными особенностями других ускорителей, предложенные технические решения были использованы на циклотронах ДЦ и РИЦ. Основой выбора характеристик узлов циклотронов служит величина прироста энергии за оборот, которая, с одной стороны, определяет тип дуантной системы, амплитуду ускоряющего напряжения и, следовательно, величину зазора дуант-плакировка; с другой стороны, задает число оборотов частицы до достижения максимальной энергии, допустимое отклонение кривой среднего магнитного поля по радиусу от изохронной зависимости, а также стабильность этого поля во времени. Учет апертуры дуанта, его конструктивной высоты и толщины блоков concentрических обмоток с плакировкой позволяет оценить минимальный воздушный зазор электромагнита. Зазор в "долине" и периодичность магнитной структуры определяется на основе удовлетворения требований к стабильности и изохронности ускорения, сформулированных в предыдущей главе.

Так, при разработке циклотрона МГЦ-20 апертура дуантов была выбрана равной 2 см. Из опыта работы с моделью циклотрона У-240 было очевидно, что указанная апертура недостаточна для получения ионных токов в несколько сот микроампер, если частота вертикальных колебаний в зоне ускорения не опускается ниже 0,1. Комплексное рассмотрение перечисленных выше факторов совместно с расчетами начальных орбит показало,

что наиболее приемлемым вариантом ускоряющей структуры циклотрона МГЦ-20 является двухдуантная система с потенциалом 30 кВ. В центре угловая протяженность дуантов составляет 180° . К конечному радиусу ускорения для размещения системы выпуска пучка угловая протяженность дуантов уменьшается до 140° . Таким образом, были определены тип дуантной системы, величины зазоров электромагнита в "холме" (72 мм), "долине" (120 мм), а также зазор под ВЧ-систему (60 мм), которые обеспечивают прирост энергии для однозарядной частицы $100 + 120$ кэВ.

Максимальная рабочая индукция в зазоре электромагнита (1,45 Т) была выбрана в процессе моделирования магнитного поля. Резкое усиление влияния эффектов насыщения полюсных наконечников при возбуждении электромагнита свыше указанного значения приводит к непропорционально большому росту ампервитков concentрических обмоток и к другим нежелательным последствиям из-за нелинейности характеристик магнитного поля. Так были определены конечный радиус ускорения (45 см), диаметр полюса электромагнита (103 см) и частота обращения ионов в диапазоне изменения энергии (5,5 + 22 МГц).

Окончательное формирование магнитного поля проведено на головном образце электромагнита. С целью сокращения объема измерений автором предложен новый критерий выбора числа точек по радиусу и азимуту. Он основан на условии получения интерполяционных данных в любой точке медианной плоскости зазора с точностью, не уступающей точности измерений. Таким способом гарантируется необходимая точность информации о магнитном поле в любой точке при интегрировании уравнений движения и при вычислении гармоник Фурье - разложения по азимуту. Предварительный анализ наиболее характерных

зависимостей магнитного поля, снятых по радиусу и по азимуту с минимальным шагом, позволил определить максимально допустимый интервал измерений. По радиусу он был выбран равным 1,5 см. По азимуту измерение магнитного поля через 8° (45 точек) и дополнительно на одном из элементов периодичности через 4° (15 точек) обеспечивает необходимую точность определения гармоник Фурье - разложения. Измерение вклада корректирующих обмоток достаточно было проводить на элементе периодичности через 12° (10 точек). В результате суммарный объем измерений, включающий снятие 10 топографий поля на различных уровнях возбуждения электромагнита, полученные данные о полях шести корректирующих обмоток при трех значениях тока основной обмотки и контрольные измерения с включенными обмотками, составил около 45000 точек, что на порядок меньше объема измерений, проводимых при формировании полей подобных ускорителей.

На циклотроне МГЦ не было трудностей с получением необходимых фокусирующих свойств поля. Указанные выше воздушные зазоры и спиральность магнитного поля (36°) определили значение вертикального фокусирующего члена F_z ($0,055 \pm 0,060$) и частоты бетатронных колебаний наиболее релятивистских протонов (0,12). Поэтому основное внимание было уделено формированию среднего магнитного поля в виде, определенном аналитически в предыдущей главе. Реализация этого требования с точностью, определяемой технологичностью изготовления секторов, позволила снизить мощность питания концентрических обмоток до 1% от мощности питания основной обмотки. У лучших аналогичных зарубежных циклотронов этот показатель составляет $10 \pm 15\%$.

При использовании данных магнитных измерений и с помощью разработанного комплекса вычислительных программ для ЭВМ, приведенного в диссертации, была всесторонне изучена динамика пучка и оптимизированы условия выпуска.

Прежде всего, во всех режимах ускорения была рассмотрена возможность центрирования орбит только внутренней группой гармонических обмоток. Напряжение на дуантах при этом поддерживалось вблизи максимального значения, а положение источника и пуллера сохранялось неизменным. Для определенного начального эмиттанса пучка (200 мм мрад) и стартового интервала фаз ($-30 \pm 10^\circ$) в результате расчетов найдена оптимальная конфигурация центральной ионно-оптической системы, удовлетворяющая поставленным условиям. Анализ движения зоны центров орбит, вызываемого процессом ускорения, влиянием первой гармоники магнитного поля в центре и действием "резонанса пересечения зазора", определил необходимое смещение разрядного канала источника ионов относительно оси полюса (14 мм) и параметры гармонических обмоток. Вынужденное введение первой гармоники в центральной области магнитного поля позволило решить проблему получения близкого к изохронному радиального профиля среднего магнитного поля при использовании мощного ионного источника аксиального типа.

Таким образом, расчетным путем, без перестройки положения источника и пуллера, в различных режимах ускорения была обоснована возможность получения интенсивного и центрированного пучка с амплитудой некогерентных колебаний до 3 мм.

В указанной постановке такая задача была впервые решена в практике сооружения циклотронов. Результаты носят общий характер и используются при разработке последующих ускорителей.

Особенностью ускорения пучка в циклотроне МГЦ является небольшое динамическое смещение равновесных орбит относительно центра магнитного поля. Возможность такого ускорения частиц на циклотроне впервые отмечена М.Гордоном^{*)}. К динамическому смещению пучка приводят несколько причин. Прежде всего, наличие первой гармоники азимутальной неоднородности в реальном поле. Во-вторых, на циклотроне МГЦ в связи с быстрым ростом вариации поля сильно проявляется эквивалентный действию первой гармоники "резонанс пересечения зазора". Компенсация указанных возмущений гармоническими обмотками может проводиться только усредненно на тех радиусах, где они установлены. Поэтому наблюдается дрейф зоны центров, составляющий несколько миллиметров. В связи с близостью частоты радиальных колебаний ν_r к единице на циклотроне МГЦ ускорение смещенных орбит не сопровождается ухудшением качества пучка, в то время как на больших машинах оно может явиться одной из причин ограничения стартового интервала фаз, а следовательно, и интенсивности пучка.

Система выпуска пучка циклотрона МГЦ состоит из короткого электростатического дефлектора и радиально-фокусирующего магнитного канала. Их взаимное положение фиксировано конструкцией дуантной системы. После отклонения дефлектором, до входа в магнитный канал, пучок проходит в дуанте участок магнитного поля с большим поперечным градиентом, дефокусирующим его в радиальном направлении. Величина этого градиента зависит от азимута. Она максимальна в области малых зазоров,

*) M. Gordon. "Singl turn extraction", IEEE Trans. on Nucl.Sci. NS-13, No.4, 1966, p.48-57.

в "холмах", и минимальна в "долинах". Различны также величины отклонений, производимых дефлектором с неизменной напряженностью электрического поля (100 кВ/см) при его установке в области секторов или "долин". Расчетная оптимизация положения дефлектора относительно магнитной структуры показала, что в случае его установки на границе "холм-долина" на входе в магнитный канал размер пучка близок к минимальному, а величина отклонения достаточна для выпуска пучка параллельно оси дуантов, т.е. наиболее удобным образом с конструктивной точки зрения. Радиально-фокусирующий канал состоит из трех брусков круглого сечения, создающих в апертуре $5 \times 2 \text{ см}^2$ положительный градиент поля, пропорциональный индукции. На длине канала 30 см максимальный градиент равен $0,1 \text{ Т/см}$.

Применительно к условиям ускорения на циклотроне, где в зоне выпуска сохраняется действие "резонанса пересечения зазора" и первой гармоники реального магнитного поля, показана возможность выпуска пучка с энергетическим разбросом, не превышающим прирост энергии за оборот. В циклотроне МГЦ с относительно высоким приростом энергии за оборот особенно эффективно использование для разделения орбит на септуме механизма прецессии в спадающем поле после прохождения внешнего резонанса радиальных колебаний $\nu_r = 1$. По условиям фазового движения ускорение допускается до радиуса, где $\nu_r = 0,8$ и сдвиг фазы прецессии за оборот составляет приблизительно 1 рад. Это приводит к разделению двух последующих орбит на величину амплитуды когерентных радиальных колебаний, что соответствует расчетной эффективности выпуска пучка $70 \pm 80 \%$. Размеры пучка на выходном фланце при этом не превышают 2 см

в диаметре, а расходимость составляет менее 0,02 рад. В каждом конкретном случае необходимые возмущения магнитного поля, вносимые наружной гармонической обмоткой, могут быть определены расчетным путем. Известен также закон изменения потенциала дефлектора в зависимости от типа и энергии ускоряемых частиц. Таким образом, расчетным путем была решена задача эффективного выпуска пучка с минимальным энергетическим разбросом при неизменном положении элементов системы выпуска в различных режимах ускорения.

К вопросам, имеющим важное практическое значение, относятся определение необходимых временных стабильностей токов питания обмоток электромагнита, потенциалов на дуантах и дефлекторе, а также точность изготовления и монтажа элементов магнитной и ускоряющей систем. Возможность удовлетворения тех или иных допусков должна учитываться в процессе проектирования циклотрона. В первую очередь это касается элементов, формирующих магнитное поле в зазоре электромагнита, где допустимые отклонения от номинальных размеров не превышают $0,05 \pm 0,1$ мм, и поэтому технологичность изготовления учитывается с начала проектных работ.

Указанные в тексте диссертации допуски на отклонения от номинальных размеров и на временные стабильности систем питания являются жесткими, но практически реализуемыми.

В конце четвертой главы приведен материал по обоснованию приведенных выше основных узлов циклотронов ДЦ и РИЦ. Выходные параметры пучка этих машин определены специализированными областями их применения на основании технических заданий заказчиков. Варианты выполнения ускорителей, описанные в диссертации, рассматриваются как базовые, имеющие

большие возможности для различных модификаций. При выборе этих вариантов, принимая во внимание близкую к промышленной эксплуатацию ускорителей по поточному элементному анализу образцов и плановой наработке радионуклидной продукции, было решено предельно ограничить набор ускоряемых ионов, отказаться от регулирования выходной энергии и, таким образом, разработать простые и надежные в работе установки.

Циклотроны имеют целый ряд общих конструктивных особенностей: аксиальный ввод источника ионов, 180-градусные однодуантные резонансные системы с аналогичным построением ВЧ-тракта, идентичные системы выпуска пучка, броневые электромагниты с подъемом верхнего полуярма для ревизии устройств вакуумной камеры, аналогичные устройства питания и управления.

Широко использовались технические решения, предложенные и реализованные в процессе создания циклотрона МГЦ. Это относится к определению конфигурации секторов, формирующих ведущее магнитное поле, оптимизации начальных орбит и элементов системы выпуска пучка, управлению удельной мощностью пучка на внутренней мишени и т.д. В связи с повышением требований к реализации ряда параметров, например, при определении формы секторов из-за отказа от использования концентрических обмоток или при необходимости работы с пучком, мощность которого в несколько раз превышала достигнутую на отечественных циклотронах, потребовалось дальнейшее совершенствование предложенных методов.

Основной проектной особенностью циклотрона ДЦ является высокая интенсивность пучка дейтронов при сравнительно низкой энергии (3 МэВ) и мощности (1,5 кВт). Указанные параметры пучка реализованы на циклотроне МГЦ, поэтому было решено

сохранить компоновочную схему циклотрона МГЦ у новой машины, упростив и улучшив её применительно к ускорителю с фиксированной энергией. Было сохранено подобие магнитных структур и условий формирования начальных орбит, но при некотором увеличении апертуры дуанта (до 29 мм), вертикальных зазоров и переходе к однодуантной 180-градусной резонансной системе.

Еще большая апертура дуанта (50 мм) выбрана для циклотрона РИЦ. Использование системы сканирования пучка по вертикали, а также искусственное возбуждение радиальных колебаний на внутреннем резонансе $V_r = 1$ с их последующей трансформацией в некогерентные в процессе управляемого неизохронного ускорения позволяют довести сечение пучка на внутренней мишени до 40×50 см². Эти меры существенно улучшают тепловой режим мишени и должны обеспечить возможность эксплуатации машины с мощностью пучка до 25×30 кВт.

Получение на циклотроне РИЦ внешнего пучка с мощностью 5 и более киловатт возможно только при эффективности выпуска, составляющей 70×80 %. Эти условия могут быть удовлетворены при получении внутри машины пучка с интенсивностью 250×300 мкА и эмиттансом, не превышающим 15×20 мм·мрад в обеих плоскостях. Проектом предусмотрены все известные меры получения пучка столь высокого качества: тщательное центрирование орбит, ограничение начального эмиттанса путем фазовой селекции на первом полуобороте, исключение "резонанса пересечения зазора" за счет выбора четырехпериодичной магнитной структуры, поддержание строгого изохронизма в процессе ускорения и возможная ликвидация низших гармоник поля. В связи с ограничением временной длительности сгустков тока (до 10×15^0) повышена мощность разряда источника ионов (до 1,5 кВт).

Предусматривается управление циклотроном РИЦ с помощью небольшой ЭВМ, основная цель применения которой состоит в увеличении ресурса рабочего времени машины за счет работы ночью или в выходные дни.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ приведены результаты экспериментального исследования процессов ускорения и выпуска пучка, полученные на двух образцах циклотрона МГЦ-20: прототипе, введенном в действие в НИИЭФА в 1972 г., и циклотроне, поставленном в Финляндию в 1974 г. Эти работы подтвердили расчетные предпосылки, заложенные в проекте ускорителя. На внутренней и внешних мишенях в проектом диапазоне регулирования энергии были получены гарантированные токи всех типов частиц. Работы проводились с расчетными токами в корректирующих обмотках, расчетными данными по системам выпуска и транспортировки пучка к удаленным мишеням.

При нормальной работе циклотрона интенсивность его внутреннего пучка определяется режимом разряда источника ионов и величиной ускоряющего напряжения на дуантах. Существенно разный потенциал ионизации водорода и двухзарядного гелия дает качественно разные зависимости выхода тока пучка от мощности разряда источника ионов при постоянном напряжении на дуантах. На циклотроне МГЦ ток протонов 500 и более микроампер можно получить при мощности разряда источника 100×200 Вт, в то время как для получения α -частиц с интенсивностью 150 мкА мощность разряда возрастает до 600 Вт.

В различных режимах ускорения многочисленные данные по измерению распределения интенсивности по радиусу свидетельствовали об отсутствии потерь пучка в основной зоне. Близким к расчетным оказался вид пусковых характеристик на

циклотроне. Значение амплитуды порогового напряжения на дуантах связано с конфигурацией начальной ионно-оптической системы и зависит от конечной энергии ускоряемого иона. Для α - частиц с максимальной энергией оно равно 11 кВ, для протонов - вдвое больше. Анализ резонансных кривых показал хорошее соответствие временной структуры пучка расчетным предпосылкам. Так, минимальное значение стартовой фазы было близко к $-(20 + 30)^\circ$, максимальное - к $+(10 + 20)^\circ$, ширина фазовой полосы составила $(40 + 50)^\circ$.

Измерение амплитуды радиальных колебаний свидетельствовало о высоком качестве пучка циклотрона. Амплитуда некогерентных радиальных колебаний не превышает 3 мм. До зоны действия внешнего резонанса $\sqrt{V_r} = I$ амплитуда когерентных колебаний не превышает некогерентные. На септуме дефлектора разделение витков за счет прецессии может быть доведено до 5 мм.

При ускорении протонов и дейтронов на циклотроне могли быть получены токи, превышающие 1000 мкА. Причиной, препятствующей работе с таким пучком, является разрушение мишени. Выход мишени из строя связан с чрезвычайно высокой удельной мощностью пучка, достигающей при максимальной энергии $20 + 30$ кВт/см². Предельные токи ионов гелия на циклотроне МЦ ограничены мощностью разряда источника ионов.

При участии автора был предложен и защищен авторским свидетельством способ повышения надежности мишени за счет сканирования пучка по вертикали переменной горизонтальной составляющей магнитного поля. Одновременно с возбуждением радиальных колебаний в центре, на резонансе $\sqrt{V_r} = I$, и выбором оптимального (15°) угла подхода пучка к облучаемой поверхности

такая система позволила довести мощность пучка на мишени до 4 кВт (200 мкА при энергии протонов 20 МэВ).

В основных режимах эксплуатации циклотрона эффективность выпуска составляла $55 + 70$ %. При снижении интенсивности пучка эффективность выпуска возрастала. Так, она достигала $90 + 95$ % при ускорении α - частиц до энергии 20 МэВ, если ток пучка не превышал 0,5 мкА. При этом как снижение дуантного напряжения до 15 кВ, так и низкая мощность в разряде источника ионов (70 Вт) способствовали уменьшению начального эмиттанса пучка и интервала стартовых фаз. Энергетический спектр внешнего пучка ($0,2 + 0,3$ % FWHM) и измеренная величина эмиттанса (45 и 90 мм мрад в вертикальной и горизонтальной плоскостях) были близки к ожидаемым и подтвердили факт однооборотного выпуска.

Интенсивности внешних пучков протонов и дейтронов на циклотроне ограничиваются допустимой тепловой нагрузкой септума дефлектора (1,5 кВт) и могут составлять при максимальной энергии $60 + 70$ мкА для протонов и $100 + 140$ мкА для дейтронов.

Ток внешнего пучка ионов $^4\text{He}^{+2}$ и $^3\text{He}^{+2}$ определяется его интенсивностью внутри вакуумной камеры.

В конце главы приведены результаты работ по транспортировке пучка к внешним мишеням на циклотроне МЦ в Або Академии, где было получено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений токов в фокусирующих и поворотных элементах тракта.

Возможные модификации разработанных циклофонов ДЦ, МЦ-20 и РИЦ, а также предварительные параметры остальных циклофонов технологического ряда приведены в последней главе диссертации.

Постановка вопроса о модификациях циклотронов связана с желанием показать разнообразные возможности машин. Под модификацией понимается замена некоторых узлов ускорителя при сохранении основного проекта, что может быть выполнено в процессе обязательной подготовки рабочей документации перед изготовлением на заводе. По мнению автора, наибольший практический интерес представляют следующие варианты модификации каждой машины:

Циклотрон типа ДЦ - использование в качестве инжектора сверхточного кольцевого циклотрона со следующими выходными параметрами пучка протонов: энергия - 1 МэВ, ток - до 1000 мкА.

Циклотрон типа МГЦ-20 - повышение энергии всех частиц до $25 Z^2/A$ МэВ при фиксированном значении. При такой модификации по параметрам пучка он превзойдет американскую машину CS-22, наиболее широко применяемую в настоящее время в медицинских учреждениях.

Циклотрон типа РИЦ - перевод в режим ускорения протонов до энергии 35 ± 40 МэВ и дейтронов - до энергии 20 ± 22 МэВ при токе внешнего пучка 50 ± 70 мкА. В таком виде циклотрон РИЦ может найти применение при нейтронной терапии злокачественных опухолей.

Разнообразные требования к параметрам пучков, которые предъявляются в настоящее время со стороны ядерной медицины, делают нецелесообразным их удовлетворение с помощью одного ускорителя. Наиболее экономичный путь решения этой проблемы заключается в разработке ускорительного комплекса, состоящего из отдельных циклотронов, решающих определенный круг задач. Так, предложен ускорительный комплекс, состоящий из циклотрона МГЦ и кольцевого циклотрона с максимальной энергией

в 70 МэВ. Циклотрон МГЦ обеспечивает решение задач по элементному анализу, производству короткоживущих изотопов для диагностики, по облучению нейтронами опухолей, залегающих на небольшой глубине. Одновременно он используется как инжектор кольцевого циклотрона с энергией до 70 МэВ. Протонный пучок с энергией от 28 до 70 МэВ, получаемый на ускорителе, используется для наработки радионуклидов (^{201}Tl , ^{123}I) и для терапии опухолей быстрыми нейтронами.

На кольцевом циклотроне еще больших размеров рассмотрена возможность ускорения протонов от 70 до 220 МэВ для применения при протонной терапии и радиографии.

Предложенный ускорительный комплекс состоит из циклотронов, входящих в технологический ряд. Возможность поэтапного ввода ускорителей в действие, сравнительно небольшие габариты и потребление электроэнергии являются его преимуществами.

Основные результаты исследовательских работ автора можно сформулировать следующим образом.

I. Разработан технологический ряд циклотронов прикладного назначения. Показано, что в диапазоне энергий от 6 до 220 МэВ достаточно иметь шесть типов циклотронов, используемых для элементного анализа состава вещества, производства радионуклидов, имитации радиационных повреждений, изучения конструкционной стойкости различных материалов, лучевой терапии быстрыми нейтронами и высокоэнергетичными протонами.

Этот ряд позволяет унифицировать узлы и системы циклотронов, что сокращает сроки проектирования, изготовления и ввода в действие ускорителей, а также снижает их стоимость и расходы на эксплуатацию.

2. Разработана инженерная методика выбора узлов циклотронов прикладного назначения. На основании этой методики обоснованы параметры трех типов циклотронов технологического ряда: ДЦ - циклотрона, предназначенного для элементного анализа легких элементов; МЦ-20 - универсального источника ускоренных легких ионов для элементного анализа и производства короткоживущих радионуклидов, используемых в медицинской диагностике; РИЦ - циклотрона, специализированного для промышленного производства радиоизотопной продукции широкого назначения.

3. Проведен комплекс расчетных и экспериментальных исследований по оптимизации физических процессов, происходящих в ускорителях, по обоснованию выбора основных конструктивных решений и по определению полей допусков на точность реализации элементов магнитной и ускоряющей систем. Главным направлением этих работ являлось создание простых, компактных, экономичных и надежных установок. С этой целью были реализованы следующие предложения.

а. По магнитной системе.

Предложена и обоснована возможность введения в центральной зоне ускорения локализованной по радиусу первой гармоники магнитного поля, что позволило использовать надежные и мощные аксиальные ионные источники, улучшить изохронность ускорения в центре и решить проблему получения на циклотронах интенсивных пучков ионов разных типов.

Разработана методика выбора конфигурации секторов, формирующих ведущее магнитное поле в зазоре электромагнита. Ее использование приводит к существенному снижению числа ампер-витков концентрических обмоток и их мощности питания.

Обоснован критерий выбора числа точек измерений магнитного поля по азимуту и радиусу, позволивший в несколько раз сократить общий объем измерений без ухудшения точности результатов. Критерием выбора числа точек является получение интерполяционных данных с точностью, не уступающей точности измерений магнитного поля.

б. По динамике пучка.

Предложен новый способ центрирования орбит в циклотроне с регулируемой энергией частиц разных типов. При максимальной амплитуде ускоряющего напряжения и расчетном положении элементов начальной ионно-оптической системы центрирование орбит производится гармоническими обмотками, расположенными на внутренних радиусах ускорения. Реализация этого способа является необходимым условием получения интенсивного пучка высокого качества во всем диапазоне изменения энергии.

в. По ускоряющей системе.

В результате исследований ускоряющих структур с различной угловой протяженностью обоснованы преимущества 180-градусных одно- и двухдуантных резонансных систем. При минимальной амплитуде ускоряющего напряжения 180-градусные ускоряющие структуры обеспечивают высокий темп прохождения пучком центральной области и создают наилучшие условия получения интенсивного пучка высокого качества. Особенно заметны преимущества таких систем в циклотронах с регулируемой энергией частиц разных типов.

г. По системе выпуска.

Обоснован выбор для циклотронов прикладного назначения системы выпуска пучка, содержащей короткий электростатический deflectор и пассивный радиально-фокусирующий магнитный

канал. При поддержании амплитуды свободных колебаний на уровне 2 ± 3 мм и использовании механизма разделения орбит на септуме, основанного на прецессии и спадающем поле после прохождения внешнего резонанса $\sqrt{r} = I$, такая система обеспечивает надежный, высокоэффективный (60 ± 70 %) выпуск пучка из вакуумной камеры циклотрона.

Обоснован и реализован метод оптимизации положения дефлектора относительно секторов, позволивший уменьшить апертуру магнитного канала и улучшить параметры пучка на выходе из циклотрона.

4. В процессе разработки циклотронов предложены и реализованы меры, направленные на повышение их общей технической надежности. Путем стабилизации режима разряда источника повышен срок его службы. За счет вертикального сканирования пучка переменной горизонтальной составляющей магнитного поля увеличена допустимая мощность пучка на внутренней мишени и повышена надежность её работы. Для предохранения дефлектора от разрушения введена цепь управления режимом работы источника по тепловой нагрузке септума.

5. Разработан комплекс программ для численного моделирования процесса ускорения пучка и его выпуска. На основе экспериментальных данных по магнитному и электрическому полям комплекс программ позволяет получить необходимую информацию по динамике пучка, токам в корректирующих обмотках, режиму работы системы выпуска для любого проектного режима ускорения.

6. В различных режимах ускорения детально исследованы характеристики внутреннего и внешнего пучков циклотрона МПЦ-20. Получено хорошее экспериментальное подтверждение расчетно-

теоретических предпосылок, положенных в основу проекта. Достигнут диапазон регулирования энергии для всех типов частиц ($5 \pm 20 z^2/A$, МэВ), получены проектные токи пучков и изучены причины их ограничений, достигнута расчетная эффективность выпуска (60 ± 70 %) и монохроматичность ($0,2 \pm 0,3$ %).

7. Составлена и отработана методика наладки узлов циклотронов на заводском стенде. Её выполнение позволяет проводить поставку ускорителей заказчику в виде стандартного электротехнического оборудования, что сокращает сроки и облегчает монтаж и пуск машин.

Разработана методика сдачи циклотронов заказчику, обучения персонала правильной эксплуатации и обслуживанию машин, а также программа профилактических и ремонтных работ.

Перечисленные мероприятия способствуют длительной безаварийной работе ускорителя в учреждениях, не располагающих квалифицированными кадрами специалистов-электрофизиков.

8. Проанализированы и предложены пути модификации разработанных циклотронов, показывающие разнообразные возможности их прикладного применения.

Предложен универсальный ускорительный комплекс для медицинских учреждений, составленный из циклотронов технологического ряда и удовлетворяющий современным требованиям ядерной медицины в ускоренных пучках ионов для производства радионуклидов, нейтронной терапии, элементного анализа, терапии протонным пучком и протонной радиографии. Сравнительно скромные габариты ускорителей и возможность их поэтапного ввода в действие являются преимуществами данного предложения.

9. При участии автора, являвшегося руководителем группы специалистов НИИЭФА, в соответствии с условиями контракта проведен монтаж, пуск и сдача циклотрона МЦ-20 с разветвленной системой транспортировки пучка в Або Академии (г.Турку, Финляндия). Таким образом, были успешно завершены работы по выполнению одного из крупных контрактов Всесоюзного объединения "Техснабэкспорт" на поставку научной аппаратуры из СССР в развитую капиталистическую страну.

Материалы диссертации были доложены на всесоюзных и международных конференциях и совещаниях по ускорителям и их применению, а также опубликованы в виде препринтов НИИЭФА и статей в научно-технических журналах и сборниках.

Список основных печатных работ приводится ниже.

1. Расчет основных элементов ускорительного тракта, систем отклонения и транспортировки пучка циклотрона У-120-1. Препринт. М., ИТЭФ, 1961, 20 с. Авт.: А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, Р.Н.Литуновский, И.М.Матора, Е.С.Миронов, Н.А.Моносзон, Л.М.Неменов, А.В.Степанов, Н.Д.Федоров.
2. Результаты экспериментальных исследований магнитных структур секторного циклотрона с широким диапазоном изменения энергии. - В сб.: Электрофизическая аппаратура. М., Атомиздат, 1963, вып. I, с. 44-50. Авт.: А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, Р.Н.Литуновский, А.В.Степанов.
3. Основные характеристики изохронного циклотрона с переменной энергией частиц. - В кн.: Труды международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963. М., Атомиздат, 1964, с. 600-603. Авт.: А.Г.Алексеев, Ю.Г.Басаргин, И.Ф.Жуков, Ю.К.Лаврентьев, Р.Н.Литуновский, И.Ф.Малышев, Н.П.Невров, А.В.Степанов, И.В.Тузоз.

4. Опыт наладки серии циклотронов с диаметром полюсов электромагнита 120 см. - В сб.: Электрофизическая аппаратура. М., Атомиздат, 1963, вып. I, с. 53-82. Авт.: А.Г.Алексеев, Б.П.Ангелов, Ю.Г.Басаргин, Л.Н.Ваулин, М.Д.Веселов, Д.Л.Дондыш, Р.Н.Литуновский, Г.А.Наливайко, В.В.Пироговский, Н.А.Романов, А.В.Степанов, В.А.Суслов.
5. Секторный циклотрон с диаметром полюсов электромагнита 685 мм. "Атомная энергия", 1966, 20, 5, с. 429-430. Авт.: А.Г.Алексеев, В.Н.Барковский, Ю.Г.Басаргин, В.Н.Васильев, Р.Н.Литуновский, О.А.Миняев, В.Н.Николаев, А.В.Степанов.
6. 240-cm and 68,5-cm variable energy isochronous cyclotrons. "IEEE Trans. on Nucl.Sci.", 1966, NS-13,4, p.515-516. Auth.: A.G.Alekseev, Yu.G.Basargin, R.N.Litunovsky, I.F.Malyshev, N.A.Monoszon, A.V.Stepanov, I.V.Tuzov.
7. Experiments on ion acceleration at 685 mm sector cyclotron. "IEEE Trans. on Nucl.Sci.", 1966, NS-13,4, p.380-382. Auth.: V.N.Barkovsky, V.N.Vasiljev, R.N.Litunovsky, O.A.Minjaev, V.N.Nikolaev, A.V.Stepanov, A.S.Fjodorov.
8. Variable energy isochronous cyclotron. In book: Proceedings of the V Int.Conf. on high energy accelerators, Frascati, 1965. Roma, 1966, p.426-427. Auth.: A.G.Alekseev, Yu.G.Basargin, R.N.Litunovsky, I.F.Malyshev, N.P.Nevrov, A.V.Stepanov, I.V.Tuzov.
9. Ion optical studies of extraction, transport and analyses systems for 240 cm cyclotron. "IEEE Trans. on Nucl.Sci.", 1966, vol.NS-13,4, p.344-348. Auth.: V.N.Barkovsky, Yu.G.Basargin, R.N.Litunovsky, O.A.Minjaev, V.N.Nikolaev, A.V.Stepanov, A.S.Fedorov.

10. Степанов А.В., Федоров А.С. Результаты моделирования магнитного поля изохронного циклотрона У-240 с регулируемой энергией частиц. - В сб.: Электрофизическая аппаратура. М., Атомиздат, 1969, вып. 8, с. 23-29.
11. Регулирование энергии частиц на 685-мм секторно-фокусирующем циклотроне. - В сб.: Электрофизическая аппаратура. М., Атомиздат, 1969, вып. 8, с. 33-38. Авт.: В.Н.Барковский, В.Н.Васильев, В.Н.Николаев, А.В.Степанов, А.С.Федоров.
12. Бордо Г.М., Степанов А.В. Устройство для измерения напряженности магнитного поля. Авт. свидетельство № 249467, кл. G01r, от 23.05.1969. "Бюл. изобрет.", №25, 1969.
13. Степанов А.В. К расчету фазового движения в циклотроне. - В сб.: Электрофизическая аппаратура. М., Атомиздат, 1969, вып. 8, с. 29-32.
14. Опыты по ускорению и отклонению пучка на модели изохронного циклотрона У-240. - В кн.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1968. М., Атомиздат, 1970, с. 332-337. Авт.: Ю.Г.Басаргин, Р.Н.Литуновский, О.А.Миняев, А.В.Степанов, А.С.Федоров.
15. Радин С.И., Степанов А.В. Программа контроля и предварительной обработки данных магнитных измерений циклотрона У-240. - В кн.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1968. М., Атомиздат, 1970, с. 645-647.
16. Basic design parameters of a small size isochronous cyclotron. In book: Proceedings of the fifth Int. Cyclotron Conference, Oxford, 1969. London, Butterworths, 1970. Auth.: A.G.Alekseev, P.V.Bogdanov, A.N.Galaev, I.F.Malyshov, V.A.Panov, A.V.Stepanov, I.V.Tuzov.

17. Циклотрон для активационного анализа. Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине. Л., НИИЭФА, 1971, докл. № 81. Авт.: А.Г.Алексеев, П.В.Богданов, В.А.Кассиров, И.Ф.Малышев, Ю.Л.Нифонтов, В.И.Перегуд, А.В.Попкович, А.В.Степанов, И.В.Тузov, И.И.Финкельштейн.
18. Расчетные параметры тракта ускорения и выпуска пучка циклотрона для активационного анализа. Материалы Всесоюзного научно-технического совещания по использованию ускорителей в народном хозяйстве и медицине. Л., НИИЭФА, 1971, докл. № 91. Авт.: А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, В.А.Панов, С.И.Радин, А.В.Степанов, Ю.И.Стогов.
19. 103-cm compact isochronous cyclotron. In book: Cyclotrons-1972. Proceedings of the Sixth International Cyclotron Conference, Vancouver, Canada, 1972. AIP Conf.Proc., No.9, New York, 1972, p.102-106. Auth.: Yu.G.Basargin, P.V.Bogdanov, A.N.Galaev, A.V.Galchuk, V.A.Glukhikh, A.O.Gusev, I.F.Malyshov, A.V.Popov, A.V.Stepanov, Yu.I.Stogov, I.I.Finkelshtein.
20. Система транспортировки пучка компактного циклотрона университета г.Турку. Препринт Г-0151. Л., НИИЭФА, 1972, 15 с. Авт.: Ю.Г.Басаргин, Н.И.Болдин, А.В.Гальчук, В.А.Глухих, А.В.Степанов.
21. Наладка и запуск прототипа 103-см малогабаритного циклотрона. - В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1974. М., "Наука", 1975, т.П, с. 46-49. Авт.: Ю.Г.Басаргин, П.В.Богданов, А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, В.А.Глухих, О.А.Гусев, М.С.Давыдов, В.А.Кассиров, Е.Б.Кривов,

- И.Ф.Малишев, В.Г.Мудролюбов, Г.М.Павлов, А.В.Попов, А.В.Степанов, Ю.И.Стогов, И.И.Финкельштейн, В.И.Чуйко.
22. Источник ионов и система возврата гелия-3 103-см компактного циклотрона. Препринт А-0307. Л., НИИЭФА, 1976, 8 с. Авт.: П.В.Богданов, Е.Б.Крымов, И.Ф.Малишев, В.Я.Моисеев, А.В.Степанов, П.А.Фефелов, А.И.Яковлев.
23. Вакуумная система компактного изохронного циклотрона. Препринт Б-0365. Л., НИИЭФА, 1977, 26 с. Авт.: П.В.Богданов, И.Ф.Малишев, В.Я.Моисеев, Г.Л.Саксаганский, А.В.Степанов, П.А.Фефелов.
24. Магнитный анализатор компактного циклотрона. "Журнал технической физики", 1977, том 47, вып. 9, с. 1904-1908. Авт.: Ю.Г.Басаргин, А.В.Гальчук, Л.Е.Королев, В.Г.Левченко, Г.М.Павлов, А.В.Попов, А.В.Степанов.
25. Параметры пучка 103-см компактного циклотрона. - В кн.: Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976. М., "Наука", 1978, т.1, с.174-177. Авт.: П.В.Богданов, А.В.Гальчук, М.С.Давыдов, Е.Б.Крымов, Г.М.Павлов, А.В.Степанов, Ю.И.Стогов.
26. Компактный дейтронный циклотрон. Проектные параметры. - В кн.: Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976. М., "Наука", 1978, т.1, с. 170-174. Авт.: П.В.Богданов, А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, А.В.Климов, И.Ф.Малишев, В.Г.Мудролюбов, А.В.Степанов, В.Ф.Цветков.
27. Степанов А.В. Характеристики и применение компактных циклотронов. В сб.: Тезисы докладов на Рабочем совещании по технике изохронных циклотронов. ИЯФ, Краков, Польша, 1978, с. 3.

28. Возможности использования 103- и 60-см циклотронов в активационном анализе. - В сб.: Ядерно-физические методы анализа на заряженных частицах. Ташкент, изд. "ФАН", 1978, с. 12-13. Малишев И.Ф., Степанов А.В., Иванов И.Н., Николаенко О.К.
29. Параметры и конструктивные особенности 103- и 60-сантиметровых компактных циклотронов. - В сб.: Ядерно-физические методы анализа на заряженных частицах. Ташкент, изд. "ФАН", 1978, с. 12-13. Авт.: П.В.Богданов, А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, И.Ф.Малишев, А.В.Степанов.
30. Степанов А.В. Ускорение различных ионов в фиксированном поле секторного циклотрона. Препринт В-0399. Л., НИИЭФА, 1978, 7 с.
31. Магнитное поле 103-см компактного циклотрона. Препринт В-0347. Л., НИИЭФА, 1978, 19 с. Авт.: А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, Л.А.Рябова, А.В.Степанов, Ю.И.Стогов.
32. Система выпуска пучка 103-см компактного циклотрона. Препринт В-0348. Л., НИИЭФА, 1978, 11 с. Авт.: А.В.Гальчук, Е.Б.Крымов, Л.А.Рябова, А.В.Степанов.
33. Некоторые особенности 103-см компактного циклотрона. - В сб.: Тезисы докладов на Рабочем совещании по технике изохронных циклотронов. ИЯФ. Краков, Польша, 1978, с. 12-13. Авт.: П.В.Богданов, А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, М.С.Давыдов, Е.Б.Крымов, И.Ф.Малишев, А.В.Степанов, Ю.И.Стогов.
34. 103 and 60-cm compact cyclotron engineering. Proc. of eighth international conference on Cyclotrons and their Applications, 1978. "IEEE Trans. on Nucl. Sci.", 1979, vol. NS-26, p. 2030-2032. Auth.: P. V. Bogdanov, A. N. Galaev, A. V. Galchuk,

М.С.Давыдов, Е.В.Крымов, I.Ф.Малышев, V.С.Мудролюбов,
G.М.Равлов, А.В.Степанов.

35. Проектные параметры радиоизотопного циклотрона РИЦ. - В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978. Дубна, ОИЯИ, 1979, т. 2, с. 330-333. Авт.: П.В.Богданов, Ю.П.Вахрушин, М.Ф.Ворогушин, А.Н.Галаев, А.В.Гальчук, В.А.Глухих, О.А.Гусев, М.С.Давыдов, В.В.Иванов, Б.Г.Карасев, В.Г.Мудролюбов, А.А.Соламес, А.В.Степанов, М.М.Суворов, Г.Ф.Чураков, Ю.А.Мясников, Н.Н.Краснов, А.А.Огнев.
36. Степанов А.В. Применение компактных циклотронов в ядерной медицине. - В кн.: Использование протонных пучков в лучевой терапии. М., Атомиздат, 1979, вып. 2, с. 206-212.
37. Технологический ряд циклотронов для прикладных целей. - В кн.: Доклады III Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л., НИИЭФА, 1979, т. I, с. 213-217. Авт.: Ю.П.Вахрушин, М.Ф.Ворогушин, И.Ф.Малишев, А.В.Степанов.
38. Гальчук А.В., Степанов А.В., Стогов Ю.И. Особенности динамики пучка компактного 103-см циклотрона. - В кн.: Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1978. Дубна, ОИЯИ, 1979, т. I, с. 273-276.
39. Способ повышения надежности мишени. Авт. свидетельство № 646475, кл. Н05Н7/00. "Бюл. изобрет.", №5, 1979, с. 210, Авт.: В.И.Андреев, А.В.Гальчук, Е.В.Крымов, Г.М.Павлов, А.В.Степанов.

40. Циклотрон НГИ в Або Академии и опыт его эксплуатации. - В кн.: Доклады Третьего Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л., НИИЭФА, 1979, т. I, с. 218-224. Авт.: А.В.Степанов, П.В.Богданов, А.В.Гальчук, Е.В.Крымов.
41. Камера рассеяния для экспериментов с пучками ускоренных частиц. Препринт П-А-0415. Л., НИИЭФА, 1979. Авт.: П.В.Богданов, С.П.Гурин, В.А.Дивавин, И.Ф.Малишев, В.Я.Моисеев, Г.Л.Саксаганский, А.В.Степанов.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 марта 1980 года.