

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Д, 361

На правах рукописи

УДК 621.384.64

9-87-851

ДЕРЕНДЯЕВ
Юрий Сергеевич

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ДВУХМЕРНОЙ КОНФИГУРАЦИИ
В ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

Научный руководитель: кандидат физико-математических
наук А.Б.Кузнецов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических
наук В.В.Кольга
кандидат физико-математических
наук А.В.Агафонов

Ведущее предприятие: Институт прикладной физики
Академии наук СССР, г.Горький

Защита состоится " " _____ 1988 г. в _____ час
на заседании специализированного совета К-053.03.07 в Московском
инженерно-физическом институте по адресу:
ИИ5409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Просим прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный
печатью организации.

Желающих принять участие в работе совета просим звонить по
телефону 324-84-98.

Автореферат разослан " " _____ 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета  Б.Ю.Богданович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современное развитие науки и техники (ядерной физики, радиационного материаловедения, ускорителей частиц) требует разработки ускорителей для получения интенсивных пучков ускоренных ионов с энергией от десятков МэВ до одного ГэВ на нуклон. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами - новый эффективный метод ускорения, который в принципе позволяет получать пучки ионов различных элементов от водорода до урана. Коллективный ускоритель, в котором получают и ускоряются электронные кольца, нагруженные ионами, представляет собой систему с электромагнитными полями сложной конфигурации, переменными во времени. Анализ работы таких систем и выбор оптимальных параметров и режимов работы требует разработки новых и усовершенствования старых методов решения задач электродинамики с использованием ЭВМ. Все более широкое распространение находят методы решения задач электродинамики на ЭВМ в диалоговом режиме с использованием дисплеев.

Диссертационная работа посвящена анализу электромагнитного поля и оптимизации его источников в коллективном ускорителе и ему подобных сложных электромагнитных системах. Разработка средств и методов автоматизированного оперативного анализа результатов расчетов на дисплее в режиме диалога с ЭВМ направлена на решение проблемы повышения эффективности и качества работы при проектировании сложных электромагнитных систем.

Целью диссертации является анализ электромагнитного поля и оптимизация (синтез) его источников в сложных электрофизических установках: сильноточном линейном индукционном ускорителе электронов; адгезаторе модели коллективного ускорителя с внутренними стенками, экранирующими от переменных магнитных полей и давления остаточного газа; в системе "зеркального захвата", осуществляющей устойчивое удержание релятивистского электронного кольца на равновесной орбите с последующим сжатием; источнике многозарядных ионов в области его электронного коллектора; напылителе тонких пленок равномерной толщины из сверхпроводника; источнике электронов для поверхностной закалки металлов, дающем пучки электронов с изменяемой интенсивностью. Целью диссертации являлось также разработка, создание и введение в эксплуатацию комплекса программ ANALYZ, DSELECT, DISELPT, DIKIK, позволяющего на различной стадии проектиро-

вания сложных электромагнитных систем применять ЭВМ в диалоговом режиме с использованием дисплея.

Научная новизна работ. Впервые решен ряд проблем, связанных с проектированием коллективного ускорителя тяжелых ионов. В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Оптимизированы параметры электромагнитных систем в режиме диалога с ЭВМ сильноточного линейного индукционного ускорителя электронов и установки для нанесения тонких пленок.

2. Спроектирована конструкция адгезатора с внутренними экранящими стенками, рассчитана магнитная система устойчивого сжатия и вывода кольца в модели коллективного ускорителя с учетом вихревых токов.

3. Теоретически доказана возможность компрессии релятивистского пучка электронов с током 20 кА в системе "зеркального захвата", рассчитана геометрия экрана и магнитная система для устойчивого захвата и сжатия кольца.

4. Спроектирован источник электронов для закалки металлов с регулируемой интенсивностью электронов на выходе.

5. Разработан и внедрен в эксплуатацию набор программ для анализа и синтеза сложных электромагнитных систем на удаленной дисплейной станции, включающей в себя программы расчета двумерных электромагнитных полей, траекторий электронно-ионного пучка с учетом пространственного заряда, функции, зависящей от 1 до 18 параметров, и вывода результатов на дисплей для анализа.

6. Создана программа на Фортране для расчета наведенных вихревых токов в массивных аксиально-симметричных проводниках произвольного поперечного сечения, расчеты проверены экспериментально по измерениям магнитного поля.

7. Применен метод Монте-Карло для грубого поиска параметров магнитной системы, обеспечивающей устойчивое сжатие электронного кольца.

Практическая ценность. Разработанный, созданный и введенный в эксплуатацию комплекс программ и методик, а также проведенные исследования позволяют на различной стадии проектирования сложных электромагнитных систем применять ЭВМ в диалоговом режиме через дисплей, что на порядок увеличивает производительность труда.

На основе проведенных расчетов созданы также сложные системы: адгезатор модели коллективного ускорителя и магнитная система вывода электронных колец из него, напылитель тонких пленок, источ-

ник электронов для закалки металлов. В результате оптимизации геометрической формы диафрагм в секции сильноточного линейного индукционного ускорителя электронов, проведенной автором диссертации, существенно улучшена электромагнитная система ускорителя. Проведенные автором исследования показывают осуществимость компрессии электронного пучка в присутствии короткозамкнутого, хорошо проводящего экрана. Предложенный автором метод расчета вихревых токов позволяет вычислять распределение токов в поперечном сечении проводов, индуктивно связанных между собой катушек с током и искажения магнитного поля этих катушек, обусловленные неравномерностью распределения тока по поперечному сечению проводов.

Результаты работы нашли применение в ряде институтов при разработке сложных электрофизических установок, например в Горьковском Институте прикладной физики АН СССР, в Ленинградском Политехническом институте, в Софийском Институте ядерных исследований и ядерной энергетики.

Апробация работ. Результаты работы автора, связанные с анализом и синтезом электромагнитных полей сложной двумерной конфигурации в различных электрофизических установках, докладывались и обсуждались на научных семинарах Отдела новых методов ускорения и Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), Горьковского Института прикладной физики Академии наук СССР, IV Чехословацкой конференции по тонким пленкам, V Всесоюзном совещании по методам расчета электронно-оптических систем, Всесоюзном совещании по программированию и математическим методам решения физических задач, всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, симпозиумах по коллективным методам ускорения.

Публикации. Результаты диссертационных исследований нашли отражение в 29 публикациях в научных отечественных и зарубежных журналах, а также в виде сообщений ОИЯИ. Девятнадцать из них составили основу диссертации.

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы 133 страницы: машинописный текст с 40 рисунками на 103 страницах; 18 подпрограмм на 30 страницах; список литературы из 71 наименования на 7 страницах.

Автор диссертации представляет к защите:

1. Метод анализа и синтеза сложных электромагнитных систем

на ЭВМ с использованием дисплея, дающий возможность на экране дисплея в наглядной форме наблюдать исходные данные задачи и результаты расчета, организовывать поиск оптимальных параметров (исходных данных) в режиме активного взаимодействия исследователя с ЭВМ. На основе этого метода оптимизирована геометрия ускоряющих диафрагм в секции СИЛУНДа, что на порядок улучшило однородность электрического поля в сечении ускоряемого пучка; исследовано движение электронного пучка с учетом пространственного заряда в переменных электромагнитных полях; проведен анализ и синтез системы источника для нанесения тонких (5 мкм) пленок из сверхпроводника (ниобий-титан), углерода, урана и т.д. на подложки большой площади ($0,25 \text{ м}^2$) из металлов и неметаллов (источник, в частности, используется при создании сверхпроводящих резонаторов с частотой до 500 МГц и добротностью до $2 \cdot 10^8$); спроектирован и создается источник электронов с током 5 А для поверхностной закалки металлов с изменяемой в 2 раза интенсивностью пучка за счет изменения положения электродов или потенциалов на них.

2. Конструктивную схему камеры адгезатора модели коллективного ускорителя ионов с внутренними экранирующими стенками и магнитной системы сжатия и вывода кольца с учетом вихревых токов, которая обеспечивает устойчивое сжатие $N = 10^{13}$ электронов в кольце с относительной энергией электронов $\gamma = 4$ от радиуса 0,36 м до радиуса 0,04 м и поперечными размерами выводимого кольца 0,001 м.

3. Результаты теоретических исследований системы зеркального захвата (магнитной системы и формы отражающего экрана), пригодной для получения электронных колец с током 20 кА и $\gamma = 5$ и последующей их компрессией в магнитном поле до $\gamma = 50$.

4. Новый метод и программа на Фортране для расчета вихревых токов, наведенных квазистационарным магнитным полем в массивных круговых проводниках с любой формой поперечного сечения.

5. Результаты оптимизации параметров магнитной системы вывода электронного кольца из адгезатора модели коллективного ускорителя путем решения нелинейной системы уравнений методом Монте-Карло и минимизации квадратичного функционала.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации изложены результаты теоретических исследований и расчетов по отдельным вопросам, связанным с созданием коллективных ускорителей и подобных сложных электрофизических уста-

новок. В работе проведен анализ и синтез электромагнитных полей сложной конфигурации в установках, например: напылитель тонких пленок; источник электронов для поверхностной закалки металлов; СИЛУНД; адгезатор; система зеркального захвата; электронно-лучевой источник многозарядных ионов. Целью анализа является вычисление электромагнитного поля и траекторий заряженных частиц в нем, когда заданы источники поля, а также влияние на электромагнитное поле и траектории частиц конструктивных изменений в рассматриваемой установке. Задача синтеза - это поиск оптимальных параметров установки, которые реализуют наперед заданное электромагнитное поле или траектории заряженных частиц. Анализ и синтез проводится на ЭВМ в режиме диалога с использованием дисплея.

При создании ускоряющей секции коллективного ускорителя на базе сверхпроводящих резонаторов одной из проблем является нанесение сверхпроводящей пленки на рабочую поверхность резонатора. На рис. 1 показана схема электронно-лучевой пушки испарителя для нанесения тонких пленок. Работа испарителя происходит следующим образом. Поток быстрых электронов 4 (с энергией 2-5 кэВ) с кольцевого катода 1 расплавляет исходный материал для пленки в аноде-титле 2 и ионизирует его атомы. Электростатическая линза 3 направляет полученные ионы 5 на поверхность резонатора 6. Ионы оседают на поверхности резонатора и образуют сверхпроводящую пленку. Качество напылителя пленки, ее равномерность существенно зависят от конфигурации фокусирующего поля. Анализ траекторий ионов, образующих пленку, позволил подобрать форму электродов и потенциалы на них, обеспечивающие равномерное покрытие напыляемой поверхности /1/.

Выбор материала сверхпроводящей пленки для резонатора ускоряющей секции является одной из самых сложных проблем. Это объясняется большими технологическими трудностями, которые необходимо преодолеть при изготовлении резонатора. Однако предварительный отбор сверхпроводящей пленки можно произвести, вычислив сопротивление пленки в полосковом резонаторе, изготовление которого не представляет труда. СВЧ - сопротивление исследовалось в двухсвязном полосковом резонаторе (рис. 2), в котором внешняя часть - обечайка 2 изготавливается из обычного проводника и только внутренний проводник - полоска 1 самой простой формы обладает сверхпроводящими свойствами /2/. Поверхностное сопротивление полоски, изготовленной из сверхпроводника с неизвестным поверхностным сопротивлением $R_{\text{пол}}$, вычислялось по формуле /2/

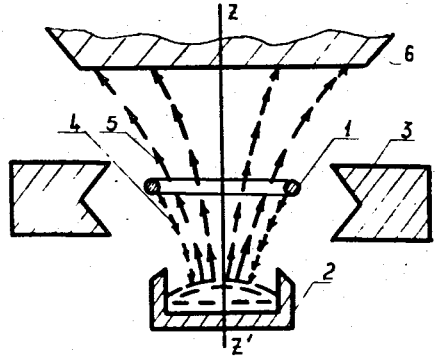


Рис.1. Схема электронно-лучевой пушки испарителя. 1 - катод; 2 - анод-тигель; 3 - электростатическая линза; 4 - поток электронов; 5 - поток ионов испаряемого материала; 6 - резонатор (пушка испарителя имеет ось вращения $Z-Z'$).

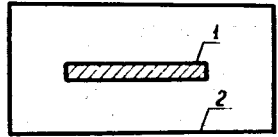


Рис.2. Полосковый резонатор: 1 - образец сверхпроводника (полоска); 2 - внешний проводник (обечайка).

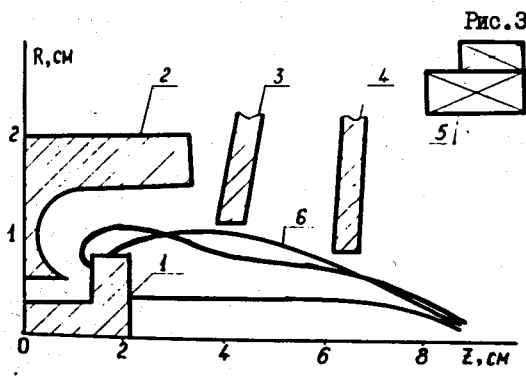
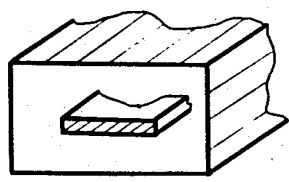


Рис.3. Схема электромагнитной системы: 1 - катод; 2 - отражающий электрод; 3 - первый анод; 4 - второй анод; 5 - соленоид; 6 - траектории электронов.

$$R_{non} = \frac{\omega}{Q} \int \frac{\mu \vec{E}^2 ds}{\oint \vec{E}^2 dl} - R_{os} \frac{\oint \vec{E}^2 dl}{\oint \vec{E}^2 dl} \quad (I)$$

Здесь R_{os} - поверхностное сопротивление обечайки, ω - собственная частота резонатора, Q - добротность, которая измеряется на опыте, l_{non} , l_{os} - периметры поперечного сечения полоски и обечайки соответственно, $\vec{E} = -grad \varphi$, где φ - решение граничной задачи для потенциала в резонаторе, μ - абсолютная магнитная проницаемость, S - площадь поперечного сечения резонатора. Точность определения СВЧ-сопротивления пленки будет определяться точностью расчетов распределения электромагнитного поля в полосковом резонаторе и соответствующих интегралов от этих полей, а также точностью измерения добротности.

В диссертации приведен расчет источника электронного пучка с изменяемой интенсивностью для поверхностной местной закалки различных металлов, эффект которой заключается в быстром и кратковременном разогреве поверхности с использованием электронных пучков. Для закаливания металлов, имеющих различную температуру плавления, на одной и той же установке желательно изменять мощность электронного пучка. Проведен анализ и синтез источника электронного пучка, в конструкции которого применен отражательный электрод, позволяющий изменять ток пучка в два раза. Электромагнитная система рассматриваемого источника схематически показана на рис. 3 /3/. Она состоит из накаливаемого катода 1 с температурой 2000 К и электрическим потенциалом $\varphi_1 = -150,0$ кВ, отражающего электрода 2 с потенциалом $\varphi_2 = \varphi_1 - 0,5$ кВ, двух анодов 3, 4 с потенциалами $\varphi_3 = \varphi_1 + 50$ кВ, $\varphi_4 = \varphi_1 + 150$ кВ и магнитной фокусирующей системы 5. Эмиттирующая поверхность катода позволяет получить суммарный ток 5,0 А. Аноды вытягивают и фокусируют электроны в цилиндрический пучок с током 2,5 А, а соленоид осуществляет дополнительную фокусировку и сжатие пучка. Все перечисленные элементы имеют аксиальную симметрию. Основное требование к изображенной на рис.3 системе состоит в том, чтобы электроны с левой стороны катода в одном случае давали вклад в ток пучка, отражаясь от электрода 2, а в другом случае оседали на нем. Для анализа и синтеза источника электронов проведены численные эксперименты, т.е. рассчитаны траектории электронов, вылетающих с различных частей катода при разных конфигурациях электродов и потенциалов на них. В результате анализа и синтеза пришли к форме электродов и соленоида, показанных на рис.3. Из рисунка видно, что частицы с левой стенки катода проходят через электромагнитную

систему и фокусируются. Прохождение этих частиц дает право утверждать, что можно эффективно использовать всю эмиттирующую поверхность катода. Расчеты показали, что если переместить катод на 2 мм влево, то электроны с левой поверхности катода запираются, а фокусировка оставшегося пучка не нарушается. Тем самым мы уменьшаем интенсивность пучка примерно в два раза.

Источником электронов в коллективном ускорителе является сверхточный индукционный линейный ускоритель электронов – СИЛУНД. Для анализа поведения электронного пучка в СИЛУНДе возникла необходимость в расчете распределения электрического поля в ускорительном тракте и выборе оптимальной геометрии ускорительных трубок /4/. На рис.4 схематично изображена ускоряющая секция СИЛУНДа. В области движения пучка электрическое поле в основном определяется потенциалами на диафрагмах 6. Разность потенциалов $\Delta \varphi$ между диафрагмами определяется напряжением, прикладываемым к первичной обмотке индукторов 5, которое одинаково для всех индукторов. В качестве модели для расчета электрического поля в области движения пучка выбиралась система из пяти диафрагм (ускорительных трубок), показанная на рис.5, для которой решалось уравнение Лапласа с заданными граничными условиями. Точкам 1,2,3,4,5 присваивался потенциал (в относительных единицах) $\varphi = 0$, точкам 6,7,8,9 – потенциал $\varphi = 4$. Между точками 1,9 задавалась нормальная к границе производная $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$. Диафрагмам (на рисунке прямые С1, С2, С3, С4, С5) присваивались потенциалы, равные соответственно 0, 1, 2, 3, 4. Прямым С6, С7, С8, С9 присваивались потенциалы 0, 1, 2, 3 соответственно. Электрическое поле $\vec{E} = -\text{grad} \varphi$, созданное этой системой электродов, находим из решения краевой задачи

$$\frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

$$\varphi|_{C_i} = \varphi_i, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{C_j} = g_j,$$

на границах C_i задан потенциал φ_i или нормальная к границе производная g_j . Для решения краевой задачи (2) используется дисплейный вариант программы **ELCIRT**, названный **DESELLPT/5/**. При использовании дисплея исходные данные (шаги сетки по z и по x , перечень граничных кривых с указанием числа точек в каждой из них, значение потенциалов на границах) и результаты расчета выдаются на экран

дисплея сразу в наглядной форме. Над исходными данными можно осуществить операции просмотра и редактирования: на экран может быть выдан вид области, в которой производится расчет, можно изменять значения отдельных параметров, вводить новые точки на границах с соответствующими значениями потенциалов в них или удалять имеющиеся, другими словами, изменять конфигурацию области и граничные условия. Отредактировав исходные данные, можно приступить к расчету. После завершения расчета, который занимает несколько минут, на экране появляется вид области с узловыми точками. Для анализа результатов расчета пользователю предоставляются следующие возможности. Получить на экране дисплея значение функции в узловых точках, значение функции и ее производных в сечениях, параллельных осям координат, и их графиков, эквипотенциальные линии с заданными значениями потенциалов. Если анализ результатов показал необходимость нового расчета при других исходных данных, то в этом случае нужно повторить редактирование исходных данных и вновь вернуться к анализу результатов. Анализ распределения электрического поля позволил выбрать оптимальную форму диафрагм. Однородность ускоряющего поля в сечении пучка улучшена на порядок по сравнению с исходной.

Подобным образом проведен анализ и синтез электромагнитных полей сложной конфигурации в напылителе тонких пленок, рис.1; полосковом резонаторе, рис.2; источнике для закалки металлов. Аналогичным методом подобраны начальные параметры магнитной системы адгезатора /6/. Из всего множества возможных вариантов, исходя из имеющегося опыта, можно выбрать очень грубо набор параметров магнитной системы. Далее конфигурации катушек и токи в них подбираются с использованием системы "ЭВМ + дисплей". Работа ведется по следующей схеме. Магнитное поле катушек вычисляется на ЭВМ. Параметры катушек и график суммарного магнитного поля выдается на экран дисплея. С помощью светового карандаша или клавиатуры дисплея меняются параметры катушек, отсылаются на пересчет, анализируется график поля. В качестве обобщения полученных результатов была создана программа **ANALYZ /7/**, позволяющая на дисплее анализировать функцию одной переменной, зависящей от 1 до 18 параметров. Анализ в этом случае заключается в визуальном сравнении графиков функции при различных наборах параметров.

При конструировании физической аппаратуры, в частности в процессе разработки коллективного ускорителя, возникает необходи-

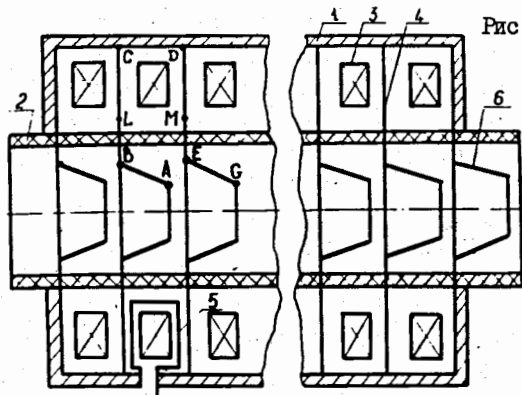


Рис. 4. Схема ускоряющей секции СИЛЕНТА:
1 - проводящий кожух;
2 - вакуумная трубка (диэлектрик);
3 - сердечник индуктора;
4 - контакт;
5 - первичная обмотка индуктора;
6 - диафрагма.

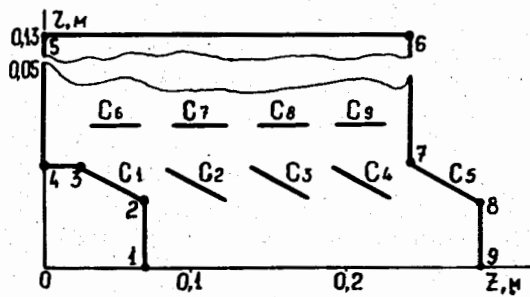


Рис. 5. Граничные кривые для расчета потенциала в секции СИЛЕНТА.

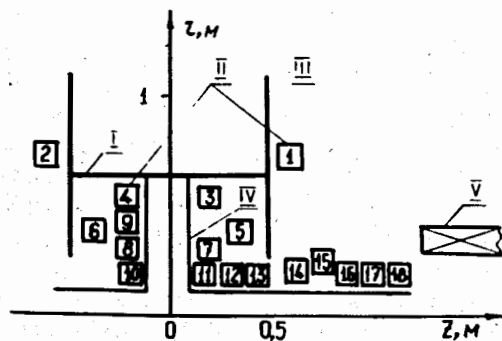


Рис. 6. Схема адгезатора (3):
I - обечайка камеры адгезатора; II - катушки магнитной системы адгезатора (I-18);
III - торцевые стенки адгезатора;
IV - внутренний экран;
V - соленоид ускоряющей системы.

мость в расчете вихревых токов, наводимых в массивных проводниках переменным во времени магнитным полем. В диссертации разработан метод расчета вихревых токов в аксиально-симметричных проводниках произвольного поперечного сечения. Метод основан на представлении проводников в виде N индуктивно связанных витков, поперечное сечение которых меньше или сравнимо с глубиной проникновения электромагнитной волны. Вихревые токи I_n , $n = 1, \dots, N$, находятся из системы уравнений

$$\sum_{m=1}^N M_{nm} \frac{dI_m}{dt} + R_n I_n = - \frac{d\Phi_n}{dt} \quad (3)$$

где M_{nm} - коэффициент взаимной индукции n -го и m -го витков, R_n - сопротивление n -го витка, Φ_n - поток индукции внешнего поля через n -й виток. Разработана программа TESTAD /8/ для расчета вихревых токов согласно уравнению (3). Результаты расчета проверялись экспериментально по измерениям магнитного поля на установке, в которой в качестве источника внешнего магнитного поля использовался соленоид, создающий магнитное поле с периодом $T = 0,048$ с и амплитудой $B = 0,25$ Т, а в качестве массивного проводника взят диск с отверстием, изготовленный из алюминия. Точность измерений магнитного поля составляла 2% в области полей 0,02-0,2 Т и 10% в области полей 0,0005-0,015 Т. Результаты расчетов магнитного поля в пределах ошибок совпадают с экспериментальными данными /9/. С использованием программы TESTAD была рассчитана конструкция адгезатора модели коллективного ускорителя и его магнитная система, обеспечивающая захват 10^{13} электронов на равновесный радиус 0,36 м, устойчивое сжатие электронного кольца до радиуса 0,04 м и вывод кольца в ускоряющую секцию /10/. Магнитное поле необходимой конфигурации создавалось в адгезаторе, рис. 6, многовитковыми катушками II, расположенными внутри массивной металлической камеры I, III. Геометрия катушек выбиралась таковой, чтобы она позволяла производить установку внутренних тонких экранов IV, которые не испытывают нагрузок со стороны атмосферного давления. Магнитное поле в области сжатия и вывода кольца имеет сложную структуру в пространстве и времени. Оно является суммой полей соленоида ускоряющей секции V на рис. 6 с частотой 20 Гц, постоянного во времени поля (катушки I-2 на рис. 6), импульсных полей (катушки 3-6 с частотой 833 Гц, катушки 7-9 с частотой 667 Гц, катушки 10-18 с частотой 1000 Гц) и поля вихревых токов.

Поле в адгезаторе представляется суперпозицией пяти полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 + \vec{B}_5, \quad (4)$$

где \vec{B}_1, \vec{B}_2 - импульсные поля катушек адгезатора и соленоида ускоряющей секции; \vec{B}_3, \vec{B}_4 - поля вихревых токов, наводимых полями \vec{B}_1 и \vec{B}_2 соответственно; \vec{B}_5 - постоянное магнитное поле, величина которого соответствует радиусу инжекции электронов. Расчет полей $\vec{B}_k(z, z, t)$ для каждого из пяти слагаемых проводился по формуле

$$\vec{B}_k(z, z, t) = \sum_{n=1}^{N_k} I_n(t) \cdot \vec{G}_{B_n}(z, z). \quad (5)$$

Здесь $\vec{G}_{B_n}(z, z)$ - магнитное поле, создаваемое одним витком в точке с координатами z, z при протекании в нем единичного тока, $I_n(t)$ - ток в витке как функция времени t . Суммирование - по всем виткам. Переменные поля \vec{B}_1, \vec{B}_2 создаются при протекании тока разряда конденсаторной батареи C на индуктивную нагрузку L через коммутатор. Расчет токов в таких цепях не представляет трудностей. Расчет вихревых токов в стенках камеры адгезатора, наводимых катушками соленоида ускоряющей секции, проводился по формуле (3). В суммарном магнитном поле рассчитывались динамические характеристики кольца: равновесный радиус - z_s , поперечные размеры его сечения - a_x, a_z , частоты бетатронных колебаний - ν_x, ν_z , величина релятивистского фактора электронов γ . Анализ и синтез магнитной системы адгезатора является сложной задачей, и ей уделено достаточно большое место в диссертации. Основное внимание уделялось обеспечению условий одночастичной устойчивости кольца при сжатии, выбору геометрии камеры адгезатора, обеспечивающей экранировку поля соленоида ускоряющей секции, выбору оптимальных параметров (токов в катушках и их геометрии) магнитной системы адгезатора, обеспечивающей сжатие электронного кольца и вывод его в область ускоряющей секции. Была выбрана конструкция внешней оболочки адгезатора, позволяющая уменьшить искажающее действие поля соленоида ускоряющей секции в области сжатия кольца в 15-20 раз. Существенное экранирование поля в области больших радиусов, где имеет место наибольшее искажение поля при включении соленоида, достигнуто за счет увеличения внешнего радиуса торцевых стенок камеры адгезатора и их малого удельного сопротивления. Внешний диаметр стенок по сравнению с тем, который они имели раньше (без учета вклада вихревых токов в динамику кольца), увеличен в два раза. Стенки изготовлены из дюралюминия и имеют толщину 2 см, ранее они были изготовлены из нержавеющей стали толщи-

ной 1 см. Обечайка, толщиной 1 см, и стенки внутренних экранов, толщиной 0,02 мм, изготовленные из нержавеющей стали, позволяют получить необходимый вакуум и не вносят заметных искажений в распределение внешнего магнитного поля и в показатель спада поля. Оптимизация (синтез) параметров магнитной системы адгезатора проводилась в три этапа. Сначала без учета вихревых токов с помощью программы ANALYZ по заданной $n(z_s)$ - траектории устойчивого сжатия кольца найдены координаты катушек, токи и время их включения. Затем с учетом вихревых токов уточнялись z_f, z_f - координаты (параметры) катушек методом Монте-Карло /II-13/. Окончательные значения параметров магнитной системы вычислялись минимизацией квадратичного функционала

$$\Phi^2 = \iiint \left[\vec{B}_0(z, z, t) - \vec{B}(z, z, t, z_f, z_f) \right]^2 dz dz dt, \quad (6)$$

где $\vec{B}_0(z, z, t)$ - магнитная индукция требуемого магнитного поля, $\vec{B}(z, z, t, z_f, z_f)$ - магнитная индукция, зависящая от параметров z_f, z_f . На рис.7 показано распределение B_z - составляющей суммарного поля, определяемого уравнением (4) с параметрами, найденными на первом этапе оптимизации (кривая 1) и после оптимизации (кривая 2) для $z = 0,04$ м и $t = 4,02$ с.

Если в магнитной системе адгезатора вихревые токи играли важную, но не главную роль, то в системе зеркального захвата электронного пучка на равновесную орбиту и последующего его сжатия они играют основную роль. В диссертации численно исследована система зеркального захвата, которая состоит из пучка электронов на равновесной орбите с начальным $\gamma = 5$ и током 20 кА, проводящего экрана и двух пар катушек сжатия. При этом пучок электронов, экран и катушки моделировались совокупностью взаимодействующих между собой круговых витков с током. Проведены исследования влияния формы экрана на его фокусирующие свойства и на величину равновесного радиуса пучка при различных значениях тока в пучке и магнитных катушках /13/. На рис.8 (в относительных величинах) показаны расположение и форма проводящего экрана (Э) и магнитных катушек (К 1, К 2), дана зависимость равновесного радиуса электронов (R_e) и токов (j_1, j_2) в катушках от времени t . Кроме того, приведены результаты синтеза системы зеркального захвата, пригодной для получения электронных колец с током 20 кА и последующей их устойчивой компрессией в магнитном поле от радиуса 0,5 м до радиуса 0,05 м.

В диссертации проведен анализ и синтез сложной электромагнит-

Рис.7. Результат оптимизации с помощью квадратичного функционала.
 I - распределение $B_z(z)$ для $Z = 0,04$ м и $t = 4,02$ с до оптимизации, 2 - то же после оптимизации.

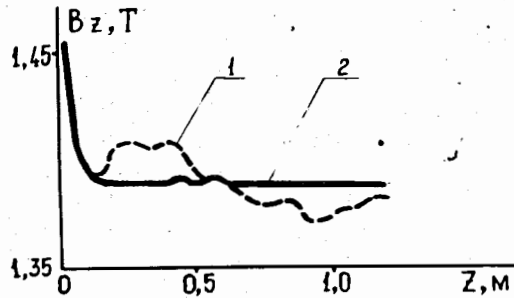


Рис.8. Форма и взаимное расположение экрана (Э) и катушек (K1, K2) системы зеркального захвата. Зависимость равновесного радиуса (R_s) и токов (M_1, M_2) в катушках от времени.

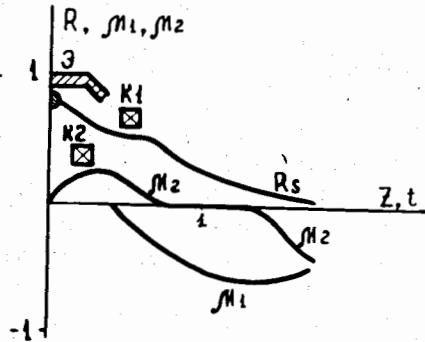
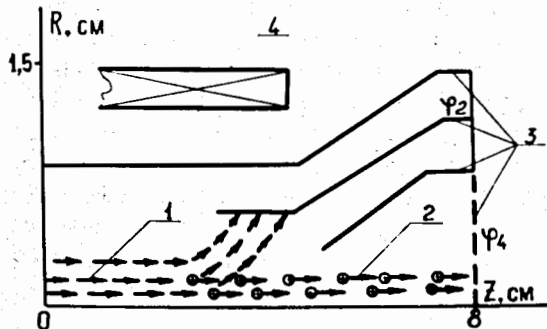


Рис.9. Схема электромагнитной системы в области электронного коллектора:
 1 - пучок электронов;
 2 - пучок ионов;
 3 - вытягивающие электроды; 4 - соленоид.



ной системы электронно-лучевого источника многозарядных ионов в области электронного коллектора, схематически показанного на рис.9. Основные требования к изображенной на рисунке системе состоят в том, чтобы пучок электронов 1 ионизировал перпендикулярно направленный поток нейтрального газа, а затем попадал на электрод с потенциалом Ψ_2 , полученные ионы 2 должны вытягиваться из системы за сетку с потенциалом Ψ_4 . Движение двухкомпонентного пучка с плотностью тока электронов $10-100$ А/см², ионов $0,1-1$ МА/см², энергией электронов $0,1-10$ кэВ в магнитном поле $0,1-1$ Т исследовано методом крупных частиц с учетом пространственного заряда /14-16/. При исследовании этой электромагнитной системы применялся метод итерации, состоящий из следующих этапов: задания начального распределения зарядов; решения уравнения Пуассона (использовались два метода /17/ и /18/); определения распределения электромагнитного поля; решения уравнения движения и нахождения траекторий электронов; определения ионной компоненты тока; решения уравнений движения и нахождения ионных траекторий; видеоизменения распределения пространственного заряда в результате анализа картин траекторий. С полученным распределением расчеты повторяются до тех пор, пока изменение распределения пространственного заряда при переходе к следующей итерации будет в пределах заданной точности. Анализ электромагнитного поля, траекторий частиц и фазовых характеристик электронного пучка осуществлялся с использованием удаленной дисплейной станции. Для этой цели разработана специальная методика, создан и введен в эксплуатацию комплекс программ **ANALYZ**, **DIKIK**, **DSELEPT**, позволяющий на различной стадии расчета системы применять ЭВМ в диалоговом режиме /7,15,19/.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. На основе анализа и синтеза создана установка с оптимальными параметрами для нанесения тонких (5 мкм) пленок из сверхпроводника (ниобий-титан), углерода, урана и т.д. на подложки большой площади ($0,25$ м²) из металлов и неметаллов.

2. Оптимизирована геометрия ускоряющих диафрагм в СИЛУНДе, что на порядок улучшило согласно результатам эксперимента однородность электрического поля в сечении ускоряемого пучка электронов.

3. Спроектирован источник электронов для поверхностной закалки металлов, дающий пучки электронов с энергией 150 кэВ и поперечным сечением на выходе 3 мм^2 при токе 5 А. Показано, что путем изменения положения электродов или изменения потенциалов на них можно менять интенсивность пучков в два раза без изменения энергии электронов на выходе.

4. Предложен новый метод и программа для расчета вихревых токов, наведенных квазистационарным магнитным полем в массивном проводнике. Получено хорошее совпадение результатов расчетов магнитного поля с учетом вихревых токов с экспериментальными данными.

5. Рассчитаны: конструкция камеры адгезатора с внутренними экранирующими стенками, магнитная система сжатия и вывода кольца из модели коллективного ускорителя с учетом вихревых токов, обеспечивающая устойчивое сжатие $N = 10^{13}$ электронов с $\chi = 4$ от радиуса 0,36 м до радиуса 0,04 м.

6. Впервые теоретически показана осуществимость устойчивой компрессии релятивистского пучка электронов в системе "зеркального захвата", рассчитана геометрия экрана и магнитная система, обеспечивающая устойчивый захват электронного пучка на равновесную орбиту и сжатие кольца с током 20 кА от радиуса 0,5 м до радиуса 0,05 м.

7. Оптимизирована система электродов электронно-лучевого источника в области электронного коллектора, которая обеспечивает минимальное оседание пучка электронов (с плотностью тока 10 А/см^2) на дрейфовых трубках, запирающие электроны в области коллектора, а также эффективное удержание и вывод за вытягивающий электрод ионной компоненты пучка (с плотностью тока 1 МА/см^2).

8. Разработан, создан и введен в эксплуатацию комплекс программ, позволяющий на различной стадии проектирования сложных электромагнитных систем применять ЭВМ в диалоговом режиме с пульта дисплея, что на порядок уменьшает время проектирования.

Основные научные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Балалыкин Н.И., Дерендяев Ю.С., Катрасев В.В., Бух Ю. Установка для нанесения тонких пленок. Труды IV Чехословацкой

конференции по тонким пленкам. Татранска Ломница, 1974, с.85-91.

2. Дерендяев Ю.С., Карлов А.А., Рубин Н.Б. Расчет электромагнитных полей в двухсвязанных резонаторах методом сеток с использованием дисплея. ОИЯИ, ПИ-6561, Дубна, 1972.

3. Дерендяев Ю.С., Енчевич И.Б., Михов М.К. Расчет источника электронного пучка с изменяемой интенсивностью. ОИЯИ, П-83-782, Дубна, 1983.

4. Дерендяев Ю.С., Долбилов Г.В., Обухов Ю.Л., Сумбаев А.П., Шеулин А.С. Анализ электрического поля в ускорительной секции СИЛУНЦа. ОИЯИ, Б1-7935, Дубна, 1974.

5. Гусев А.В., Дерендяев Ю.С., Забиякин Г.И., Карлов А.А., Кавченко А.В., Левчановский Ф.В., Приходько В.И., Рубин Н.Б. Использование дисплея со световым карандашом при решении краевых задач. ОИЯИ, П-5671, Дубна, 1971.

6. Дерендяев Ю.С., Иванов И.Н., Каминская А.М., Каминский А.К., Кузнецов А.Б., Рашевский В.П., Саранцев В.П., Светов Л.В. Расчет магнитной системы адгезатора (3). ОИЯИ, Р9-9140, Дубна, 1975.

7. Дерендяев Ю.С., Карлов А.А., Обухов Ю.Л., Полянцев А.Д., Сумбаев А.П. Программа для анализа функций, зависящих от параметров, с помощью дисплея. ОИЯИ; Б1,9-8503, Дубна, 1974.

8. Дерендяев Ю.С., Каминский А.К. Программа для расчета переменных магнитных полей при наличии проводящих сред. ОИЯИ, Б3,9-8392, Дубна, 1974.

9. Дерендяев Ю.С., Иванов И.Н., Каминский А.К., Каминская А.М., Лачинов В.М., Маковеев В.К., Рашевский В.П., Рубин Н.Б. Исследование экранирования переменного магнитного поля проводящими экранами. ОИЯИ, Р9-8486, Дубна, 1974.

10. Дерендяев Ю.С. Программа для расчета динамики сжатия кольца в адгезаторе и параметров магнитной системы вывода. ОИЯИ, Б1,9-9092, Дубна, 1975.

11. Дерендяев Ю.С., Кочкин В.И., Ососков Г.А. Решение системы нелинейных алгебраических уравнений методом Монте-Карло. ОИЯИ, Б1, П-10351, Дубна, 1976.

12. Дерендяев Ю.С., Кочкин В.И., Ососков Г.А. О применении метода Тсуцудзи-Кионо-Клейнз к расчету параметров магнитных систем. ОИЯИ, П-11921, Дубна, 1978.

13. Дерендяев Ю.С., Ходатаев К.В. Компрессия интенсивного кольцевого релятивистского пучка при использовании зеркального захвата. ОИЯИ, Р9-11059, Дубна, 1978.

14. Беляев А.П., Дерендяев Ю.С., Долбилов Г.В. Коваленко А.Д., Обухов Ю.Л., Решетникова К.А., Саранцев В.П., Сумбаев А.П. Фокусировка интенсивного электронного пучка в линейном индукционном ускорителе СИЛУНД. ОИЯИ, 9-8289, Дубна, 1974.

15. Дерендяев Ю.С., Илющенко В.И., Карлов А.А., Кочкин В.И., Полынцева А.Д., Смолякова Т.Ф. Программа расчета и анализа на дисплее траекторий электронного пучка с учетом пространственного заряда и переменных полей. ОИЯИ, Б1, II-9982, Дубна, 1976.

16. Дерендяев Ю.С., Жидков Е.П., Илющенко В.И., Карлов А.А. Решение задачи анализа и синтеза для электромагнитной системы электронно-лучевого источника многозарядных ионов. В книге: Методы расчета электронно-оптических систем. Сборник статей под редакцией Девяткова Н.Д. "Наука", М., 1977, с.45-49. ОИЯИ, II-9525, Дубна, 1976.

17. Дерендяев Ю.С., Хохлова Э.С. Подробное описание программы ELLIPT. ОИЯИ, Б1, II-8275, Дубна, 1974.

18. Дерендяев Ю.С., Жидков Е.П., Полякова Р.В. Об эффективности использования метода Фурье для решения уравнения Пуассона при расчете траекторий пучка частиц с учетом пространственного заряда. ОИЯИ, II-10100, Дубна, 1976.

19. Дерендяев Ю.С., Карлов А.А., Смолякова Т.Ф. Анализ и синтез решений уравнений Лапласа и Пуассона с граничными условиями I и II рода в режиме диалога с использованием удаленной дисплейной станции. ОИЯИ, Б1, II-12199, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 декабря 1987 года.