

B-451



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.384.6

9-86-19

ВОРОЖЦОВ

Сергей Борисович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
И ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЯХ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

**Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника**

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

Дубна 1986

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Владислав Павлович
САРАНЦЕВ

доктор физико-математических наук
профессор

Юрий Михайлович
АДО

доктор физико-математических наук
профессор

Валерий Павлович
ИЛЬИН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова (г. Ленинград).

Защита состоится "22" мая 1986 г. в "11" часов на заседании Специализированного совета Д.047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области, ЛЯП ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛЯП ОИЯИ.

Автореферат разослан "18" февраля 1986 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета

Ю.А.БАТУСОВ

Актуальность

Успехи ускорительной техники в области создания протонных ускорителей с энергией 500-800 МэВ и интенсивностью 100-400 мкА открывают перспективы применения этих установок не только для выполнения актуальных физических программ, но и для задач прикладного характера.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ под руководством члена-корреспондента АН СССР В.П.Джелезова и профессора В.П.Дмитриевского в течение ряда лет проводятся разработки высокоинтенсивных ускорителей нового типа, использующих стационарные магнитные поля с пространственной вариацией.

Одной из работ этого направления является реконструкция синхротрона ОИЯИ, проводимая с целью повышения интенсивности до 50 мкА, увеличения эффективности вывода частиц до 50-70% и улучшения качества пучка.

Дальнейшее развитие исследований связывается с разработкой в Лаборатории ядерных проблем в рамках проекта МИНГЕН (мезонный и нейтронный генератор) высокоинтенсивного дейтронного комплекса на энергию до 1 ГэВ/нуклон при интенсивности пучка до 100 мА.

Высокие стоимости крупных ускорителей приводят к необходимости выполнения большого объема расчетных работ и моделирования основных узлов установки. Существенное усложнение физической теории ускорителей с пространственной вариацией поля и жесткие требования при технической реализации узлов установки обусловили широкое внедрение численных расчетов на ЭВМ в процессе проектирования ускорителей. Причем расчетные работы не заканчиваются на стадии проектирования узлов, а продолжают также на этапе экспериментального исследования характеристик готовых систем, обеспечивая интерпретацию и дополнение экспериментальных данных при доводке системы до необходимых параметров.

При проектировании магнитных систем ускорителей с пространственной вариацией поля до недавнего времени численное решение задачи магнитостатики было значительно затруднено вследствие сложной трехмерной конфигурации полей и необходимости учета эффектов насыщения магнитопривода. Поэтому выполнялись лишь оценочные расчеты. В силу идеализации задач не удавалось провести в необходимом объеме математическое моделирование, и в исследовании оставались "белые пятна", которые лишь частично устранялись с помощью экспериментальных маломаштабных моделей. При этом были неизбежны дополнительные, а порой

и существенные материальные затраты и задержки в сроках проектирования и доводки установок. При рассмотрении же магнитных систем со сверхпроводящими обмотками маломасштабное моделирование вообще проблематично из-за ограничений на максимальную плотность тока и других трудностей. В этом случае единственным источником информации о системе до построения полномасштабного прототипа является численный эксперимент.

Математическое моделирование динамических процессов в ускорителях с пространственной вариацией, которые описывают движение частиц, влияние на это движение различных систем ускорителя, нахождение оптимальных характеристик ускоряемых пучков заряженных частиц, следует отметить особо. Такое выделение динамических процессов диктуется тем, что все основные системы ускорителя часто допускают экспериментальное моделирование в уменьшенную или натуральную величину. Процесс же ускорения невозможно смоделировать в натуре без создания действующего ускорителя.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическим планом ЛЯИ ОИЯИ.

Цель реферлируемой диссертации состоит в разработке методов расчета магнитостатических и электростатических полей и динамики пучка, выполнении анализа, выбора параметров и оптимизации магнитной и других систем для сильноточных ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля.

Научная новизна работ

1. Создание новых комплексов программ для ЭВМ по расчету пространственных магнитных^{/1-7/} и электростатических^{/8-10/} полей, а также динамики пучка^{/11-15/} в ускорителях циклотронного типа с пространственной вариацией магнитного поля.
2. Численное моделирование магнитостатических полей сверхпроводящих и "теплых" магнитных систем циклотронов в рамках существенно трехмерных радиально-секторных, спирально-секторных и броневого структур на этапах выбора параметров и анализа магнитных измерений^{/16-21/}.
3. Численное моделирование пространственных электрических полей ускоряющих систем циклотронов и фазотронов для расчета динамики пучка^{/9, 12/}.
4. Создание новой теоретической концепции фазотронного захвата пучка в пределах первого фазового колебания ("бамповый" режим)^{/22-25/}.
5. Численное моделирование процесса ускорения пучка в фазотроне с пространственной вариацией магнитного поля от инжекции до конечных радиусов^{/14/}.

6. Исследование вывода пучка из камеры фазотрона ОИЯИ на основе регенеративного и электродинамического методов^{/26/}.

7. Разработка новых режимов временной растяжки пучка с учетом согласования параметров C -электрода с основной ускоряющей системой и системой вывода^{/27/}.

В результате сформировалось новое перспективное направление исследований – численный эксперимент в ускорителях циклотронного типа, послуживший методологической основой для решения крупной научно-технической проблемы – физического пуска ускорителя нового типа – фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля.

Практическая ценность работ

Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, нашли практическое применение при разработке и испытаниях различных физических установок:

1. Фазотрон ОИЯИ. Конфигурация электродов в центре, режимы ускорения, системы вывода и временной растяжки пучка. Физический пуск ускорителя состоялся в начале 1984 г.^{/11-14, 22-28/}.
2. Дейтронный циклотронный комплекс. Магнитная система. Закончен технический проект прототипа сверхпроводящего секторного магнита для циклотрона ДЦ-1^{/21/}.
3. Муонный спектрометр ММ-4. Проектирование магнита. Распределение поля для программ обработки физической информации. Получены важные физические результаты при работе установки на пучке SPS – ЦЕРН^{/7, 29/}.
4. Суперциклотрон. Предварительный выбор параметров магнитной системы. Проведено физическое моделирование двух спирально-секторных магнитов в масштабе $1:5/18/$.
5. Созданное матобеспечение по расчету магнитных и электрических полей широко используется в ОИЯИ для ряда других установок (синхротрон СПИП, "Нейтронный детектор" ОИЯИ-ИФВЗ и др.^{/6, 19, 20/}.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на Совещаниях по программированию и математическим методам решения физических задач (Дубна, 1973, 1977 г.г.), на Конференции по расчету магнитных полей (Оксфорд, 1976 г.; Гренобль, 1978 г.), на УП и IX Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1980 г., 1984 г.), на IX Конференции по ускорителям заряженных частиц (Вашингтон, 1981 г.), на Всесоюзном совещании по ускорителям ионов низких и средних энергий (Киев, 1981 г.), на VIII Международной конференции по магнитной техно-

логии (Гренобль, 1983 г.), на Республиканской научно-технической конференции "Интегральные уравнения в прикладном моделировании" (Киев, 1983 г.), на Международной школе по проблемам ускорителей заряженных частиц (Дубна, 1984 г.), а также на научных семинарах в ЛЯП, ЛВТА, ЛВЭ ОИЯИ и на совещаниях сотрудничества МА-4 (ЦЕРН).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 48 работ; основные результаты содержатся в 29 печатных работах, приведенных в списке литературы.

Структура диссертации

Работа состоит из введения, трех разделов, объединяющих 8 глав, заключения и приложения.

Во введении рассматриваются перспективы развития сильноточных ускорителей с энергией до 1 ГэВ и роль вычислительного эксперимента при разработке и создании ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля.

В первом разделе излагаются общие теоретико-методические вопросы, связанные с темой работы. В первой главе дан обзор современных методов расчета магнитостатических полей. Во второй главе рассматриваются методы расчета динамики пучка ускоряемых частиц.

Второй раздел посвящен вопросам численного моделирования магнитостатических и электростатических полей. В третьей главе приводятся результаты расчета двумерных магнитных полей. В четвертой главе выполнены расчеты пространственных электростатических полей. В пятой главе излагаются результаты расчета пространственных магнитостатических полей методом интегральных уравнений и методом конечных элементов.

Третий раздел посвящен анализу динамики пучка фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. В шестой главе разбираются вопросы инжекции пучка в ускоритель. В седьмой главе рассматривается процесс ускорения и транспортировки частиц до конечного радиуса. В восьмой главе выполнено численное моделирование временной растяжки и вывода пучка из камеры ускорителя.

В заключении кратко суммируются основные результаты, полученные в работе.

В приложение вынесены рисунки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится обзор методов расчета магнитостатических полей. В настоящее время можно выделить две группы методов рас-

чета полей: дифференциальные и интегральные^{/1/}. Рассматривается возможность комбинации этих двух методов в одном алгоритме (смешанные методы).

Уравнения Максвелла для статических магнитных полей имеют следующий вид:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}, \quad (1)$$

где $\vec{B} = \mu_0 \mu(H) \vec{H}$ - известная функция для рассматриваемой изотропной среды, \vec{B} - магнитная индукция, \vec{H} - напряженность магнитного поля, \vec{j} - плотность тока, μ_0 - абсолютная магнитная проницаемость вакуума. Обычный подход при решении (1) при соответствующих граничных условиях заключается во введении векторного или скалярного потенциала согласно одному из следующих соотношений:

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}_m, \quad \vec{H} = \vec{T}_z - \operatorname{grad} \hat{\varphi}, \quad \vec{H} = -\operatorname{grad} \psi, \quad (2)$$

где \vec{A}_m - магнитостатический векторный потенциал, $\hat{\varphi}$ - магнитостатический скалярный потенциал, \vec{T}_z - электрический векторный потенциал, обусловленный своим появлением наличием токовых обмоток, ψ - полный магнитостатический скалярный потенциал.

При использовании векторного потенциала для расчета пространственных полей встает задача отыскания трех неизвестных компонент потенциала. В этом случае предпочтительным оказывается применение комбинации скалярных потенциалов $\hat{\varphi}, \psi$ ^{/1*}. Для областей расчета с постоянным значением $\mu=1$ выбирается потенциал $\hat{\varphi}$. Таким образом, вместо (1) с учетом (2) получим

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} \hat{\varphi}) = \operatorname{div}(\mu \vec{T}_z), \quad (3)$$

где \vec{T}_z определяется на основании уравнения

$$\operatorname{rot} \vec{T}_z = \vec{j}, \quad (4)$$

а также некоторых дополнительных условий, обеспечивающих наиболее простую функциональную зависимость вектора \vec{T}_z от координат.

Для численного решения задачи необходимо использовать один из двух методов: конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ).

Использование МКР позволило добиться значительных успехов при численном моделировании магнитостатических полей^{/2*}, однако современные комплексы программ по расчету полей ориентируются на МКЭ (или проекционно-сеточный метод), обладающий рядом привлекательных свойств, таких, например, как:

а) геометрическая гибкость позволяет моделировать границы сред в виде как многогранной, так и криволинейной поверхности^{/7/};

б) получающаяся алгебраическая система меньше по размеру, чем

для МКР, за счет варьирования эффективного диаметра конечных элементов в различных областях задачи.

Одним из эффективных современных методов решения линеаризованной по магнитной проницаемости алгебраической системы является неполный метод Холесского (метод квадратного корня) с последующим применением метода сопряженных градиентов^{/3*/}.

При рассмотрении интегральных методов выделим метод объемных интегральных уравнений, одна из формулировок которого для векторной искомой функции заключается в следующем: представим напряженность магнитного поля в виде суммы векторов

$$\vec{H} = \vec{H}_m + \vec{T}_c, \quad (5)$$

где

$$\vec{T}_c = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_3} \frac{\vec{j} \times \vec{R}}{R^3} d\Omega, \quad (6)$$

т.е. \vec{T}_c - напряженность магнитного поля в вакууме от токовой обмотки, занимающей объем Ω_3 ,

$$\vec{H}_m = -\frac{1}{4\pi} \text{grad} \int_{\Omega_1} \frac{(\vec{M} \cdot \vec{R})}{R^3} d\Omega, \quad (7)$$

т.е. \vec{H}_m - напряженность магнитного поля от намагниченной среды ($\vec{M} \neq 0$), занимающей объем Ω_1 . Уравнение (5) с учетом (6) и (7), а также соотношения $\vec{M} = (\mu - 1)\vec{H}$ можно представить в виде интегрального уравнения относительно вектора намагниченности \vec{M}

$$\frac{1}{\mu - 1} \vec{M} = -\frac{1}{4\pi} \text{grad} \int_{\Omega_1} \frac{(\vec{M} \cdot \vec{R})}{R^3} d\Omega + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_3} \frac{\vec{j} \times \vec{R}}{R^3} d\Omega. \quad (8)$$

Возможна альтернативная формулировка интегрального уравнения (8) относительно индукция магнитного поля \vec{B} ^{/2,4,5/}.

Преимущества интегральной формулировки задачи перед дифференциальной заключаются в следующем:

а) граничные условия в бесконечно удаленных точках естественно учтены в самом уравнении. Таким образом, не требуется устанавливать искусственную граничную поверхность с заданием на ней соответствующих условий, как это делается в дифференциальных методах;

б) для решения задачи достаточно найти искомую функцию лишь в области Ω , ($\mu > 1$). То есть делению на конечные элементы подвергается лишь часть объема, в котором определяется поле, что сокращает число независимых переменных в алгебраической системе;

Достоинство интегрального уравнения в форме (8) заключается в том, что результат расчета сразу получается в виде напряженности маг-

нитного поля. Однако при построении алгебраической системы необходимо учитывать три компонента \vec{M} . Существуют определенные ограничения при численной реализации метода интегральных уравнений, а именно:

а) матрица задачи полностью заполнена, и требуются более трудоемкие методы решения алгебраической системы, чем это было в дифференциальном методе;

б) вычисление коэффициентов матрицы требует гораздо больше времени ЭВМ, чем в дифференциальном случае, и зависит от наличия плоскостей симметрии магнита.

Одним из перспективных методов в настоящее время является так называемый смешанный метод, где делается попытка объединить достоинства интегрального и дифференциального подхода в единой вычислительной схеме^{/4*/}.

Во второй главе рассматриваются методы расчета динамики пучка. Диапазон методов простирается от использования простых аналитических формул до громоздких пакетов программ с применением традиционных методов вычислительной математики (численное интегрирование уравнений движения, граничные задачи и т.д.). Имеет место переход от расчетов отдельных траекторий ионов к моделированию всего пучка или его части в сложных пространственных электрических и магнитных полях, включая собственное поле частиц (комплексный численный эксперимент).

В линейном приближении уравнения движения иона с постоянной энергией в ускорителях с пространственной вариацией магнитного поля имеют вид

$$z'' + \frac{1}{\Lambda} (n\chi + R\chi' + 2\chi - \Lambda) z = \frac{R}{\Lambda^2} (\Lambda - \chi), \quad (9)$$

$$z'' - \frac{1}{\Lambda} (n\chi + \frac{R}{\Lambda} \chi') z = 0, \quad (10)$$

где R - энергетический радиус частицы, $\rho = r - R$, (r, θ, z) - координаты иона в цилиндрической системе, Λ - отношение (R) к среднему радиусу замкнутой орбиты, n - показатель роста азимутально-среднего магнитного поля $\vec{B}(R)$, $\chi(r, \theta)$ - характеризует пространственную вариацию распределения поля^{/5*/}. В этом приближении движение пучка определяется путем численного нахождения замкнутой равновесной орбиты и матрицы перехода через период магнитной системы.

При наличии ускоряющего поля было показано^{/28/}, что аксиальное движение частиц можно анализировать на базе линейного уравнения вида

$$z'' + h(\theta)z' + g(\theta)z = f(\theta), \quad (II)$$

где $h(\theta)$ и $g(\theta)$ - некоторые функции, учитывающие распределение полей, $f(\theta)$ - определяется отклонением медианной поверхности элек-

трического или магнитного поля от геометрической плоскости симметрии ускорителя.

В этом случае колебания центра пучка могут быть получены путем вычисления интеграла от функции, зависящей от $f(\psi)$ и коэффициентов матрицы перехода. Линеаризованное z -движение с учетом ускоряющего поля предпочтительно рассматривать, вводя процесс ускорения в центральную траекторию пучка, называемую в этом случае ускоренной равновесной орбитой^{/6*}.

Использование абберационных коэффициентов, определяемых вблизи центральной траектории численно, позволяет заменить интегрирование полных уравнений движения при анализе нелинейных эффектов на преобразование пучка через конечные интервалы по азимуту.

Для расчета оптимального фазового движения частиц (максимум ускоренного тока, удобство реализации ускоряющей и магнитной систем, отсутствие потерь в процессе ускорения) на основе аналитических формул составляется программа для ЭВМ (аналитическая модель), с помощью которой получают необходимые функции в виде таблиц и графиков для заданного набора параметров^{/27/}. Однако для быстрых по сравнению с периодом синхротронных колебаний процессов проводится полное численное моделирование фазового движения пучка от инжекции до вывода из камеры ускорителя^{/13, 14, 22/}.

Собственное поле пучка учитывается при помощи различных модельных представлений. Одна из таких моделей основана на том, что систему взаимодействующих частиц можно приближенно описывать лишь небольшим числом (по сравнению с числом частиц) усредненных параметров (метод крупных частиц).

В третьей главе рассматривается построение численных моделей для расчета существенно трехмерных конфигураций магнитных систем при помощи известной системы программ POISSON для расчета двумерных полей. При этом предлагаются определенные вычислительные приемы и построения, с помощью которых удалось получить при минимальных затратах времени ЭВМ удовлетворительную для практических применений точность расчета циклотронных магнитных систем со сплошным полюсом (циклотрон У-120М) и секторными магнитами (МЦ, суперциклотрон), а также тороидального сердечника мюонного спектрометра.

Для У-120М определялись поля токовых концентрических обмоток в условиях сложной конфигурации магнитной системы, включающей в себя спиральные шиммы для формирования вариации поля^{/16/}. Для расчета выделялась область магнита вблизи медианной плоскости. Отсутствие железа между спиральными шиммами в аксиально-симметричной расчетной модели учитывалось коэффициентом заполнения.

Для построения полной карты поля моноэнергетического циклотрона (МЦ) проводилась серия двумерных расчетов в сечениях магнита, изображенных на рис. 1. Сравнение результатов расчета с измерениями поля показывает (рис. 2), что совпадение азимутальных распределений находится в пределах 1%/17/.

На основании построенной расчетной модели определялись предварительные параметры спирально-секторной структуры магнитной системы суперциклотрона^{/18/}.

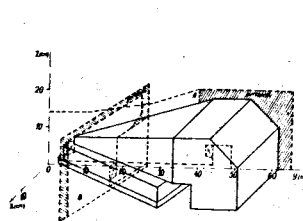


Рис. 1. Геометрия магнита МЦ.

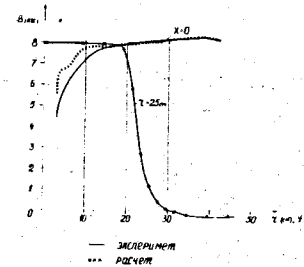


Рис. 2. Распределение магнитного поля в зазоре магнита МЦ.

В четвертой главе излагается вычислительный алгоритм для расчета трехмерных электростатических полей. Эта разработка была предпринята в плане исследования возможностей моделирования трехмерных магнитостатических полей при помощи конечно-разностной методики.

Для геометрически сложных пространственных конфигураций электродов наиболее эффективным и гибким методом расчета электростатических полей оказался метод альтернирования Шварца^{/8/}.

Сравнение результатов расчета различных систем (центр циклотрона и фазотрона, резонансная линия) методом Шварца с результатами измерений и, в предельном двумерном случае, с методом граничных интегральных уравнений (рис. 3) указывает на возможность достижения точности расчета 0,5% по потенциалу^{/9, 10/}.

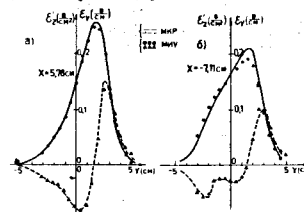


Рис. 3. Сравнение расчетов по методу конечных разностей (МКР) и по методу граничных интегральных уравнений (МЛУ) для центра фазотрона.

Высокая эффективность метода граничных интегральных уравнений в двумерном случае может служить основанием для решения обратной задачи нахождения конфигурации электродов по заданному полю^{/10/}.

Полученные результаты показали, что при переходе на магнитоэлектростатические задачи возникают значительные трудности при практической реализации рассмотренного метода. Однако для расчета электростатических полей алгоритм оказался достаточно эффективным, что позволило провести математическое моделирование сложной трехмерной конфигурации формирующих и ускоряющих пучков электродов в центре фазотрона ОИЯИ при помощи созданной системы программ ELSYS^{/8,9/}.

В пятой главе дано изложение нового вычислительного алгоритма для расчета трехмерных магнитоэлектростатических полей на основе векторного интегрального уравнения относительно индукции магнитного поля^{/4/}.

Основу алгоритма составляют: а) аналитическое представление поля равномерно намагниченного многогранника произвольной формы^{/3/}; б) построение необходимых для магнитных систем рассматриваемых ускорителей типов симметрии, включая вращательную; в) решение нелинейной алгебраической системы методом "погружения" в сочетании с методом минимальных невязок.

Предложенный алгоритм был реализован в специализированной системе программ MAGSYS^{/6/}, с помощью которой проводилось численное моделирование как "теплых" (МГТН - рис. 4), так и сверхпроводящих циклотронных магнитных систем с радиально-секторной (МЦ - рис. 1, ДЦ-I - рис. 5), спирально-секторной (ДЦ-II) и броневой (миланский циклотрон, рассмотренный для проверки MAGSYS сравнением с измерениями) структурой^{/2,19,21/}.

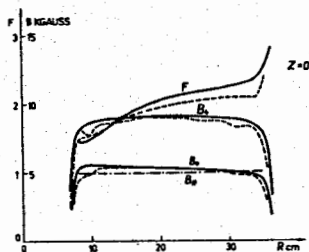


Рис. 4.

Радиально-секторный циклотрон МГТН.
— измерения, --- расчет.

B_s - среднее поле, B_r - требуемое среднее поле, B_w - амплитуда основной гармоники, F - флаттер.



Рис. 5.

Расчетная модель радиально-секторного сверхпроводящего циклотрона ДЦ-I.

Метод конечных элементов был применен для расчета пространственного распределения поля в пределах тороидального сердечника мюонного спектрометра совместного ОИЯИ-ЦЕРН эксперимента HA-4^{/7/}. Результаты сравнивались с магнитными измерениями (рис. 6) и экспериментами на калиброванном мюонном пучке ускорителя SPS ЦЕРНа. Интерес к расчету трехмерных полей методом конечных элементов диктовался также изучением возможностей применения метода для моделирования магнитных систем ускорителей циклотронного типа.

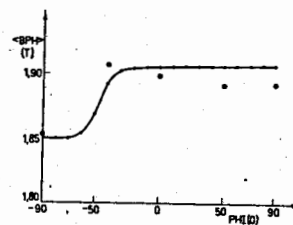


Рис. 6.

Азимутальная компонента поля внутри магнитопровода мюонного спектрометра, усредненная по радиальному размеру диска.

— расчет, ⊗ ⊗ ⊗ — измерения.

В главах VI-VIII третьего раздела рассмотрены вопросы численного моделирования динамики пучка фазотрона ОИЯИ.

Анализ процесса инжекции пучка для гладкого проектного магнитного поля показал^{/12,13,14,28/}, что при малых искажениях зеркальной симметрии магнитного поля ($B_r \approx 0,1$ мТл) и проектной амплитуде ускоряющего напряжения $V_{m,0} = 50$ кВ существует необходимая продольная и поперечная устойчивость частиц для получения проектной интенсивности пучка 25-50 мкА (рис. 7).

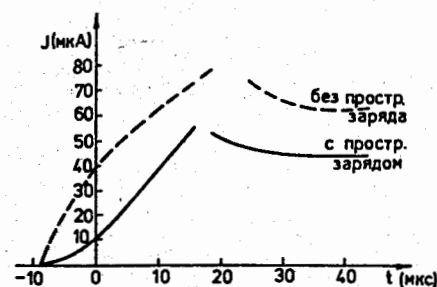


Рис. 7.

Зависимость интенсивности пучка от времени.

Пересмотр теоретической концепции в области первого фазового колебания и отход от классической схемы автофазировки привел к новому закону изменения среднего магнитного поля вдоль радиуса^{/22,24,25/}.

позволяющему реализовать фазотронный режим ускорения с меньшей, чем проектная, амплитудой ускоряющего напряжения (25–35 кВ) при существенном увеличении допуска на нарушения зеркальности магнитного поля ($B_R \approx 0,3 \pm 0,5$ мТл) (рис. 8). Результаты расчетов получили подтверждение при физическом пуске ускорителя (рис. 9)^{/23/}.

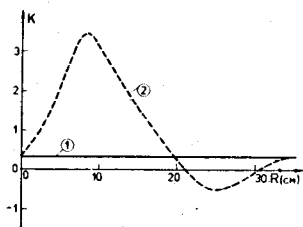


Рис. 8.

Параметр фазового движения для проектного поля (1) и нового бампового поля (2).

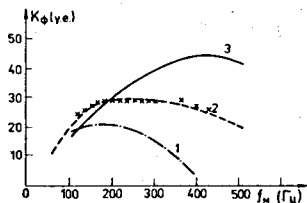


Рис. 9.

Зависимость интенсивности пучка после 1-го фазового колебания в условных единицах ($\psi, e.$).
 1 - $V_{пр} = 20$ кВ, 2 - $V_{пр} = 30$ кВ,
 3 - $V_{пр} = 50$ кВ, $x \times x$ - измерения на пучке.

Расчет распределения частиц по радиальным амплитудам свободных колебаний показал, что степень центрирования орбит достаточна для получения высокоэффективного вывода пучка из камеры ускорителя^{/13/}.

В седьмой главе рассматривается ускорение и транспортировка пучка до конечного радиуса. В процессе ускорения частиц, кроме, естественно, увеличения их энергии, ставится задача сохранить интенсивность и качество пучка, захваченного в процессе инъекции при проводке его до момента вывода из камеры ускорителя. На основании численного моделирования различных режимов ускорения было найдено, что параметры магнитного поля и высокочастотной системы фазотрона обеспечивают, в основном, транспортировку и ускорение пучка от инъекции до зоны вывода^{/11, 14/}.

Для согласования фазового объема пучка с акцептансом ускорителя по синхротронным колебаниям выполнены расчеты необходимой коррекции фазового движения как за счет модуляции амплитуды и частоты ускоряющего напряжения во времени, так и модификацией среднего магнитного поля^{/27/}.

Эксперименты на ускорителе по диагностике пучка во всем диапазоне радиусов по гамма- и нейтронному излучению, образуемому при взаимодействии пучка с мишенью пробника, показали, что потери пучка в

процессе ускорения практически отсутствуют (рис. 10)^{/23/}.

Физический пуск фазотрона продемонстрировал правильность концепций, заложенных при его конструировании.

Вывод пучка из камеры ускорителя разбирается в восьмой главе работы. Численное моделирование процесса раскочки радиальных колебаний с учетом фазового движения и для экспериментального распределения магнитного поля в зоне конечных радиусов показывает, что на основе регенеративного метода обеспечивается необходимый заброс пучка на вход отклоняющего канала (рис. 11) при сохранении аксиального размера пучка^{/26/}.

Результаты экспериментального исследования системы заброса согласуются с расчетными представлениями и указывают на возможность получения коэффициента вывода частиц из камеры ускорителя свыше 50%^{/26/}. Высокая эффективность временной растяжки пучка (теоретически 100%) может быть обеспечена за счет согласования параметров С-электрода как с основной ускоряющей системой, так и с системой регенеративной раскочки^{/15, 23/}.

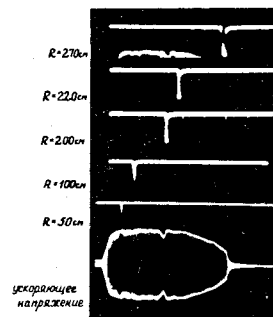


Рис. 10.

Оциллограммы импульса n - и γ -излучений.

Результаты экспериментального исследования системы заброса согласуются с расчетными представлениями и указывают на возможность получения коэффициента вывода частиц из камеры ускорителя свыше 50%^{/26/}. Высокая эффективность временной растяжки пучка (теоретически 100%) может быть обеспечена за счет согласования параметров С-электрода как с основной ускоряющей системой, так и с системой регенеративной раскочки^{/15, 23/}.

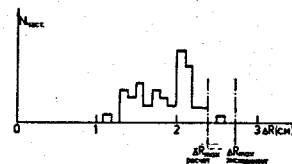


Рис. 11.

Распределение частиц по забросу.



Рис. 12.

Автографы пучка при изменении радиального положения возбуждителя (R_p) и регенератора (R_r).

Зависимость максимального набора энергии в С-электроде ΔW_{mc} от величины фазового объема пучка A_n для различных режимов ускорения и растяжки приведена на рис. 13.

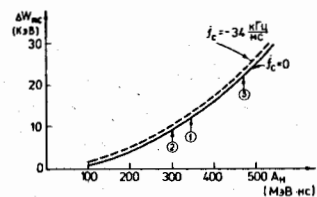


Рис. 13.

Режим растяжки. 1 — перезхват из предварительно остановленного пучка (ППОП). 2 — перезхват из сепаратрисы дуантной программы (ПСДП). 3 — ПСДП для оптимальной зависимости частоты ускоряющего напряжения от времени.

Увеличение эффективности заброса на вход в канал до 90% и улучшение качества выведенного пучка может быть достигнуто за счет электродинамического метода заброса частиц с применением электростатического дефлектора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

На основе созданного нового научного направления — численного моделирования динамических процессов в ускорительных установках со стационарным магнитным полем — решены следующие научные и прикладные задачи.

1. Проведено внедрение в ОИЯИ программного обеспечения для решения двумерных магнитоэлектростатических полей на базе программных систем TRIMA (разработана в ОИЯИ для ЭВМ БЭСМ-6), POISSON (адаптирована для ЭВМ CDC-6500) и POISCR (адаптирована для ЭВМ ЕС-1055).

2. Выполнен расчет магнитных полей системы корректирующих токовых обмоток циклотрона У-120М с точностью 10^{-2} по отношению к вкладу поля обмоток и 10^{-4} по отношению к основному полю.

3. Проведены с точностью $5 \cdot 10^{-3}$ расчеты двумерного распределения магнитного поля в пределах сердечника спектрометра НА-4 на этапах проектирования магнита и первоначальной обработки физической информации.

4. Построена численная модель расчета трехмерных конфигураций радиально-секторных и спирально-секторных магнитов на основании двумерной конечно-разностной методики, что позволило определить предварительные параметры магнитной системы суперциклотрона.

5. Разработан вычислительный алгоритм и создана система программ ELSYS для расчета трехмерных электростатических полей альтернирующим методом Шварца и двумерных электростатических полей методом граничных интегральных уравнений. Система программ была использована для численного моделирования конфигурации электродов в центре циклотрона У-120М и фазотрона ОИЯИ и для восстановления магнитного поля в рабочем объеме

ме 100 см водородной пузырьковой камеры ЛВЭ по данным измерения на граничной поверхности.

6. Создано программное обеспечение для расчета пространственных магнитоэлектростатических полей методом объемных интегральных уравнений (система программ MAGSYS, разработанная в ОИЯИ, и система программ GFUN3D, адаптированная на CDC-6500) и методом конечных элементов в дифференциальной постановке (программа MAGNA, разработанная в ОИЯИ)/6,29/

7. Выполнены расчеты распределения магнитного поля для ряда трехмерных конфигураций циклотронных магнитных систем ("теплый" магнит мощного нейтронного генератора, миланский циклотрон со сверхпроводящими обмотками, спирально-секторная структура дейтронного комплекса).

8. Проведено расчетное формирование поля сверхпроводящей радиально-секторной магнитной системы дейтронного циклотрона на 90 МэВ. Расчетные данные положены в основу создания технического проекта установки.

9. Полученное методом конечных элементов пространственное распределение магнитного поля спектрометра НА-4 используется в настоящее время как опорное для программ обработки данных в эксперименте.

10. Разработан комплекс вычислительных программ FATRON для анализа динамики движения пучка заряженных частиц в ускорителях с пространственной вариацией магнитного поля /11/

11. Проведено численное моделирование процесса инжекции и перехода в режим ускорения пучка фазотрона ОИЯИ с учетом поперечного и продольного движения и в реальных пространственных электрических и магнитных полях, включая собственное поле частиц. Результаты расчетов были использованы при создании новой теоретической концепции фазотронного захвата пучка, анализе магнитного и ускоряющего полей и в процессе экспериментов с пучком.

12. Выполнены расчеты различных режимов ускорения пучка фазотрона. Рассмотрены возможности коррекции фазового движения за счет изменения параметров магнитного поля и ускоряющей системы.

13. Проведен анализ системы регенеративной раскочки радиальных колебаний частиц для вывода пучка из камеры ускорителя в условиях реального распределения магнитного поля, измеренного в зоне конечных радиусов, и с учетом фазового движения частиц. Результаты расчетов использовались при экспериментальном исследовании системы раскочки на ускорителе. Осуществлен вывод пучка из камеры фазотрона с эффективностью 50-70%.

14. Определены параметры системы временной растяжки пучка при выводе из камеры установки. По результатам расчета спроектирована и испытана система растяжки на базе С-электрода.

15. Рассмотрены возможности электродинамического вывода пучка из камеры ускорителя.

Проведенные исследования в сочетании с тщательной экспериментальной проверкой результатов показывают, что численный эксперимент является надежным и эффективным, а часто и единственным способом анализа и оптимизации различных систем ускорителей с пространственной вариацией магнитного поля.

Л и т е р а т у р а

1. Ворожцов С.Б. Методы расчета магнитостатических полей. В кн.: Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц (Дубна, 11-20 сентября 1984). ОИЯИ Д9-84-817, Дубна, 1984, стр. 120-129.
2. Akishin P.G., Vorozhtsov S.B., Zhidkov E.P. Calculation of the magnetic field of the isochronous cyclotron sector magnet by the integral equation method. In: Proc. of Compomag, Grenoble, 1978, paper 1,3.
3. Odinec M., Vorozhtsov S.B., The Magnetic Field of a Uniformly Magnetized Polyhedral Iron, JINR, E9-8811, Dubna, 1975.
4. Banchev V.Ts., Vorozhtsov S.B. On the Computation of Three-Dimensional Magnetostatic Fields by the integral Equation Method. In: Proc. of COMPOMAG, Oxford, 31 March - 2 April 1976, p. 81.
5. Акишин П.Г., Ворожцов С.Б., Жидков Е.П. Численные эксперименты по применению метода интегральных уравнений к решению трехмерных магнитостатических задач. В кн.: Труды совещания по программированию и математическим методам решения физических задач (Дубна, сентябрь 1977). ОИЯИ, Д10, 11-11264, Дубна, 1977.
6. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б. и др. MAGSYS - комплекс программ по расчету трехмерных магнитостатических полей для циклотронных и синхротронных магнитных систем. ОИЯИ, Б1-9-85-232, Дубна, 1985.
7. Ворожцов С.Б. Расчет поля тороидального магнита методом конечных элементов. ОИЯИ, Р9-83-90, Дубна, 1983.
8. Ворожцов С.Б. Расчет трехмерных электростатических полей методом сеток. ОИЯИ, Р9-6755, Дубна, 1972.
9. Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. Расчет трехмерных электростатических полей методом сеток. В кн.: Труды Совещания по программированию, математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, Д10-7707, Дубна, 1974, стр. 159.
10. Акишин П.Г., Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. К расчету двумерных электростатических полей методом граничных интегральных уравнений. ОИЯИ, 9-83-2, Дубна, 1983.

11. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. Анализ динамики пучка для сформированного магнитного поля фазотрона ОИЯИ. В кн.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий. Киев, "Наукова Думка", 1982, стр. 55. ОИЯИ, Р9-81-71, Дубна, 1981.
12. Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. Параметры орбит в центральной области фазотрона ОИЯИ. Ускорение микробанча. ОИЯИ, Р9-83-658, Дубна, 1983.
13. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П. Численное моделирование фазотронного захвата пучка для установки "Ф". В кн.: Труды УП Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981, т. II, стр. 59. ОИЯИ, Р9-80-410, Дубна, 1980.
14. Vorozhtsov S.B., Dmitrievsky V.P. Calculation of Beam Injection and Modes of Acceleration for the JINR Phasotron. IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-28, N 3, 1981, p. 2395.
15. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. Расчет оптимальных режимов временной растяжки пучка синхротрона при помощи С-электрода. ОИЯИ, Р9-12577, Дубна, 1979.
16. Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н., Заплатин Н.Л. Расчет полей токовых обмоток для изохронного циклотрона У-120М. ОИЯИ, Б1-9-10998, Дубна, 1977.
17. Ворожцов С.Б. Расчет С-образного магнита методом сеток. ОИЯИ, Р9-9216, Дубна, 1975.
18. Банчев В.Ц., Ворожцов С.Б. и др. Предварительные результаты расчета магнитной системы суперциклотрона. ОИЯИ, Р9-9848, Дубна, 1976.
19. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н. Расчет сверхпроводящих магнитных систем ускорителей методом объемных интегральных уравнений. ОИЯИ, Р9-83-753, Дубна, 1983.
20. Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н. Расчеты трехмерных магнитостатических полей по программе GFUN3D. ОИЯИ, 9-81-304, Дубна, 1981.
21. Vorozhtsov S.B. et al. Computer Studies of the Field for the Superconducting Magnetic System of the Deuteron Cyclotron DC-1. Journ. de Physique, C1, N1, v. 45, 1984, p. C1-893.
22. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Онищенко Л.М. Бамповый режим в центральной области фазотрона ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-84-25, Дубна, 1984.
23. Аленицкий Ю.Г., ..., Ворожцов С.Б. и др. Фазотрон ОИЯИ - физический пуск. В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 16-18 октября 1984), т. I, стр. 289, ОИЯИ, Дубна, 1985.

24. Ворожцов С.Б. и др. Интенсивность пучка фазотрона ОИИИ. В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 16-18 октября 1984 г.), т. I, стр. 308. ОИИИ, Дубна, 1985 г.
25. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Онищенко Л.М. Резонансная фазировка пучка фазотрона. В сб: Краткие сообщения ОИИИ, № 7-85, Дубна, 1985, с.27.
26. Ворожцов С.Б. и др. Предварительные исследования регенеративной системы заброса пучка фазотрона ОИИИ. ОИИИ, Р9-84-594, Дубна, 1984.
27. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. Расчет параметров системы растяжки пучка установки "Ф" при помощи С-электрода. ОИИИ, Р9-12882, дубна, 1979.
28. Ворожцов С.Б., Шакун И.Г. Параметры орбит в центральной области фазотрона ОИИИ. Аксиальное движение. ОИИИ, Р9-83-719, Дубна, 1983.
29. Svach J., Ilyushchenko V.I., Savin I.A., Vorozhtsov S.B. Magnetic Field Calculations of the NA4 Muon Spectrometer. In: Czechoslovak journal of Physics, vol. B31, N7, 1981, p. 709; JINR, E11-80-258, Dubna, 1980.

цитируемая литература других авторов:

1. Armstrong et al. The Solution of 3D Magnetostatic Problems Using Scalar Potentials. RL-78-088 (1978).
2. Доинников И.И. Результаты математического моделирования полей и оптимизации параметров магнитных систем. НИИЭФА, обзор ОБ-42, Ленинград, 1981.
3. Meijerink J.A., Van der Vorst H.A. An Iterative Solution Method for Linear Systems of Which the Coefficient matrix is a Symmetric M -matrix. Math. of Comput. vol. 31, 137 (1977), p. 148-162.
4. Zienkiewicz O.C., Kelly D.W., Bettess P. The coupling of the Finite Element Method and Boundary Solution Procedures. Int. J. Num. Meth. Eng. 11, 1977, pp. 355-376.
5. Дмитриевский В.П. Мезонные фабрики, ОИИИ, Р9-9341, дубна, 1975, стр. 168.
6. Schulte W.L., Hagedoorn H.L. The Theory of Accelerated Particles in Cyclotrons. Nucl. Instr. and Meth., vol. 171 (1980) 409-437.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 января 1986 года.