

Д-64
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.384.6.

9-86-697

ДОЛБИЛОВ

Геннадий Варламович

СОЗДАНИЕ И ЗАПУСК ПРОТОТИПА
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ

Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1986

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
профессор

В.П. Саранцев

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук

В.В. Кольга

доктор технических наук

Ю.П. Вахрушин

Ведущая организация: Московский радиотехнический
институт АН СССР, Москва.

Защита состоится " _____ " _____ 1986 г. в _____ часов
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, Дубна
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1986 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук

Б.А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие экспериментальных исследований в ядерной физике связано с использованием пучков ускоренных тяжелых ионов. К числу таких исследований относятся синтез далеких трансуранных элементов, изучение глубоконеупругих процессов, получение сверхплотной ядерной материи и т.п. Все большее распространение получают исследования по применению тяжелых ионов в промышленности, химии, биологии и медицине. Для решения этих и ряда новых задач требуются пучки ускоренных ионов всех элементов периодической таблицы Д.И. Менделеева.

Проблема ускорения тяжелых ионов сейчас интенсивно решается во многих лабораториях мира, где проектируются и создаются установки, предназначенные для получения сверхтяжелых ионов всех элементов, включая уран. Наряду с развитием классических ускорителей широкое распространение получили исследования в области новых методов ускорения. Одним из таких направлений является коллективное ускорение тяжелых ионов электронными кольцами. Основы такого метода были заложены В.И. Векслером в работах 1956 г. Коллективный ускоритель тяжелых ионов (КУТИ) позволяет ускорять все элементы и получать большие интенсивности ионных пучков тяжелых элементов вплоть до урана.

Цель работы:

1. Разработка, создание и запуск прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов.
2. Экспериментальное исследование ускорения ионов электронными кольцами.

Научная новизна. Основные результаты диссертационной работы связаны с развитием нового направления в физике и технике ускорителей - коллективного метода ускорения тяжелых ионов. Экспериментально показана возможность создания качественно новой установки - коллективного ускорителя тяжелых ионов, что открывает новые возможности в развитии коллективных ускорителей.

Практическая ценность. Полученные результаты положены в основу проектирования и создания коллективного ускорителя тяжелых ионов КУТИ-20 - инжектора ускорительного комплекса тяжелых ионов (УКТИ) ОИЯИ.

Результаты диссертации могут быть использованы в разработках линейных индукционных ускорителей, установок с интенсивными релятивистскими электронными кольцами и коллективных ускорителей.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись и докладывались на Международных совещаниях по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (VI, Кембридж, 1967; VII, Ереван, 1969 г.; IX, Станфорд, 1974 г.; X, Протвино, 1977 г.), Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (II, Москва, 1970 г.; IV, Москва, 1974 г.; VI, Дубна, 1978 г.; VII, Дубна, 1980 г.), I, II и III Симпозиумах по коллективным методам ускорения в Дубне (1972 и 1976 гг.) и Лагуна Бич (Калифорния, США, 1978 г.), II Симпозиуме по сильноточной эмиссионной электронике, Томск, 1975 г.

Публикации. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, отражены в 17 печатных работах, опубликованных в "Журнале технической физики", журнале "Атомная энергия", трудах конференций и симпозиумов, в виде препринтов и сообщений ОИЯИ.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 167 страницах машинописного текста, иллюстрируется 70 рисунками на 52 страницах. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы из 231 наименования на 13 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится описание принципа коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами, обсуждаются вопросы устойчивости электронно-ионных колец, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с созданием, наладкой и запуском инжектора прототипа КУТИ ОИЯИ - наносекундного индукционного ускорителя СИЛУНД: расчет и экспериментальное исследование систем ускорителя, комплексная наладка СИЛУНДа и измерение характеристик пучка ускоренных электронов.

В первом параграфе содержится обзор работ по сильноточным электронным пучкам и проводится анализ параметров их пучков. Обсуждаются результаты исследований холодных катодов со взрывной эмиссией электронов в режиме ограничения тока объемным зарядом и в режиме нейтрализации объемного заряда. Показана высокая эффективность работы холодных катодов в режиме нейтрализации пространственного заряда и принципиальная возможность их использования в ЛИУ /2-4/.

Рассматривается модель механизма образования плотной плазмы в

протяженном разрядном канале и формирования пучка ускоренных электронов /4/. Результаты расчетов режимов источника электронов, выполненных в соответствии с предложенной моделью, находятся в хорошем качественном согласии с результатами экспериментальных исследований.

Приводится описание плазменного источника электронов с холодным катодом в режиме формирования плазменно-пучкового разряда в длинном ($l \gg d$) газовом канале с градиентом давления от анода к катоду.

Окончательный выбор источника электронов проведен после испытания их на ускорителе. Лучшие результаты по инжекции незамагниченного пучка в ускорительный тракт СИЛУНДа были достигнуты при использовании плазменного источника с холодным катодом. Такой источник не требует принудительного распределения потенциала в области формирования пучка и специальных мер по его согласованию с ускорительным трактом.

Конструкция и внешний вид источника электронов ускорителя СИЛУНД приведены на рис. I. Разрядная трубка источника (2) совмещена с индукционной секцией (4). Давление газа (сухой азот) в области холодного катода (3) $P_k \approx (1,5-2)$ Па, в анодной области (9) $P_a \approx 0,2$ Па.

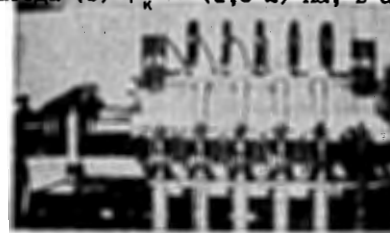


Рис. I. Источник электронов ускорителя СИЛУНД.

Приводятся результаты исследования основных характеристик источника. Диапазон рабочих режимов источника: ток до 1 кА, энергия электронов до 360 кэВ, длительность импульса тока 30-40 нс, размер пучка $Q \approx 1,5$ см. Измерения параметров пучка в Адгезаторе прототипа КУТИ и эксперименты по формированию электронных колец показали, что энергетический разброс и эмиттанс пучка соответствуют требованиям коллективного ускорителя.

Во втором параграфе рассматриваются основные процессы в индукторах ЛИУ, обсуждаются возможности использования современных ферромагнитных материалов в наносекундных индукционных ускорителях и обосновывается целесообразность применения кольцевых ферритовых сердечников марки НН. Использование промышленных сердечников из феррита позволило существенно сократить сроки создания и стоимость ускорителя.

Разработанный для СИЛУНДа вариант индукционной ускоряющей систе-

мы позволяет осуществлять подвод импульсной мощности модуляторов (генераторов импульсов ускоряющего напряжения) непосредственно к ускоряющим электродам. Элементы конструкции витков ферритовых сердечников выполняют роль полосковых линий, соединяющих фидера модуляторов с электродами ускоряющей трубки. Индукционная система рассчитана на ускорение пучка электронов с током до 1 кА и темпом набора энергии 300+500 кэВ/м, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Входной импеданс ненагруженной пучком системы в рабочем диапазоне начальных состояний феррита имеет активное значение и равен $R \approx 60$ Ом на индуктор. СИЛУНД содержит пять ускоряющих секций по 18 индукторов каждая.

Ускоряющее напряжение индукционной системы формируется 30-импульсными генераторами. Проведенные исследования показали перспективность схем модуляторов наносекундных ЛИУ с использованием мощных водородных тиратронов ТГИИ-2500/50 и нелинейных обостряющих ферритовых линий. Первые предложения по обострению фронта импульсов тиратронов ТГИИ-2500/50 ферритовыми линиями в модуляторах ЛИУ наносекундного диапазона содержатся в работе А.Д.Коваленко и др.^{3*}

В модуляторах СИЛУНД нелинейные эффекты схемы используются также (помимо обострения фронта импульса со 100 нс до 5+7 нс) для стабилизации ускоряющего напряжения при флуктуациях тока пучка, $\Delta U = \rho_0 (m_{\text{отр}}^* / m_{\text{пад}}^*)^{1/2} \Delta U$. Для ферритов марки 40ОНН отношение ударных магнитных проницаемостей для отраженной и падающей волн лежит в пределах 1/10 + 1/50 (ρ_0 - волновое сопротивление линии в замкнутом состоянии). Каждый модулятор развивает мощность ~ 100 МВт в импульсе.

В этом же параграфе обобщается опыт эксплуатации большой группы тиратронов ТГИИ-2500/50 в наносекундном ускорителе. Даются рекомендации по повышению стабильности их параметров.

Третий параграф посвящен вопросам поперечного движения частиц в ускорителе СИЛУНД, расчету равновесных размеров пучка с произвольным распределением плотности заряда по радиусу, анализу колебаний огибающей пучка и его когерентных колебаний.

Расчет равновесных размеров интенсивного пучка с произвольным распределением по радиусу собственных скалярного и векторных потенциалов (U^* , A_θ^* , A_z^*) и конечным фазовым объемом основан на анализе амплитуд колебаний произвольных (пробных) частиц в потенциальной яме внешнего фокусирующего и собственных полей пучка. Амплитуды колебаний пробных частиц, соответствующих границе фазового объема, дают

* В.Д.Гитт, А.Д.Коваленко, П.И.Рыльцев, В.П.Саранцев. Сообщение ОИЯИ, Р9-5601, Дубна, 1971.

информацию об огибающей пучка. Такие частицы имеют максимальные энергии радиальных колебаний в суммарной потенциальной яме. Учтено влияние азимутальных скоростей частиц на равновесные размеры пучка $\alpha^2 = \alpha_0^2 + \Delta \alpha^2$, $\Delta \alpha^2 \approx \alpha_0^2 U / (\beta \gamma U_0)$. ($\alpha_0^2 = 2 m c V / (e B)$, $U_0 = 17$ кВ, V - фазовый объем, $\alpha_0^2 = \alpha_3^2 / 2 + \sqrt{\alpha_3^2 / 4 + \alpha_4^2}$ - равновесный размер при $U_z = U$). Бриллюэновская составляющая размера $\alpha_3 = (U^* / U_0^*)^{1/2}$. α_{03} ($\alpha_{03} = 2 m c / (e B) [2 U / (\beta \gamma U_0)]^{1/2}$, U_0^* и U^* - потенциалы на границе пучка для $\rho_0 = \text{Const}$ и $\rho = \rho(z)$).

Проведен анализ возмущений огибающей пучка и его когерентных смещений (с учетом сил притяжения пучка на стенки ускоряющего тракта), а также анализ устойчивости этих возмущений.

Основные результаты анализа динамики пучка в ускоряющем тракте СИЛУНД сводятся к следующему. При токе пучка $I \approx 10^3$ А, фазовом объеме $V \approx 10^{-3}$ рад·м, энергии $e U = (0,25+3,0)$ МэВ для ограничения радиальных отклонений частиц пучка в пределах $r = 1,5+2$ см необходимая величина магнитной индукции составляет $B_n \approx 0,1$ Т в начале ускорителя и $B_n \approx (0,12+0,16)$ Т в конце ($e U_n = 1,5+3$ МэВ). Неоднородности магнитной индукции, приводящие к расклатке когерентных колебаний и колебаний огибающей пучка, не должны превышать $\Delta B / B \approx \pm (10+15)\%$.

Проведен расчет фокусирующей системы ускорителя СИЛУНД и дается описание варианта ее исполнения. Система обеспечивает формирование соленоидального магнитного поля с индукцией до 0,22 Т в импульсе ($T_{\text{имп}} \sim 10^{-3}$ с). Амплитуды и период модуляции поля в ускоряющих секциях, определяющие коэффициенты уравнения мате, соответствуют первой устойчивой области диаграммы мате во всем диапазоне рабочих параметров пучка. Фокусирующая система межсекционных камер обеспечивает формирование магнитных полей с $\Delta B / B < 10\%$ и размещение необходимых технологических и диагностических устройств.

Обсуждаются различные варианты ускоряющих трубок ЛИУ. Описываются конструкции трубок, использованных на ускорителе СИЛУНД.

В четвертом параграфе приводятся результаты экспериментальных исследований пучка в ускоряющем тракте и наладки наносекундного ускорителя СИЛУНД. Основные сложности в наладке ускорителя были связаны с развитием продольной высокочастотной неустойчивости пучка в индукционных секциях. Исследования вЧ-характеристик индукционной системы показали, что она имеет собственные резонансные частоты, период колебаний которых составляет 3,8 нс, 1,6 нс, 0,8 нс с добротностями резонансных линий $Q = 6,5; 21,2$ и $8,5$ соответственно. Показано, что изменением геометрии диафрагм ускоряющих трубок или применением полупроводящих цилиндрических вставок можно подавить опасные моды колебаний с периодом, меньшим длительности импульса тока пучка.

Устранение резонансных частот в ускоряющей системе позволило получить коэффициент токопрохождения по ускорительному тракту СИЛУНДа, близкий к единице, при токах пучка до 900 А.

Размеры сечения ускоренного пучка в типовых режимах настройки ускорителя составляют ~ 10 мм. Отклонение пучка от оси зависит от фазы устойчивых когерентных колебаний и не превышает ~ 5 мм (рис. 2).



Рис. 2. "Автограф" пучка ускоренных электронов. Осциллограммы тока пучка (верхняя) и результирующего импульса ускоряющего напряжения (нижняя): 50 нс/дел, 800 А/дел, 1,6 МэВ/дел.

На рис. 2 приведены также осциллограммы импульса тока на выходе ускорителя, $I \approx 700$ А, и результирующего импульса ускоряющего напряжения.

Приводится описание установки, аппаратуры и диагностических устройств, предназначенных для исследования характеристик ускоренного пучка. В режимах настройки ускоряющей системы СИЛУНДа с малым энергетическим разбросом относительный разброс по энергиям составляет $(1 \pm 3)\%$. Фазовый объем пучка $\nu \approx 10^{-3}$ рад·м. Рабочий диапазон средних энергий 1,8 - 2,4 МэВ⁵⁻⁹.

Во второй главе рассматриваются вопросы создания Адгезатора прототипа КУТИ, его наладки и получения электронных колец с электрическим полем ~ 50 МВ/м.

В первом параграфе главы содержатся предложения по реализации однооборотной системы инжекции в узкопрофильной металлической камере Адгезатора. Дается описание устройств инжекции и захвата. Проведен расчет системы захвата пучка на равновесную орбиту.

Ввод пучка на инжекционную орбиту производится с помощью системы, которая обеспечивает эффективную экранировку канала транспортировки от рассеянных полей Адгезатора, осуществляет фокусировку интенсивного пучка, а также регулировку размеров, положения кроссовера и когерентного угла при его инжекции. Система не создает опасных возмущений магнитного поля на равновесной орбите и обеспечивает требуемый перепад давлений ($P_1 \sim 10^{-6}$ Тор, СИЛУНД - $P_2 \sim 10^{-8}$ Тор, Адгезатор). Для уменьшения искажений поля Адгезатора последний участок транспортировки пучка имеет активную компенсационную петлю, возбуждаемую импульсным током ($\tau_c \sim 10^{-7}$ с), - инфлектор.

Когерентные колебания пучка относительно равновесной орбиты гасятся бегущей ТЕМ-волной. Пространственная конфигурация электромаг-

нитного поля волны формируется стенками узкопрофильной камеры Адгезатора и электродами линии. Когерентные смещения и угол на выходе корректирующего устройства будут отсутствовать, если его центр симметрии расположен в узле когерентных бетатронных колебаний. Для параметров пучка и магнитной системы прототипа КУТИ напряженность электрического поля ТЕМ - волны $E = 3 \pm 6$ кВ/см. Допустимая неоднородность поля в области пучка $\Delta E/E \leq 10\%$. Длительность спада импульса ТЕМ-волны $\tau_c \sim 1$ нс $\ll \frac{2\pi R}{v} \sim 7 \pm 8$ нс, амплитуда послеимпульсов не более 10%.

Основные результаты исследований и наладки систем инжекции и захвата интенсивного пучка в узкой металлической камере Адгезатора сводятся к следующему. Сформированы электронные кольца со средним радиусом $R \approx 35$ см и малыми полуразмерами сечения до $a \approx 2-2,5$ см. Интенсивность колец при $\Delta \epsilon/\epsilon \sim 5\%$ составляет 200-250 А ($N_e \sim 10^{13}$). При интенсивностях $N_e \sim 2 \cdot 10^{13}$, соответствующих границе порога устойчивости аксиальных когерентных колебаний, устойчивых режимов захвата не наблюдается [9, 10].

Во втором параграфе дается описание конструктивных особенностей Адгезатора прототипа КУТИ. Адгезатор представляет собой комплекс функционально различных устройств, объединенных в одну базовую конструкцию. Сложность решения технических задач при создании Адгезатора составляют большие механические и тепловые нагрузки, жесткие ограничения на материал ряда конструкций и геометрию вакуумной камеры, а также высокие требования к рабочему вакууму.

Вакуумная камера является устройством, выполняющим основные функции по обеспечению азимутальной устойчивости интенсивных электронных колец. В качестве материала камеры выбрана нержавеющей сталь марки 12Х18Н9Т с удельным сопротивлением $0,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·м и пределом прочности 500 МПа. Для обеспечения определенного соотношения между аксиальной апертурой камеры H и радиусом R , а именно $H \approx (0,6 \pm 0,7)R$, используется цельнометаллический сварной вариант камеры с вогнутыми сферическими боковыми стенками и вогнутой тороидальной обечайкой. Усилия удержания формы камеры составляют ~ 300 кН. Напряжения в сфере боковых стенок ~ 190 Па.

Стапель Адгезатора выполнен из стеклотекстолита и рассчитан на импульсные нагрузки $\sim 10^5$ Н. В стапеле размещаются обмотки магнитной системы сжатия и вывода. Магнитная система Адгезатора состоит из 4 пар катушек сжатия и ускоряющего соленоида. Система обеспечивает формирование магнитных полей с индукцией до ~ 2 Т и позволяет получать большой набор $n(z)$ - траекторий электронного кольца.

В третьем параграфе описывается экспериментальная установка, диагностические устройства, аппаратура и методики по исследованию процессов адиабатического сжатия электронных колец. В экспериментах

по сжатию и при наладке Адгезатора измерялись интенсивность, равновесный радиус и размеры сечения колец. Потери частиц при сжатии регистрировались Υ - датчиками по всплхам жесткого рентгеновского излучения. На конечной стадии сжатия основные измерения характеристик электронных колец проведены с помощью инфракрасных детекторов синхротронного излучения и фотографирования кольца в видимом синхротронном свете (рис.3).

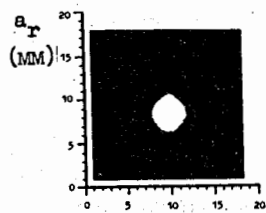


Рис. 3. Фотография сечения кольца в видимом синхротронном свете.

Потери частиц при сжатии устранены уменьшением азимутальных искажений магнитных полей и выбором $n(z)$ - траектории кольца. Верхняя граница n - траектории определяется параметрическим резонансом аксиальных колебаний, нижняя - когерентной устойчивостью пучка в узкой металлической камере. Критериями настройки n - траектории служили отсутствие потерь и минимальные размеры сечения кольца в конечном состоянии. В результате наладки получены сжатые электронные кольца с числом электронов $N_e \sim 10^{13}$, средним радиусом $R \approx 3,5-4$ см, полуразмерами сечения $a \approx 2+3$ мм и максимальной напряженностью электрического поля порядка 50 МВ/м ^{9,11,12/}. Получение сжатых колец с параметрами, близкими к расчетным, подтверждает правильность выбора камеры Адгезатора, эффективность подавления камерой азимутальных неустойчивостей, правильность выбора и расчета магнитной системы сжатия (Э.А.Перельштейн^{*}, В.С.Александров^{**}).

Третья глава диссертации посвящена вопросам ускорения электронно-ионных колец в магнитной и электрической ускоряющих системах.

В первом параграфе дается описание широкого набора аппаратуры и методов диагностики важных для коллективного ускорителя параметров пучка: числа ионов и электронов в кольце, размеров колец, факторов массовой загрузки и нейтрализации, продольной скорости электронно-ионных колец, числа и энергии ускоренных ионов. Обсуждаются различные коллективные процессы, наблюдаемые только в интенсивных электронно-ионных кольцах, и их влияние на точность измерений. Описываются новые методы диагностики, использующие специфику пучка коллективного уско-

* В.П.Саранцев, Э.А.Перельштейн. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.

** В.С.Александров. Расчет магнитной системы и формирование магнитного поля коллективного ускорителя тяжелых ионов ОИЯИ. ОИЯИ, 9-12935, Дубна, 1979.

рителя. Дается сравнение результатов, полученных разными методами.

Определение числа электронов N_e производилось индукционными датчиками, измеряющими ток кольца, и по тормозному Υ - излучению (ТИ) электронов на нейтральных атомах остаточного газа. На конечных этапах сжатия интенсивность колец измерялась по мощности I_λ синхротронного излучения (СИ), пропорционального числу электронов $I_\lambda = W_\lambda N_e$ (W_λ - спектральная мощность СИ одного электрона). Измерения проводились как в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне, так и в оптическом диапазоне спектра СИ. Для повышения точности измерений релятивистский Υ - фактор электронов определялся тремя способами: 1) по соотношению магнитной индукции и радиуса кольца, $\Upsilon = (e^2 B_z^2 R^2 / m^2 c^4 + 1)^{1/2}$; 2) по положению максимума спектра СИ, $\Upsilon = (1,764 R / \lambda_m)^{1/3}$; 3) по соотношению мощностей СИ W_1 и W_2 на различных длинах волн λ_1 и λ_2 , $\Upsilon = \{ [4,2 (\lambda_1 - \lambda_2) / \lambda_1 \lambda_2] / \ln [(\lambda_1 / \lambda_2)^{5/2} W_1 / W_2] \}^{1/3}$.

При определении N_e в интенсивных электронно-ионных кольцах необходимо учитывать эффект нелинейного ослабления интенсивности СИ при увеличении N_e . Такой эффект обнаружен в процессе наладки прототипа КУТИ и характерен только для интенсивных электронно-ионных колец. Объяснение такого эффекта уширением углового распределения СИ при наличии ионов дано Э.А.Перельштейном и Н.Ю.Казариновым^{*}.

Большой радиус R и размеры сечения колец a_z и a_x при их сжатии определялись по положению и размерам изображения сечения колец в синхротронном свете. Радиус R , радиальный размер a_z и смещение центра Δz при ускорении колец измерялись путем облучения кольцами рентгеновских фотопленок или сцинтилляторов.

Число ионов N_i в электронном кольце и связанные с ним параметры: $f = z N_i / N_e$ - фактор нейтрализации, $\xi = AM N_i / (m \Upsilon N_e)$ - фактор массовой загрузки, произведение $N_i N_e$ - определялись различными методами, использующими: 1) уширение углового распределения СИ (f), 2) высокочастотную активность колец на частотах дипольных когерентных колебаний ω^{**} ($\xi = \omega / \omega_0$, $\omega_0 = v/R$), 3) тормозное излучение электронов на ионах, накопленных в кольце ($N_i N_e$), 4) зависимость темпа набора скорости электронным кольцом от величины его загрузки ионами (ξ), 5) наведенную активность мишеней.

Прямые измерения числа ускоренных ионов проводились после разделения компонент кольца по величине заряда ионного пучка. Схема ус-

* Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-862, Дубна, 1983.

** С.Н.Доля, А.К.Красных, Э.А.Перельштейн. Совещание по проблемам коллективного метода ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.56.

тановки для измерения интенсивности и радиального профиля кольцевого пучка ускоренных ионов приведена на рис. 4.

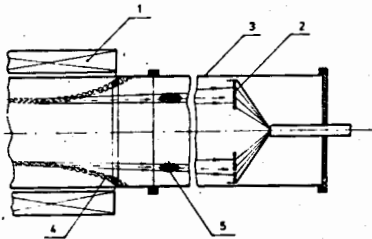


Рис. 4. Схема установки для очистки пучка ускоренных ионов и измерения его параметров. 1 - соленоид ведущего магнитного поля, 2 - позиционно-чувствительный датчик, 4 - траектории электронов кольца и замагниченных частиц малой энергии, 5 - траектории ускоренных ионов.

Определение энергии ионов производилось также по скорости электронно-ионного кольца, которая измерялась методом пролета или с помощью устройства, использующего специфику пучка коллективного ускорителя. Схема такого устройства приведена на рис. 5. Аксиально-протяженный коллектор 2 поглощает часть вращающихся электронов кольца. Доля поглощенных электронов и величина тени на сцинтиллаторе 3 зависят от аксиальной скорости кольца v_z и длины коллектора l . По азимутальной протяженности тени θ определяют продольную скорость электронно-ионного кольца $v_z = v [1 + (R\theta/l)^2]^{-1/2}$. Все указанные выше методики использовались в экспериментах по ускорению ионов электронными кольцами и дали удовлетворительное совпадение результатов, что существенно повышает их надежность.

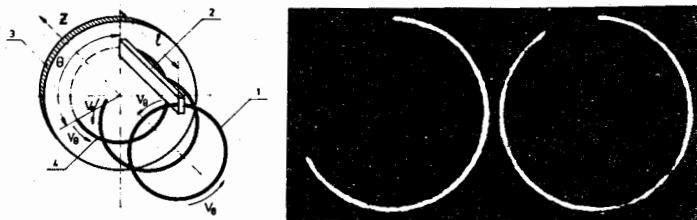


Рис. 5. Схема устройства для измерения продольной скорости кольца. Фотографии "автографов" кольца с различными скоростями v_z .

Во втором параграфе приведены результаты экспериментальных исследований и наладки магнитной ускоряющей системы. Дается описание установки и основных ее параметров. Проводится сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами теоретических исследований и расчетов магнитного способа ускорения.

В процессе наладки установки обнаружено, что требования к материалу и технологии изготовления обмотки градиентного соленоида существенно выше, чем для катушек ступеней сжатия. "Эффект тени" об-

мотки, приводящий к искажениям магнитных полей системы сжатия и n -траектории кольца, можно устранить, если обмотку соленоида выполнить из многожильного кабеля с изолированными проводниками толщиной $d \leq 0,5$ мм.

При больших массовых нагрузках кольца $\xi = 40+60$ прохождение единичного резонанса ($\nu_z = 1$) во внешней яме, связанного с ионной фокусировкой, не приводит к ухудшению параметров электронных колец. Одночастичный резонанс $\nu_z = 1$ при снятии магнитной ямы ($n = 0$) существенно влияет на параметры колец. При относительной амплитуде первой гармоники магнитного поля $\Delta B_1/B \sim 10^{-3}$ обнаружено радиальное смещение интенсивных ($N_e \sim 10^{13}$) колец на $1/2 - 1/3$ его радиуса. Для колец малой интенсивности ($N_e \sim 10^{12}$) помимо смещения центра наблюдается увеличение радиального размера сечения. Влияние единичного резонанса на параметры электронно-ионных колец уменьшается путем компенсации первой гармоники магнитного поля либо увеличением скорости прохождения резонанса.

Экспериментально показано, что ускорение ионов электронными кольцами в градиентном магнитном поле возможно в определенном диапазоне коэффициентов массовой нагрузки ξ и нейтрализации f электронных колец ($\xi = AMN_i / (m\gamma N_e) = AM / (z m \gamma) f$).

Указанная возможность иллюстрируется рис. 6а, где приведена зависимость активности мишени от величины нагрузки (давления остаточного газа, в атмосфере которого происходит накопление ионов) при ускорении самофокусирующихся электронно-ионных колец. Применение фокусирующей системы типа "беличье колесо" позволяет проводить ускорение с большим темпом (см. рис. 6б). Совокупность фокусирующих экранов, разновидностью которых является "беличье колесо", была предложена автором совместно с В.П. Саранцевым /1,17/ *

Эксперименты по ускорению ионов электронными кольцами в градиентном магнитном поле показали принципиальную возможность ускорения самофокусирующихся электронно-ионных колец, правильность выбора системы вывода и магнитной ускоряющей системы и их расчета. Параметры

* При фокусировке электронно-ионного кольца системой "беличье колесо" квадрат безразмерной частоты аксиальных колебаний электронов равен $\nu_z^2 = \nu_{z,i}^2 [1 + \frac{1}{f} \frac{\alpha \alpha_z}{(2h)^2}]$, $f = z N_i / N_e$, $\nu_{z,i}$ - частота колебаний электронов в фокусирующем поле ионов, h - расстояние между пучком и фокусирующим экраном. Фокусирующие действия ионов и "беличьего колеса" равны при $f \approx \alpha \alpha_z / (2h)^2$.

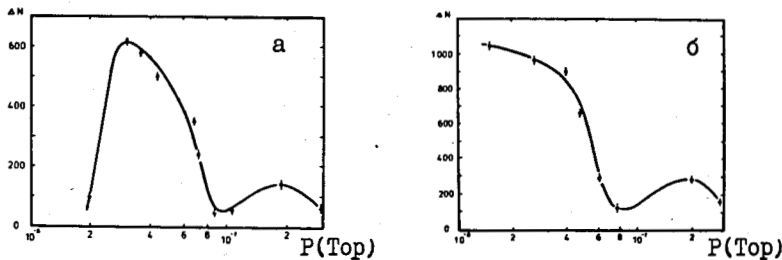


Рис. 6. Зависимость выхода активности мишени из дейтерия от давления остаточного газа (N^{14}) при облучении ионами азота, ускоренными в режиме самофокусирующихся колец (а) и в режиме фокусировки "беличьим колесом" (б).

ускоренного пучка ионов находятся в удовлетворительном согласии с расчетными данными и составляют: энергия ускоренных ионов азота $\sim 1,2$ МэВ/нукл. при темпе набора энергии $2+4$ МэВ/нукл.м, число ионов $N_i \sim 6 \cdot 10^{11}$ ионов/цикл. Число ускоренных ионов ксенона в одном электронном кольце $\sim 2 \cdot 10^{11}$. Увеличение эффективной длины ускорения (применение двух ускоряющих соленоидов) сопровождается увеличением энергии ионов (до $3,2$ МэВ/нукл.)^{/14-16/}. Внешний вид прототипа КУТИ ОИЯИ показан на рис.7.



Рис. 7. Прототип КУТИ ОИЯИ.

Третий параграф посвящен ускорению электронно-ионных колец во внешнем электрическом поле. Рассмотрены вопросы согласования электрической и магнитной ускоряющих систем.

Электрическая система с полем $E_{вн}$ и магнитная с относительным градиентом G согласованы, если параметр $\lambda = e E_{вн} / (m \gamma c^2 G) = 1$. В этом случае темпы ускорения в обеих системах равны, и их максимальные значения составляют $(d\mathcal{E}/dL)_{max} = e z / A (\kappa E_{кв} - E_{вн})$. При $\lambda > 1$ темп ускорения в электрической системе $d\mathcal{E}/dL \leq e z / A (\kappa \lambda E_{кв} - E_{вн})$, при $\lambda > 1$ - в магнитной системе $d\mathcal{E}/dL \leq (d\mathcal{E}/dL)_{max} \lambda^{-1}$.

Обсуждаются различные варианты систем для ускорения колец элект-

рическим полем. Рассматривается предложенный автором совместно с А.Б.Кузнецовым, Н.Б.Рубиным, В.П.Саранцевым способ ускорения электронно-ионных колец в сильных электрических полях, превышающих предельно допустимое значение ^{/17/}. Для этого в области ускоряющего зазора необходимо создать нарастающее ведущее магнитное поле, которое затем спадает до номинальной величины в пространстве дрейфа. Предложенный способ позволяет реализовать равномерное ускорение ионов. Способ использовался в ускоряющих системах модели коллективного ускорителя и Кольцетрона. Дрейфовые участки в таких системах позволяют использовать фокусирующую систему типа "беличье колесо".

Дается описание индукционной ускоряющей системы прототипа КУТИ. С целью сокращения сроков разработки и материальных затрат при создании установки была использована имеющаяся в наличии секция ЛИУ-3000. Реконструкция фокусирующей системы и модуляторов ускорителя позволила увеличить индукцию магнитного поля до $1,5-2$ Т, а суммарное ускоряющее напряжение до 600 кв. После оптимизации режимов ускоряющих систем получены следующие параметры ионного пучка: набор энергии в магнитной ускоряющей системе до $3,2$ МэВ/нукл.; набор энергии в индукционной ускоряющей системе с электрическим полем $E_{вн} \approx 5$ кв/см, $\Delta \mathcal{E} \sim 0,8$ МэВ/нукл., число ускоренных ионов $6 \cdot 10^{11}$ для ионов азота и кислорода и $2 \cdot 10^{11}$ для ксенона^{/14/}. Внешний вид линейного индукционного ускорителя электронных колец приведен на рис.8.



Рис. 8. Линейный индукционный ускоритель электронных колец прототипа КУТИ ОИЯИ.

Запуск прототипа КУТИ ОИЯИ с магнитной и электрической ускоряющими системами и получение параметров пучка, близких к расчетным: энергия ионов до 4 МэВ/нукл., число ионов $6 \cdot 10^{11}$ для легких элементов и $2 \cdot 10^{11}$ для тяжелых - подтверждает правильность теоретических предпосылок, принятых при проектировании ускорителя. Экспериментально доказана возможность создания коллективного ускорителя тяжелых ионов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Разработан и налажен прототип коллективного ускорителя тяжелых ионов (КУТИ) с параметрами: энергия ионов до ~ 4 МэВ/нукл., интенсивность $\sim (2+6) \cdot 10^{11}$ ионов в электронном кольце.

Экспериментально подтверждены возможности получения интенсивных электронных колец с электрическим полем до 500 кв/см и ускорения

самофокусирующихся электронно-ионных колец в электрическом и градиентном магнитном полях.

2. Создан наносекундный линейный индукционный ускоритель СИЛУНД-инжектор прототипа КУТИ с параметрами: энергия электронов 1,8+2,4 МэВ, ток пучка 500+700 А, длительность импульсов тока и ускоряющего напряжения 20 нс. Минимальные значения энергетического разброса электронов и эмиттанса пучка, инжектируемого в Адгезатор, составляют: $\Delta \mathcal{E}/\mathcal{E} \approx \pm(1+3)\%$, $\mathcal{E} \approx 100$ мрад·см.

3. Разработан и введен в действие плазменный источник электронов для индукционного ускорителя СИЛУНД с параметрами: энергия электронов до 360 кэВ, ток пучка до 1 кА, длительность импульса тока 30+40 нс.

Эксперименты по формированию электронных колец показали, что основные характеристики пучка источника (величина тока, энергетический разброс, эмиттанс) удовлетворяют требованиям коллективного ускорителя.

4. На основании экспериментов и расчета фокусирующей системы СИЛУНДа показано, что для ограничения радиальных отклонений частиц пучка в пределах $z \approx 1,5+2$ см индукция продольного магнитного поля должна нарастать с ростом энергии от $B \approx 0,1$ Т (0,25 МэВ) в начале ускорителя до $B \approx 0,12-0,16$ Т (1,5-3 МэВ) в конце. Неоднородности индукции магнитного поля, приводящие к раскачке колебаний огибающей пучка и его когерентных колебаний, не должны превышать $\pm(10+15)\%$.

5. Осуществлены наладка и запуск линейного индукционного ускорителя СИЛУНД. Проведены исследования пучка в ускорительном тракте.

Экспериментально показано, что при наличии в частотной характеристике системы резонансных частот с периодом колебаний меньше длительности импульса тока могут возникать интенсивные потери пучка по тракту ускорителя. Частотные характеристики индукционной системы могут быть изменены соответствующим выбором конструкции диафрагм ускорительных трубок.

6. Предложена и реализована система инжекции и захвата интенсивного пучка электронов на равновесную орбиту в узкой металлической камере Адгезатора.

Проведен расчет устройства коррекции траектории пучка. Определены требования к параметрам устройства коррекции.

Осуществлены наладка и запуск системы инжекции и захвата интенсивного пучка.

величина устойчивого захваченного тока на равновесной орбите 35 см составляет 200+250 А. Полуразмер захваченного пучка $\alpha_{z,1} \approx \pm 2+2,5$ см.

Система захвата пучка позволяет проводить эксперименты по сжатию кольца в широком диапазоне параметров пучка и первой ступени Адгезатора.

7. Создан и налажен Адгезатор прототипа КУТИ. Адгезатор обеспечивает сжатие колец с числом электронов до $N_e \approx 10^{13}$ при энергетическом полуразбросе в пучке $\Delta \mathcal{E}/\mathcal{E} \approx 5\%$ до конечного среднего радиуса $R \approx 3,5+4$ см и конечных полуразмеров сечения $\alpha \approx 2+3$ мм. Экспериментально показано, что при формировании и сжатии электронных колец в узкопрофильной, цилиндрической камере из тонкой (0,5 мм) нержавеющей стали с вогнутыми сферическими боковыми стенками высокочастотные поля возмущений кольца подавлены, резистивная неустойчивость не возникает.

8. Проведены эксперименты по предварительному ускорению ионов электронными кольцами в градиентном магнитном поле ускоряющих соленоидов. Экспериментально показано, что ускорение ионов возможно в определенном диапазоне загрузок электронного кольца $\xi = AMN_i / (m\gamma N_e)$. Граница диапазона зависит от интенсивности электронов, размеров колец и градиентов магнитного поля.

Для прототипа КУТИ число ускоренных ионов азота составляет $6 \cdot 10^{11}$, число тяжелых ионов (Xe) - $2 \cdot 10^{11}$. Экспериментально измеренные темпы набора энергии достигают ~ 4 МэВ/нукл·м.

9. Экспериментально подтверждена возможность ускорения электронно-ионных колец в электрическом поле индукционного ускорителя.

При напряженности электрического поля $E_z \sim 5$ кВ/см темп набора энергии составляет $\sim 0,7$ МэВ/нукл·м.

Показана целесообразность согласования системы предварительного ускорения колец в градиентном магнитном поле с ускоряющей системой индукционного ускорителя. Отсутствие согласования приводит к уменьшению темпа ускорения в одной из систем или же к потере ионов.

10. Предложен способ фокусировки движущихся электронных колец цилиндрическими анизотропно-проводящими, диэлектрическими или магнитодиэлектрическими экранами. Анизотропность проводимости экранов реализуется в системах типа "беличье колесо".

11. Предложен способ ускорения электронно-ионных колец в сильных электрических полях, величина ускорения в которых превышает предельно допустимые значения. Предложенный способ позволяет реализовать равномерное ускорение ионов электронными кольцами в неоднородных по длине ускоряющей системы электрических полях без потери ионов.

Содержание диссертации отражено в следующих основных работах:

И. Г.В.Долбилев, И.Н.Иванов, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев, В.Ф.Шевцов. Фокусировка электронного кольца в коллективном линейном ускорителе ионов системой типа "беличье колесо". Препринт ОИЯИ, Р9-4737, Дубна, 1969; Труды УП Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. АН АрмССР, Ереван, 1970, с.535.

2. Г.В.Долбилов, А.Д.Коваленко, В.П.Саранцев. Исследование электронного источника с холодным катодом в режиме нейтрализации пространственного заряда. Труды симпозиума по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, Д9-6707, Дубна, 1972, с.18.
3. Г.В.Долбилов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев. Некоторые особенности работы холодного катода при высоких давлениях остаточного газа. Труды II всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., "Наука", 1970, т.1, с.117.
4. Г.В.Долбилов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев. Некоторые особенности работы холодного катода при низких давлениях. Журнал технической физики, 1972, т.42, вып.7, с.1492; Препринт ОИЯИ, Р9-5753, Дубна, 1971.
5. Л.С.Барабаш, Л.Н.Беляев, И.А.Голутвин, Г.В.Долбилов, И.Н.Иванов, В.Д.Инкин, А.Д.Коваленко, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев, В.А.Свиридов, И.М.Хохлов. О коллективном ускорителе тяжелых ионов Отдела новых методов ускорения ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
6. L.S.Barabash, I.A.Golutvin, G.V.Dolbilov, I.N.Ivanov, A.D.Kovalenko, V.G.Novikov, N.B.Rubin, E.A.Perelstein, V.P.Sarantsev, V.A.Sviridov. Present Performance of Collective Ion Acceleration in JINR. Proceedings IX International Conference on High Energy Accelerators. Stanford, 1974, p.318.
7. Н.И.Безнощенко, А.П.Беляев, Б.Г.Горин, В.В.Дмитриев, Г.В.Долбилов, Л.Н.Ионов, А.Д.Коваленко, Е.А.Колонато, А.И.Ладыгин, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, А.А.Фатеев, П.Ф.Черняев, А.С.Щеулин. Сильноточный индукционный линейный ускоритель. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", Москва, 1974, т.1, с.290.
8. В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.Н.Беляев, Л.С.Барабаш, Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Г.Радонов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин. Первый этап наладки прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов. Часть I. Сообщение ОИЯИ, Р9-10053, Дубна, 1976.
9. В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.Н.Беляев, Л.С.Барабаш, Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Г.Радонов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин. Первый этап наладки прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов. Часть II. Сообщение ОИЯИ, Р9-10054, Дубна, 1976.
10. Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.П.Саранцев, А.С.Щеулин. Система инжекции электронов ускорителя тяжелых ионов. Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения (Дубна, 1976). ОИЯИ, Д9-10500, Дубна, 1977, с.57.

11. В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.С.Барабаш, Г.В.Долбилов, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Г.К.Радонов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин. Изучение динамики электронного кольца на конечных радиусах сжатия в прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов. Сообщение ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.

12. В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.С.Барабаш, Л.Н.Беляев, Г.В.Долбилов, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн, Г.К.Радонов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин. Эксперименты по запуску прототипа коллективного ускорителя ОИЯИ. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Протвино, 1977), т.1, ИФВЭ, Серпухов, 1977, с.406.

13. Г.В.Долбилов, А.Д.Коваленко, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев. Электронная пушка с холодным катодом в режиме нейтрализации пространственного заряда как инжектор индукционного ускорителя. Тезисы II Симпозиума по сильноточной эмиссионной электронике. Изд-во ИОА СО АН СССР, Томск, 1975, с.76.

14. Г.В.Долбилов, В.И.Казака, И.В.Кожухов, Г.И.Коннов, А.К.Красных, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн, Г.К.Радонов, В.П.Саранцев, А.И.Сидоров, А.П.Сумбаев, В.А.Тимохин, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин. Ускорение электронно-ионных колец в электрическом поле. Сообщение ОИЯИ, Р9-12414, Дубна, 1979.

15. Г.В.Долбилов, В.И.Миронов, В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн, Г.К.Радонов, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин. Эксперименты по ускорению ионов азота в прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов ОИЯИ. Труды VI всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1976). Дубна, 1979, т.2, с.26;

Proceedings III International Symposium on Collective Methods of Acceleration. Laguna Beach, California, 1978, vol.2, p.83.

16. В.С.Александров, Г.В.Долбилов, И.В.Кузнецов, В.П.Разувакин, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, А.В.Черемухин, В.И.Шалыгин. Сепарация компонентов электронно-ионных колец и измерение характеристик ионных потоков на прототипе КУТИ. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-882, Дубна, 1983.

17. В.И.Бекслер, В.П.Саранцев, А.Г.Бонч-Осмоловский, Г.В.Долбилов, Г.А.Иванов, И.И.Иванов, М.Л.Ионович, И.В.Кожухов, А.Б.Кузнецов, В.Г.Маханьков, Э.А.Перельштейн, В.П.Рашевский, К.А.Решетникова, Н.Б.Рубин, С.Б.Рубин, П.И.Рыльцев, О.И.Ярковой. Коллективное линейное ускорение ионов. Атомная энергия, 1968, т.24, вып.4, с.317; Proceedings VI International Conference on High Energy Accelerators, Cambridge, 1967, p.289.

Рукопись поступила в издательский отдел
II октября 1986 года.