

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А - 465

9 - 12935

АЛЕКСАНДРОВ

Владимир Семенович

**РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
И ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ**

Специальность 01.04.13 - электрофизика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1979

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук
кандидат технических наук

Э. А. Перельштейн
Л. С. Барабаш

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

В. В. Кольга
В. К. Плотников

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Радиотехнический институт АН СССР (Москва).

Защита диссертации состоится " " _____ 19 ____ года
в _____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 19 ____ года.

Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

Батусов Ю. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

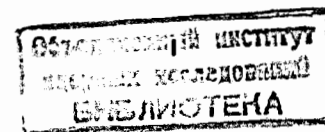
Актуальность проблемы. В настоящее время наряду с работами по развитию классических ускорителей, в которых заряженные частицы ускоряются внешними электромагнитными полями, широкое распространение получают исследования в области новых методов ускорения, использующих собственные поля сгустков заряженных частиц или плазмы. Перспективным представляется коллективный метод ускорения ионов электронными кольцами. Эксперименты по ускорению ионов гелия и азота на коллективном ускорителе тяжелых ионов (КУТИ) ОИЯИ и протонов на установке "Шуко" (ФГТ) позволяют рассчитывать на получение с помощью коллективного метода ускоренных ионов тяжелых элементов (вплоть до урана) при темпе ускорения $(1+5) \text{ МэВ/нуклон}\cdot\text{м}$. Опыт работы с коллективными ускорителями показывает, что для формирования высокоинтенсивных электронных колец необходимо использовать адгезаторы с металлическими камерами, экранирующими собственные ВЧ-поля кольца и прозрачными для ведущего импульсного магнитного поля.

Цель работы. Целью диссертационной работы является создание методики расчета магнитной системы и формирования импульсного магнитного поля КУТИ с узкой тонкостенной металлической камерой.

Научная новизна. В работах /1-10/, составивших основу диссертации, изложены особенности проведенного впервые расчета магнитной системы и формирования импульсного магнитного поля коллективного ускорителя с узкой тонкостенной металлической камерой, предназначенного для получения высокоинтенсивных электронных колец; предложены методы расчета магнитной системы сжатия и ускоряющей магнитной системы и метод учета искажений магнитного поля многовитковыми разомкнутыми катушками; даны рекомендации по настройке режимов сжатия и вывода; сформулированы требования к конструкции камеры и магнитному полю.

Практическая ценность. 1. Предложенные методики расчета магнитной системы и формирования магнитного поля, а также созданный комплекс программ могут быть использованы в ускорительной технике при создании коллективных ускорителей с тонкостенными металлическими камерами.

2. Предложенные и примененные в диссертационной работе методики и комплекс программ использованы при создании КУТИ ОИЯИ,



а также при выборе режимов работы магнитной системы на этапе наладки ускорителя.

Апробация работы. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на Симпозиуме по коллективным методам ускорения (Дубна, 1972 г.), IV Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1974 г.), Всесоюзном совещании по программированию и математическим методам решения физических задач (Дубна, 1977 г.), а также на семинарах ОНМУ ОИЯИ и ИТЭФ.

Публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в ЖТФ, трудах симпозиума и конференций, а также в виде сообщений ОИЯИ.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 120 страницах машинописного текста и иллюстрируется 61 рисунком на 33 страницах и 5 таблицами на 4 страницах. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы из 65 наименований.

К защите представляются следующие тезисы:

1. Материал камеры и частоту ω изменения магнитного поля необходимо выбирать из условия $\omega \frac{2R^2 h}{c^2} \ll 1$, где h и R — проводимость и толщина стенок камеры, R — характерный размер (радиус камеры, катушек магнитной системы и т.п.).

2. Конструкция камеры не должна содержать элементов, которые могут вносить большие искажения формы импульса магнитного поля: фазовый сдвиг $\omega \tau \sim 1$, "подсадка" амплитуды $\Delta B/B \sim (\omega \tau)^2 \sim 1$.

3. Сформирована n -траектория (значения показателя спада на радиусах кольца) в экранированной камерой магнитном поле с учетом фазового сдвига и "подсадки" амплитуды магнитного поля.

4. Искажения n -траектории, вносимые многовитковыми разомкнутыми катушками системы сжатия, могут быть уменьшены до допустимых значений подходящим выбором формы поперечного сечения катушек.

5. Магнитная система сжатия позволяет производить перестройку режимов сжатия для широкого диапазона параметров колец.

6. Выбранная магнитная система сжатия обеспечивает устойчивое сжатие электронных колец с начальными параметрами: число электронов $N_0 = (1-5) \cdot 10^{13}$, относительная энергия электронов $\Delta E/E = 4-7$, полуразброс по энергиям $\Delta E/E = 3-5\%$ — до конечных размеров: радиус $r = 3,5-4,5$ см, полуразмеры поперечного сечения $a_x \approx a_z = 0,15-0,2$ см.

7. Выбранная ускоряющая магнитная система обеспечивает ускорение электронно-ионных колец до энергий ионов:

$$\Delta E \lesssim 0,9+4,5 \text{ МэВ/нуклон } (Z/A = 0,1, \quad AN_i \geq (2,5+3,8) \cdot 10^{13}),$$

$$\Delta E \lesssim 3+15 \text{ МэВ/нуклон } (Z/A = 1/3, \quad AN_i \geq (8+11) \cdot 10^{12}),$$

$$\Delta E \lesssim 9+45 \text{ МэВ/нуклон } (Z/A = 1, \quad N_i \geq (2,5+3,6) \cdot 10^{12}),$$

(Z и A — заряд и массовое число иона, N_i — количество ионов).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены основные принципы коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами, являющегося одной из реализаций предложений В.И.Векслера; проведен обзор параметров электронных колец, полученных на коллективных ускорителях с импульсным магнитным полем; анализируются возможности формирования высокоинтенсивных электронных колец в металлической камере с выбранными параметрами, такими, как форма, материал и другие, с точки зрения устойчивости когерентных колебаний $^{1,2/}$; сформулированы основные вопросы, исследуемые в диссертации.

В первой главе рассматриваются особенности формирования импульсного магнитного поля в узкой тонкостенной металлической камере с расположенными снаружи многовитковыми катушками — источниками магнитного поля.

Изложен метод расчета экранированных квазистационарных магнитных полей (авторы: Ю.И.Алексахин, Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн и Э.В.Колесников), аппарат которого использован в диссертации, рассмотрены основные эффекты экранирования, приведены приближенные формулы, позволяющие производить предварительные оценки.

Металлическая камера экранирует внешнее магнитное поле, сжимающее электронное кольцо, что накладывает ограничение на допустимую частоту изменения магнитного поля. Это ограничение вытекает из требования малости фазовых искажений магнитного поля в камере:

$$\omega \tau \ll 1, \quad (1)$$

где τ — характерное время проникновения магнитного поля в камеру. Экспериментальное изучение особенностей формирования импульсных магнитных полей в металлических камерах проводилось на макете магнитной системы КУТИ ОИЯИ для двух типов камер адгезатора со сферическими стенками $^{3/}$. Стенки камер были изготовлены из листовой нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Первая камера имела обечайку толщиной 2 мм и 2 кольца сечением $\sim 400 \text{ мм}^2$ для увеличения жест-

кости конструкции, изготовленные также из нержавеющей стали. Толщина обечайки второй камеры составляла 0,5 мм. Относительная ошибка измерения напряженности магнитного поля не превышала 1%.

Проведенные измерения позволяют сделать вывод о пригодности тонкостенной камеры (без колец жесткости) для формирования импульсного поля с длительностью импульса $T_{и} \geq 1,5$ мс ($\omega \approx 2 \cdot 10^3$ с⁻¹). Фазовые искажения импульса магнитного поля $\varphi_B \approx \omega t$ не превышают 0,2-0,3, уменьшение амплитуды $\Delta B/B \lesssim 0,1$. Применение массивных металлических колец для увеличения жесткости конструкции камеры недопустимо, т.к. это приводит к значительному искажению формы импульса магнитного поля в широкой области радиусов ($\varphi_B/\omega \sim 0,5 T_{и}$, $\Delta B/B > 0,3$). Частота следования импульсов для выбранного варианта камеры при рабочих параметрах магнитной системы (запасаемая энергия ≈ 50 кДж) не должна превышать 1 Гц. При частотах ≥ 1 Гц необходимо предусматривать систему теплоотвода.

Магнитное поле в адгезаторе создается парами многовитковых катушек с импульсными токами (ступенями сжатия), включающимися в определенной последовательности в различные моменты времени. При этом в разомкнутых катушках индуцируются вихревые токи, которые могут приводить к искажениям магнитного поля и его градиентов. Для учета таких искажений в работе Л.Дж.Ласлета и У.А.Перкинса использовался метод, требующий предварительных магнитных измерений. В диссертации предложен метод расчета искажений, вносимых в импульсное магнитное поле разомкнутыми катушками, обеспечивающий достаточно хорошую точность для катушек с большим числом витков^{4/}. Получены выражения для плотностей индуцированных в витках катушки B_r и B_z - компонентами магнитного поля токов $j_B^{(r)}$ и $j_B^{(z)}$. Амплитуда наведенных токов пропорциональна $\omega t / \sqrt{1 + (\omega t)^2}$, ее максимальное значение достигается при $\omega t \gg 1$, т.е. когда активное сопротивление пренебрежимо мало по сравнению с индуктивным. Найденное значение "времени проникновения" τ приблизительно на порядок меньше "скинового времени", что является следствием антисимметричного распределения тока по сечению проводника. Получено выражение для поправок к компонентам магнитного поля и его градиентам. В случае, когда расстояние между витками невелико по сравнению с их поперечными размерами, вклады от токов во внутренних витках взаимно компенсируются. Величина искажения определяется токами, текущими по поверхности катушки, и пропорциональна размерам ее поперечного сечения. В частности, для катушек III ступени (рис.1) $B_z \gg B_r$

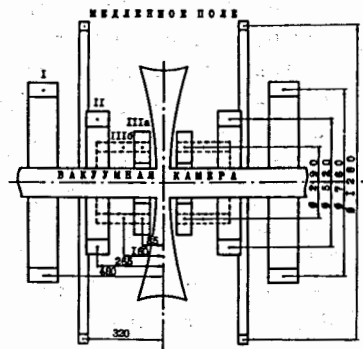


Рис.1. Схема расположения катушек.

Рис.2. Расчетные искажения n -траектории в поле I ступени: кривая 1 - геометрия IIIa, кривая 2 - геометрия IIIб. Точками показаны измеренные значения для геометрии IIIa.

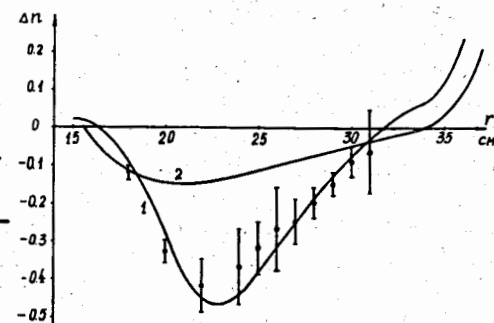


Таблица I. Параметры выбранной магнитной системы сжатия.

	медленное поле	I ступень	II ступень	III ступень а	III ступень б
Средний радиус (см)	64	38	26	14,5	14
Расстояние от медианной плоскости (см)	±32	±48	±24±29	±8±10	±16
Количество витков (в катушке)	6	28	48	70	68
Индуктивность ступени (мГ)	0,23	1,8	3,3	2,6	1,8
Резонансная частота (с-1)	200+300	$2,5 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
Амплитуда ($I_{in}=5$) тока (кА) ($I_{in}=7$)	2,75 4,19	5 5	4,3 5	4 5	6 7,5
Радиус перехвата (см)	36	36	27+29	10+11	10+11

(т.е. $j_0(z) \gg j_0(r)$), и величина искажения пропорциональна радиальному размеру катушки. На рис.2 показаны искажения показателя спада n , вычисленные на равновесных радиусах электронного кольца для двух вариантов геометрии катушек III ступени (а и б, рис.1). Там же точками показаны измеренные значения n для геометрии варианта (а).

Во второй главе рассмотрены особенности расчета магнитной системы сжатия интенсивных электронных колец в адгезаторе с узкой тонкостенной металлической камерой, предложен метод расчета ^{15,6/} приведены результаты измерения и формирования магнитного поля ^{17/}, даны рекомендации по способам перестройки режимов сжатия, обсуждаются результаты экспериментов по сжатию электронных колец с помощью рассчитанной магнитной системы.

Для адгезатора КУТИ выбрана узкая камера из листовой нержавеющей стали толщиной 0,5 мм с апертурой, изменяющейся примерно пропорционально радиусу. В качестве системы, создающей магнитное поле, рассматривался вариант из трех ступеней сжатия, каждая из которых уменьшает радиус кольца примерно вдвое, и пары катушек медленного (незначительно изменяющегося за время сжатия) поля. Импульсы токов в каждой ступени формируются в LC-контуре, образованном индуктивностью ступени и накопительной емкостью системы питания, и имеют вид полусинусоид длительностью более 1 мс и амплитудой до 6 кА при напряжении на емкости, не превышающем 30 кВ. Время сжатия кольца, определяемое длительностями и амплитудами токов в ступенях, составляет по порядку величины 10^{-3} с.

Металлический вариант камеры усложняет расчет магнитной системы сжатия по сравнению с непроводящим вариантом. Большие трудности может вызвать зависимость показателя спада от времени. Экранирование электрического поля электронного кольца близкими боковыми стенками камеры приводит к дефокусировке кольца в аксиальном направлении. Сдвиг квадратов безразмерных частот некогерентных бета-колебаний ν_r и ν_z за счет зарядового изображения для реальных параметров кольца может достигать величины 0,2-0,3 и должен быть скомпенсирован соответствующим увеличением показателя спада.

Рассчитывалась магнитная система, способная обеспечить формирование электронных колец с параметрами, пригодными для ускорения многозарядных ионов в спадающем магнитном поле. На длине ускорения 1 м должна приобретаться энергия 1-10 МэВ/нуклон ($Z/A = 0,1$). В зависимости от энергии инжектируемых электронов рассматривались

следующие диапазоны параметров колец:

$$\left. \begin{array}{l} \delta_{in} = 7, \\ \delta_{in} = 5-6, \\ \delta_{in} = 4, \end{array} \right\} \begin{array}{l} N_e = (3-5) \cdot 10^{13} \\ N_e = (2-3) \cdot 10^{13} \\ N_e = (1-2) \cdot 10^{13} \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \Delta \mu / \mu = 3-5\%, \\ \text{эммиттанс } I_z = 7 \cdot 10^{-2} \text{ см.мрад.} \end{array} \right\}$$

Большой разброс по числу электронов и их начальной энергии закладывался в схему расчетов для того, чтобы система сжатия могла работать в широком диапазоне параметров колец.

При выборе магнитной системы исходными являлись следующие требования: а) при сжатии электронного кольца не должен проходить параметрический резонанс для аксиальных колебаний, и, кроме того, величина ν_z должна быть ограничена снизу в соответствии с ограниченностью a_z апертурой камеры; б) показатель спада медленно меняющегося поля должен быть положителен для того, чтобы иметь возможность формировать кольцо в медленном поле и проводить измерения параметров инжектируемого пучка; в) система должна обеспечивать регулировку n -траектории в широких пределах путем изменения момента времени инжекции, моментов времени включения ступеней сжатия, амплитуд токов в них, расстояний катушек от медианной плоскости камеры.

При расчете учитывались: 1) искажение внешнего магнитного поля, вносимое камерой; 2) поля токов, индуцированных в витках разомкнутых катушек; 3) индуктивная связь между катушками; 4) собственные и отраженные камерой электрические и магнитные поля электронного кольца; 5) токи в стенках камеры, возникающие при инжекции пучка электронов.

Основным требованием являлось выполнение условия

$$n_{min}(r_0) < n(r_0) < n_{max}(r_0) \quad (2)$$

при фиксированном δ_{in} и вариации N_e для всех заданных наборов параметров колец. Здесь $n(r_0)$ - показатель спада, $n_{min}(r_0)$ - нижняя граница, которая определялась из равенства $\nu_z = 7 \cdot 10^{-2}$ для пучка с наибольшим числом частиц, $n_{max}(r_0)$ - верхняя граница, соответствующая параметрическому резонансу для пучка с наименьшим числом частиц. Кулоновский сдвиг резонансной частоты вводился в соответствии с результатами линейной теории (Л.Смит). Расчет выполнялся в два этапа. Сначала выбор геометрии ступеней сжатия производился по упрощенной схеме без учета искажений внешнего магнитного поля камерой и индуктивной связи между катушками. При этом уравнения, описывающие адиабатическое сжатие кольца в заданном магнит-

ном поле, решаются аналитически, что позволяет значительно упростить численные расчеты. Сдвиг частот бетатронных колебаний вводился с помощью приближенной формулы. Если ступени включаются в различные моменты времени, удобно выбирать параметры каждой последующей ступени при фиксированных параметрах предыдущих так, чтобы $n(r_0)$ удовлетворяли условию (2) в максимально широком интервале радиусов. Считая амплитуду тока в i -той ступени заданной и меняя радиус ступени R_i и расстояние от медианной плоскости Z_i , находим вариант, в котором $n(r_0)$ лежит в коридоре допустимых значений до наименьшего значения r - радиуса перехвата следующей ступени. Область изменения R_i и Z_i выбирается с учетом выполнения условия $\psi_B = \psi_{B'}$ в металлической камере вблизи радиусов перехвата, что гарантирует малость отличия $n(r_0)$ от показателя спада в свободном пространстве ($\psi_{B'}$ - фаза производной $\frac{\partial B_z}{\partial r}$). Для того, чтобы в реальной системе n -траектория мало отличалась от приближенной, моменты времени включения ступеней выбираются с учетом фазового сдвига импульса магнитного поля.

При таком выборе параметров n -траектория оказывается близкой к искомой, но часть ее может находиться вне коридора. Для коррекции n -траектории используются вариации амплитуд токов в ступенях, времени их включения и перемещение катушек в z -направлении. После окончательного выбора параметров магнитной системы по n -траектории определяются частоты бетатронных колебаний и малые размеры кольца.

Рассматривались 2 варианта катушек III ступени. Вариант (а) - с подавленными вихревыми токами (возникающими в разомкнутой катушке) за счет применения специальных проводников, вариант (б) - с уменьшением искажений до допустимых величин с помощью выбора соответствующей формы сечения катушки. В таблице I приведены параметры выбранной магнитной системы. Поведение среднего радиуса r_0 , относительной энергии электронов γ , магнитное поле вдоль траектории B_z и n -траектория для варианта (а) магнитной системы показаны на рис.3-4.

В главе II изложены также результаты магнитных измерений, приводится описание установки для магнитных измерений, состоящей из системы питания, импульсных катушек, формирующих магнитное поле в камере адгезатора, магнитометра и электронной аппаратуры, работающей на линии с ЭВМ М-6000. В процессе измерений снимались временные зависимости напряженности магнитного поля на различных

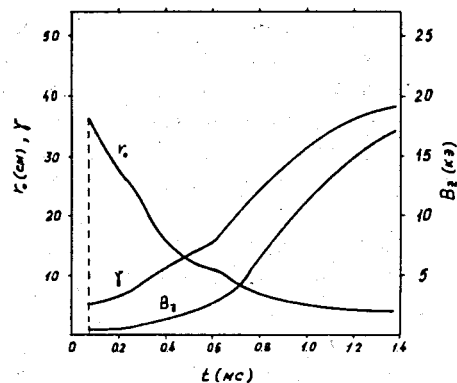


Рис.3. Графики $r_0(t)$, $\gamma(t)$, $B_z(t)$ для $\gamma_{in} = 5$, $N_e = 2 \cdot 10^{13}$.

Рис.4. n -траектория для $\gamma_{in} = 5$, $N_e = 2 \cdot 10^{13}$.

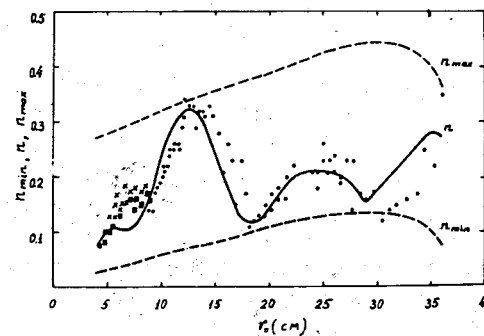
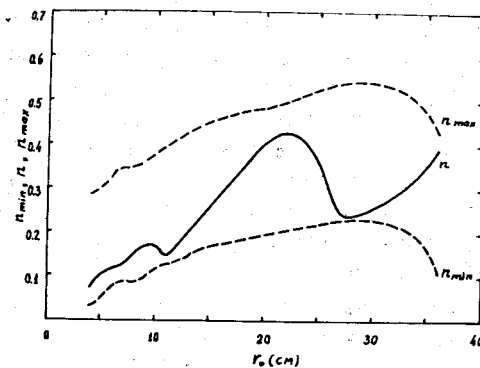


Рис.5. Сформированная n -траектория: сплошная кривая - расчет для $\gamma_{in} = 4,5$, $= 10^{13}$; измеренные значения: \bullet - $\gamma_{in} = 4,5$, \blacksquare - $\gamma_{in} = 4$, \times - $\gamma_{in} = 5$.

радиусах (шаг по r - 1 см, $\Delta t = 10$ мкс) и для различных значений азимута. Результатом обработки массивов являлись значения среднего магнитного поля (усредненного по площади орбиты заданного радиуса), равновесного времени и показателя спада. Относительная погрешность измерения мгновенных значений напряженности $(1+3) \cdot 10^{-3}$ позволяла находить $n(r)$ с относительной ошибкой $(1+3) \cdot 10^{-1}$. На рис.5 показаны расчетная и измеренная n -траектория для кольца с $\gamma_{in} = 4,5$, $N_e = 10^{13}$. Азимутальные измерения показали, что вблизи радиуса инжекции имеются отклонения от азимутальной симметрии порядка $2 \cdot 10^{-4}$, на конечных радиусах кольца - $(2-4) \cdot 10^{-3} H_z$.

Выборанная магнитная система позволяет в широких пределах варьировать n -траекторию. Грубая регулировка вблизи радиусов перехвата достигается изменением моментов времени включения соответствующих ступеней сжатия (для I ступени - моментом времени инжекции t_{in}), более тонкая регулировка - изменением расстояний катушек от медианной плоскости и амплитуд токов в них. В диссертации иллюстрируются возможности изменения n -траектории вариациями вышеуказанных параметров, описан способ, которым была проведена коррекция n -траектории для исключения развития параметрического резонанса вблизи радиуса инжекции. После проведения коррекции магнитного поля на прототипе КУТИ ОИЯИ достигнуты следующие значения параметров электронных колец в конце сжатия: $N_e \approx 10^{13}$, $\alpha_n \approx \alpha_{\text{ф}}$ 1,5+2 мм, $r \approx 4$ см.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с созданием ускоряющей магнитной системы КУТИ.

В основу схемы расчета ускоряющей магнитной системы /8/ положена связь между предельно допустимым набором энергии на единицу длины ускорения и интенсивностью ускоряемых ионов. Проведено обоснование сделанных допущений, касающихся выбора коэффициента запаса, зарядности ионов, изменения размеров электронного кольца при загрузке его ионами, выбора градиентов ускоряющего магнитного поля. Рассмотрена магнитная система, состоящая из двух катушек последней ступени сжатия и ускоряющего соленоида (рис.7). Для вывода электронно-ионного кольца из медианной плоскости камеры адгезатора рассчитана схема с шунтировкой тока в одной из катушек. Рассчитан четырехслойный соленоид с последовательно-параллельным соединением слоев, обеспечивающий оптимальные условия вывода и ускорения. Требуемые градиенты $\frac{1}{B_z} \left| \frac{\partial B_x}{\partial z} \right| = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ получены путем удаления определенных витков из равноплотной обмотки соленоида постоянного радиуса.

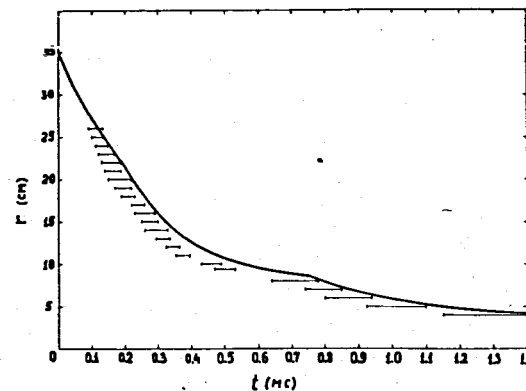


Рис.6. Радиус электронного кольца как функции времени: кривая I - расчет для $\gamma_{in} = 4,5$, $N_e = 10^{13}$; отрезками показаны длительности импульсов γ -излучения.

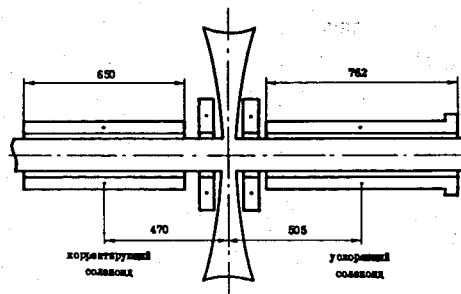
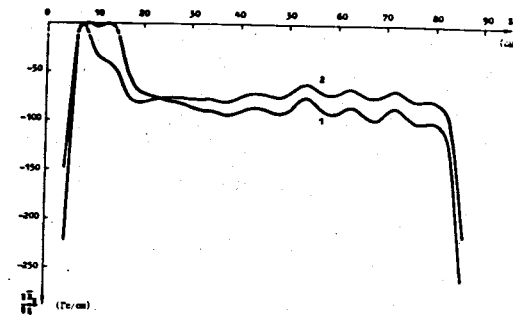


Рис.7. Схема расположения ускоряющей магнитной системы адгезатора.

Рис.8. Распределения $\frac{\partial B_x}{\partial z}(z)$ в момент снятия ямы t_y на конечных радиусах кольца: $r = 4,5$ см ($E_{in} = 3$ МэВ) - кривая 1, $r = 4,2$ см ($E_{in} = 2,2$ МэВ) - кривая 2.



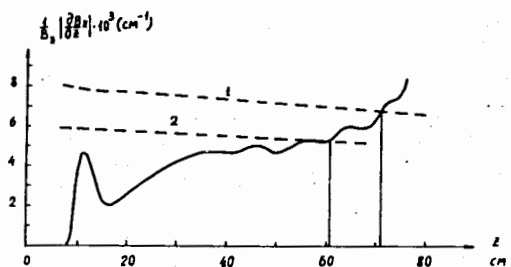


Рис.9. Относительные градиенты, сопутствующие электронно-ионному кольцу при ускорении - сплошная кривая, пунктир I - максимально допустимые градиенты для $a_r = a_z = 1,5$ мм, пунктир 2 - для $a_r = a_z = 2$ мм. $\gamma_{in} = 4,5$, $N_e = 10^{13}$, $N_i = 6,5 \cdot 10^{11}$.

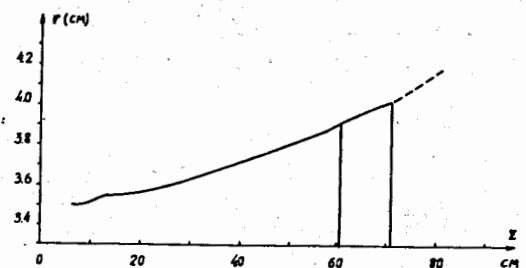


Рис.10. Изменение среднего радиуса кольца при ускорении ($\gamma_{in} = 4,5$).

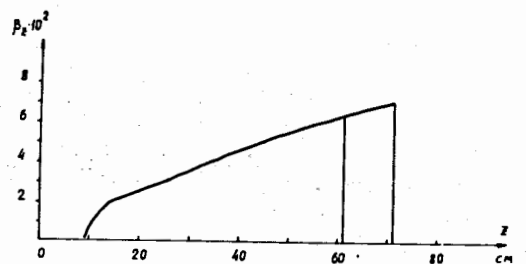


Рис.11. Изменение аксиальной скорости кольца при ускорении. $\gamma_{in} = 4,5$, $N_e = 10^{13}$, $N_i = 6,5 \cdot 10^{11}$. ($\beta_z = \dot{z}/c$)

Режим вывода рассчитывался сначала без учета связей между катушками и искажений магнитного поля, вносимых камерой. Необходимые соотношения между токами в катушках и соленоиде выбирались из условия $B_r > 0$ вблизи конечного радиуса кольца (4+4,5) см. Затем устанавливались амплитуды токов и момент времени шунтировки. Окончательная коррекция параметров магнитной системы проводилась при численном моделировании процессов вывода и ускорения. Приведены параметры рассчитанной магнитной системы, пригодной для ускорения ионов до энергий $(9+45) \cdot Z / A$ МэВ/нуклон, и результаты численного моделирования процесса ускорения. На рис.8 показаны расчетные распределения $\frac{\partial B_z}{\partial z}(z)$ на конечных радиусах кольца в момент t_y снятия магнитной потенциальной ямы.

Целью магнитных измерений [9] являлось исследование зависимости распределения магнитного поля на участке вывода от параметров магнитной системы, выбор режима вывода, в котором градиенты не превышают расчетных, выявление азимутальных неоднородностей на выводном участке, выявление и коррекция искажений медианной плоскости магнитного поля, вносимых полями вихревых токов, индуцированных в разомкнутом соленоиде. В результате магнитных измерений установлено, что градиенты на участке ускорения соответствуют расчетным. Для компенсации искажений магнитного поля, вносимых обмоткой разомкнутого соленоида, в диапазоне радиусов 25+36 см можно использовать пассивный (короткозамкнутый) корректирующий соленоид (рис.7).

Показано, что при определенных соотношениях параметров магнитной системы можно реализовать 2 качественно различных режима вывода. Предложен способ настройки требуемого режима. Результаты экспериментов по ускорению ионов азота на прототипе КУТИ ОИЯИ: конечная энергия ускоренных пятизарядных ионов азота ≈ 2 МэВ/нуклон и интенсивность $N_i \approx 5 \cdot 10^{11}$ ионов в цикле - хорошо согласуются с результатами моделирования процесса ускорения на ЭВМ: энергия 1,9+2,3 МэВ/нуклон, $N_i = (5-6) \cdot 10^{11}$. Результаты моделирования: относительные градиенты, сопутствующие кольцу при ускорении, изменение среднего радиуса и аксиальной скорости кольца - показаны на рис. 9-11. Пунктирными линиями показаны предельные градиенты для $a_r = a_z = 0,15$ (кривая I) и $a_r = a_z = 0,2$ см (2) ($N_e = 10^{13}$).

В приложении содержится краткое описание программ, реализующих моделирование процессов сжатия, вывода и ускорения на ЭВМ класса БЭСМ-6, и приведен их текст на языке ФОРТРАН [10]. Программы

объединены в 2 пакета: пакет OPT, используемый при расчете магнитной системы сжатия, и пакет EXODUS, используемый при расчете ускоряющей магнитной системы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании результатов магнитных и температурных измерений сформулированы требования, предъявляемые к конструкции камеры адгезатора, сделан выбор варианта конструкции камеры КУТИ ОИЯИ и определены предельно допустимая длительность импульса магнитного поля и максимальная частота следования импульсов.

2. Предложен метод учета искажений, вносимых в импульсное магнитное поле многовитковыми разомкнутыми катушками, дающий хорошее совпадение с результатами проведенных магнитных измерений.

3. Предложен метод расчета многоступенчатой магнитной системы сжатия интенсивных электронных колец коллективного ускорителя ионов с узкой тонкостенной металлической камерой. При расчете учитываются искажения, вносимые в импульсное магнитное поле камерой, а также собственные и отраженные камерой электрическое и магнитное поля кольца.

4. Выбраны градиенты и предложена схема расчета ускоряющей магнитной системы и способ реализации требуемых градиентов в соленоиде постоянного радиуса с постоянным шагом намотки.

5. Созданы программы на языке ФОРТРАН, реализующие моделирование процессов сжатия, вывода и ускорения интенсивных электронных колец на ЭВМ класса БЭСМ-6.

6. Рассчитана магнитная система коллективного ускорителя тяжелых ионов ОИЯИ, пригодная для формирования электронных колец с $N_e \approx 10^{13}$, $r \approx 4$ см, $a_r \approx a_z = 0,15-0,2$ см и ускорения электронно-ионных колец до энергий ионов $(9+45) \cdot Z/A$ МэВ/нуклон.

7. Сформировано магнитное поле в медианной плоскости камеры ускорителя и на участке вывода - ускорения. Результаты магнитных измерений находятся в хорошем согласии с результатами расчетов.

8. Проведен анализ возможностей магнитной системы для настройки режимов сжатия и вывода электронных колец. Установлено, что выбранная магнитная система позволяет осуществлять два качественно отличных режима вывода.

9. Проведено сравнение результатов расчетов с данными по сжатию электронных колец и ускорению ионов азота в прототипе КУТИ ОИЯИ.

Содержание диссертации отражено в следующих основных работах:

1. Александров В.С., Алексахин Ю.И., Новиков В.Г., Перельштейн Э.А., Саранцев В.П. В кн.: Симпозиум по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, Д9-6707, Дубна, 1972, с.12.
2. Александров В.С. и др. В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, II, с.279.
3. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-7778, Дубна, 1974.
4. Александров В.С. и др. ЖТФ, 1977, 47, с.1822. ОИЯИ, Р9-9603, Дубна, 1976.
5. Александров В.С., Алексахин Ю.И., Казаринов Н.Ю., Новиков В.Г., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. ОИЯИ, Р9-9091, Дубна, 1975.
6. Александров В.С., Алексахин Ю.И., Казаринов Н.Ю., Новиков В.Г., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. ОИЯИ, Р9-0215, Дубна, 1975.
7. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-8753, Дубна, 1975.
8. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-10118, Дубна, 1976.
9. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-11663, Дубна, 1978.
10. Александров В.С., Алексахин Ю.И., Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А., Шинов Б.Г. В кн.: Труды Всесоюзного совещания по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10, II-11264, Дубна, 1978, с.317.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 ноября 1979 года.