

B-751

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2007-45

На правах рукописи
УДК 621.384.6

ВОРОЖЦОВ
Алексей Сергеевич

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ОСОБО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ В ЦИКЛОТРОНАХ
И ДЕТЕКТОРАХ ЧАСТИЦ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико–математических наук
Онищенко Леонид Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук
Сычевский Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук
Михайлов Владимир Афанасьевич

Ведущая организация: Петербургский институт ядерной
физики им. Б.П.Константинова, РАН,
г.Гатчина Ленинградской области

Защита состоится «22» мая 2007 г. в «15⁰⁰» часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном институте ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан «09» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ю.А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Циклотрон – один из первых ускорителей зараженных частиц, который благодаря своим качествам (простота, надежность, низкая стоимость и т.д.) сохранил свое положение до сих пор во многих областях применения. В настоящее время насчитывается большое количество работающих установок этого типа во многих областях промышленности и науки, в широком диапазоне энергий и интенсивности ускоренных частиц. Естественно, сложно обсуждать в подробностях все такие применения и мы ограничимся лишь рассмотрением случаев, близких к теме данной работы.

В частности, в последнее время очень большое значение получило применение циклотронов в медицинских целях: производство медицинских радиоизотопов и (протонная) терапия. Для этих целей широкое применение получили компактные специализированные циклотроны, ориентированные на ускорение одного типа частиц. Типичными представителями таких машин являются установки фирмы IBA (Бельгия), где ускоряются, как правило, отрицательные ионы водорода с последующей их перезарядкой на обдирочной фольге при 100% выпуске пучка протонов для дальнейшего использования вне ускорителя. Фирма выпускает циклотроны с различными максимальными энергиями пучка в диапазоне от нескольких МэВ до сотен МэВ и интенсивностями от десятков наноампер до сотен микроампер.

Однако в последнее время вновь вернулись к идее построения многоцелевых циклотронов для ускорения различных типов частиц с варьируемой конечной энергией, что позволяет более оперативно реагировать на быстроизменяющиеся требования к производству наиболее оптимальных и востребованных в данный период времени изотопов (M. Qaim : "Low energy cyclotron is not always adequate for production purposes. A medium-sized multiparticle machine may be more useful for production of new and emerging radionuclides") /1*/. Примером такой машины может служить циклотрон VINCY (Белград, Сербия) /2*/.

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

Отдельная область применения циклотронов связана с вопросами обнаружения взрывчатых веществ при проверке грузов в аэропортах и других общественных местах в рамках борьбы с терроризмом. Этой тематике посвящаются отдельные международные форумы, типа недавно состоявшейся в Швейцарии Гордоновской конференции /3*/. Примером такой машины может служить Таможенный циклотрон, разрабатываемый в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова, ОИЯИ по заказу Лос Аламовской лаборатории (США) /4*/.

Естественно, что и традиционные исследования в области ядерной физики также продолжают проводиться с применением циклотронных установок /5*/.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-тематическим планом ЛЯП им. В.П.Джелепова, ОИЯИ.

Цель реферируемой работы состоит в разработке магнитных систем компактных циклотронов на основе современных компьютерных моделей, а также при помощи экспериментального формирования магнитного поля на магните циклотрона.

Для эксперимента АТЛАС (LHC, CERN) была поставлена задача определения воздействия различных конструкций на основное магнитное поле установки.

Научная новизна работы

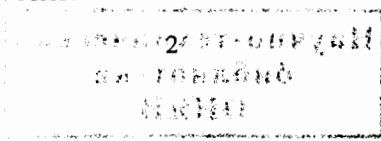
1. Впервые сформировано магнитное поле циклотрона VINCY исключительно на основе численного моделирования пространственных магнитных полей, включая наиболее сложную для формирования центральную область установки (отсутствие секторов, универсальность магнитной пробки при перестройке поля, ограниченное пространство для размещения магнитной структуры, системы внешней инжекции и измерения магнитного поля). Изохронизация магнитных полей при различных уровнях тока основной обмотки циклотрона при помощи концентрических обмоток также базировалась только на расчетных вкладах полей этих обмоток.

2. Создание магнитной структуры циклотрона VINCY на базе имевшегося к началу работ магнита.
3. Впервые была разработана магнитная структура уникального по параметрам таможенного циклотрона на энергию ионов H^- 1.75 МэВ, используемого в установке для обнаружения взрывчатых веществ.
4. Численное моделирование магнитного поля уникальной магнитной структуры эксперимента АТЛАС, LHC, CERN, состоящей из 3-х тороидальных и одной соленоидальной сверхпроводящих обмоток, а также магнитопровода возвратного потока, являющегося частью тайл калориметра с его особой формой анизотропии активной зоны, определяемой множеством отверстий для сцинтилляторов, расположенных в шахматном порядке (ферромагнитная среда $\approx 8 \times 12$ м², отверстия ≈ 4 мм, воздушные зазоры ≈ 50 мкм). Получены распределения как основного магнитного поле детектора, так и вклада конструктивных ферромагнитных элементов установки.

Практическая ценность работы

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

1. Базовая установка многоцелевого комплекса TESLA (Винча институт ядерных наук, Белград, Сербия) - изохронный циклотрон VINCY. Циклотрон предназначен для ускорения и вывода пучков ионов в диапазоне $Z/A=0.15 \div 1$.
2. Таможенный циклотрон - источник 1.75 МэВ протонов (H^- ионов), используемый в установке для обнаружения взрывчатых веществ.
3. Циклотроны для протонной терапии, физические обоснования которых разработаны в НЭОНУ ЛЯП ОИЯИ. В одном из них ускоряются H^- ионы до энергии 190 МэВ, в другом – протоны до энергии 230 МэВ.
4. Циклотрон RIKEN/CNS AVF (Япония), реконструируемый для производства изотопов.



5. Многоцелевой эксперимент АТЛАС, сооружаемый для исследования протон-протонных взаимодействий при сверхвысоких энергиях (до 14 ТэВ) Большого адронного коллайдера (LHC), в том числе детального изучения физики топ-кварка, поиска бозонов Хиггса, суперсимметричных частиц и новых физических явлений.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на следующих форумах:

- International Conferences on Cyclotrons and Their Applications: CYCLOTRONS 2001, East Lansing, Michigan, USA; May 12th-17th, 2001; CYCLOTRONS 2004, Tokyo, Japan, October 17 - 22, 2004.
- XLVI ETRAN Conference, Banja Vrućica – Teslić, June 4-7, 2002, Serbia and Montenegro.
- European Cyclotron Progress Meetings: ECPM-2002, Poland, September 17-21, 2002; ECPM-2005, October 6-8, 2005. Belgrade; ECPM 2006, November 2-4, 2006, Nice, France.
- Scientific seminars in memory of V.P.Sarantsev: 26-28 сентября 2001; г 23-24 September 2003; Dubna.
- Russian Accelerator Conferences: RuPAC-2004, October 4-9, 2004, Dubna; RuPAC-2006, Novosibirsk, Russia, September 10 - 14, 2006.
- PNPI Winter Schools on Nuclear and Particle Physics, St.-Petersburg, Repino: March 2-6, 2003; February 14 – 19, 2005.
- XI Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 10-14 октября 2005.
- XIX International Workshop on Charged Particle Accelerators. September 12-18, 2005, Ukraine, Alushta, the Crimea.
- Technical Workshops on the Development a High-Explosives Screening System Based on Nuclear Resonance Absorption (NRA) of 9.17-MeV Gamma Rays in Nitrogen: 2004, Dubna; August 3-5, 2005, Moscow, Russia.

- ATLAS Magnetic Field Workshops: March 31 – April 1, 2005; November 2-3, 2005; March 7, 2006; CERN. Geneva, Switzerland.
- Information Meetings on the TESLA Accelerator Installation, Belgrade, Serbia and Montenegro, 2003, 2004.
- Meetings of the TESLA Advisory Committee, Belgrade, Serbia and Montenegro, 2003, 2004.
- Научные семинары ЛЯП и ЛЯР ОИЯИ, циклотронного центра RIKEN (Япония), циклотронного отдела ИЯФ (Краков), на совещаниях сотрудничества ATLAS (ЦЕРН).

Публикации

По теме диссертаций опубликовано 30 работ; основные результаты содержатся в 25 печатных работах, приведенных в списке литературы (в том числе, в реферируемых журналах).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **введении** рассматриваются перспективы развития универсальных изохронных циклотронов с пространственной вариацией магнитного поля, обзор действующих и проектируемых машин.

В **первой главе** дан обзор моделей и программ, применяемых для расчета электромагнитных полей, методов формирования магнитных полей, а также рассматривается значение вычислительного эксперимента при разработке и создании ускорителей подобного типа.

Вторая глава посвящена формированию магнитного поля циклотрона VINCY при помощи шиммирующих элементов и корректирующих катушек, сравнению расчета с экспериментальными данными, расчету пондеромоторных сил, выбору параметров ВЧ системы, а также анализу динамических характеристик циклотрона.

В **третьей главе** описывается расчетное формирование магнитного поля таможенного циклотрона.

В четвертой главе приводится анализ воздействия на магнитное поле конструкций детектора ATLAS/LHC

В заключении кратко суммируются основные результаты, полученные в работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются перспективы развития универсальных изохронных циклотронов с пространственной вариацией магнитного поля, обзор действующих и проектируемых машин.

В первой главе дан обзор моделей и программ, применяемых для расчета электромагнитных полей, методов формирования магнитных полей, а также рассмотрена роль вычислительного эксперимента при разработке и создании ускорителей подобного типа.

Сложность поставленной задачи по численному моделированию пространственных магнитостатических полей в первую очередь определяется существенной нелинейностью проблемы. Эта проблема может быть преодолена при помощи созданной в Новосибирском Институте Ядерной Физики программы MERMAID /6*/, которая позволяет вычислять трехмерные статические магнитные поля при задании тех или иных граничных условий. Другой, и не менее важной, проблемой является чрезвычайная сложность магнитной структуры циклотрона [1],[2],[3],[4] с пространственной вариацией магнитного поля, что особенно характерно для центральной области установки, где имеет место сочетание аксиально-симметричной геометрии (магнитная пробка) и секторной структуры. На Рис. 1 показана расчетная сетка в центре циклотрона VINCY, где видна геометрия магнитной пробки и секторов [5], [6], [7].

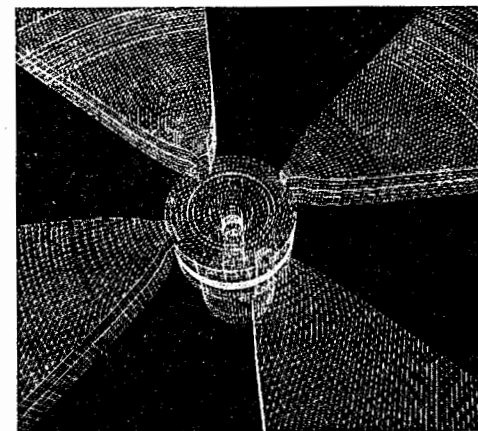


Рис. 1 Компьютерная модель магнитной пробки и секторов в центре магнита циклотрона VINCY, построенная в программе Mermaid

Моделирование /7/ чрезвычайно сложной (с большой спиральностью секторов) магнитной структуры Гатчинского Изохронного Циклотрона (ГИЦ) является другим примером успешного применения программы Mermaid.

Широкое распространение для расчета циклотронных магнитов получила программа Kompot /8*/, /9*/, созданная в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова (Россия, Санкт-Петербург). Программа использовалась при разработке и реконструкции ряда циклотронов (DC72+(модель 1:5), DC60, CC18/9, CC12 и U 400M) Лаборатории ядерных реакции им.Г.Н.Флерова, ОИЯИ, Дубна. Результаты расчетов сопровождалось магнитными измерениями на натуральных моделях и полномасштабных магнитах. В качестве примера можно привести результаты расчета при помощи программы Kompot для DC60 /10*/.

Для расчета полей циклотрона VINCY помимо программы Mermaid была использована также программа Opera3D-Tosca /11*/, которая также применялась и для нахождения пространственного распределения электрических полей в конфигурации электродов ускоряющей системы циклотрона.

В НЭОНУ ЛЯП ОИЯИ в 2003-2005 гг. разработаны физические обоснования 2-х типов циклотронов для протонной терапии. В одном из них [8], [9], [10], /12*/ ускоряются Н⁺ ионы до энергии 190 МэВ, в другом [11], [12], [13] –

протоны до энергии 230 МэВ. Моделирование пространственного магнитного поля специализированного циклотрона для протонной терапии C220P проводилось при помощи программы Opera3D-Tosca. На основе рассматриваемого циклотрона, существующих медицинских кабин и технологии сканирования для получения требуемого радиационного поля, созданных в ЛЯП ОИЯИ, возможно создание терапевтических центров в странах-участниках ОИЯИ.

Анализ динамических характеристик полученных распределений полей производился при помощи известной программы CYCLOPS (MSU) и разработанного недавно для циклотронных применений комплекса программ CBDA (Cyclotron Beam Dynamics Analysis) [13*]. Эффектам пространственного заряда пучка также уделялось особое внимание при анализе динамики частиц [14].

Помимо расчетов полей и оценки их динамических характеристик часто возникает необходимость выполнять сопровождающие расчеты пондеромоторных усилий в системе, моделирование напряженно-деформированного состояния под влиянием магнитных сил, вакуумной нагрузки, веса. Иногда эти расчеты проводятся на линии с магнитными расчетами, выполняя оптимизацию параметров по результатам всех процессов (связанные проблемы).

Современный подход при разработке циклотронов предполагает максимально полное численное моделирование такого объекта, как циклотрон, включает в себя максимально доступное количество вычислительных процессов, таких как, моделирование полей – магнитных и ускоряющих [14*], динамики пучка с учетом пространственного заряда [15*], инженерные вопросы по разделу ‘связанные задачи’ и т.д. Таким образом, имеет место математическое моделирование в его классическом определении: отображение на ЭВМ физического объекта в его существенных особенностях.

Пример моделирования центральной области циклотрона, где одновременно рассматриваются и магнитные и ускоряющие поля, показан на Рис. 2, [16*]. Видно, что в области источник – пуллер применяется подробная расчетная сетка и одновременно осуществляется моделирование всей ускоряющей структуры.

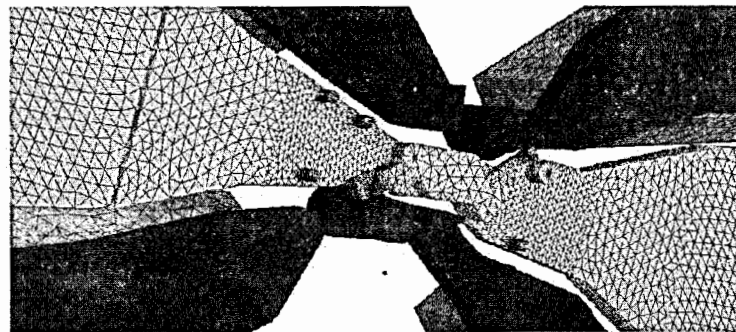


Рис. 2 Пространственная конечно-элементная модель центральной области циклотрона

В настоящей работе было предложено формирование особо сложных пространственных распределений электромагнитных полей, опираясь целиком на численное моделирование на основе современных профессиональных пакетов программ для ЭВМ. При этом для случая магнитостатических полей измерения на полномасштабном магните служили лишь для окончательного подтверждения предлагаемых конфигураций.

Вторая глава посвящена формированию магнитного поля циклотрона VINCY при помощи шиммирующих элементов и корректирующих катушек, сравнению расчета с экспериментальными данными, расчету пондеромоторных сил, выбору параметров ВЧ системы, а также анализу динамических характеристик циклотрона [15].

В Лаборатории физики Винча институте ядерных наук (Белград, Сербия) создается многоцелевой комплекс TESLA, базовой установкой которого является изохронный циклотрон VINCY (Рис. 3). Циклотрон предназначен для ускорения и вывода пучков ионов в диапазоне $Z/A=0.15 \div 1$ с энергиями, определяемыми энергетическим фактором установки 134 МэВ и фокусирующим пределом 73 МэВ [17*], [16].

Основные (тестовые) пучки машины: 15 МэВ H^+ ионы, получаемые при ускорении H^- частиц, 65 МэВ H^+ пучок, получаемый из H^- пучка, 30 МэВ H^+ пучок, получаемый от H_2^+ пучка, 7 МэВ на нуклон $^4He^{2+}$ пучок, получаемый от

$^4\text{He}^+$ пучка, и, наконец, 3 МэВ на нуклон $^{40}\text{Ar}^{15+}$ пучок, получаемый от $^{40}\text{Ar}^{6+}$ пучка. H^- , H_2^+ и $^4\text{He}^+$ ионные пучки будут получены от pVINIS ионного источника, и $^{40}\text{Ar}^{6+}$ пучок - при помощи nVINIS ионного источника. Пучок H^- ионов будет ускоряться на гармонике дуантного напряжения =1, пучок H_2^+ - на гармонике $\text{ВЧ}=2$, и $^4\text{He}^+$ и $^{40}\text{Ar}^{6+}$ пучки - на гармонике = 3 и 4 соответственно.

Система инжекции машины состоит из линии транспортировки пучка от источников ионов pVINIS и nVINIS до центральной области циклотрона, 3-х спиральных инфлекторов, используемых для поворота различных частиц из аксиальной линии инжекции на медианную плоскость установки, системы позиционирования и замены инфлекторов [17] и формирующих и ускоряющих электродов в центральной области [18].

Для вывода пучков заряженных частиц предполагается использовать как обдирочную фольгу, так и электростатический дефлектор. Вывод будет осуществляться с фронтальной и задней стороны магнита [19].

Система измерения магнитного поля базируется на измерительной штанге, изготовленной из титана, вращающейся вокруг центральной оси и смонтированной в нижней части аксиального отверстия магнита [18*].

Автором было создано несколько компьютерных моделей циклотрона. Сравнение результатов расчетов с магнитными измерениями указывает на достаточное для целей формирования поля согласие расчетов и измерений Рис. 4 [20], [21].



Рис. 3. ВЧ система (1) и магнит (2) циклотрона VINCY

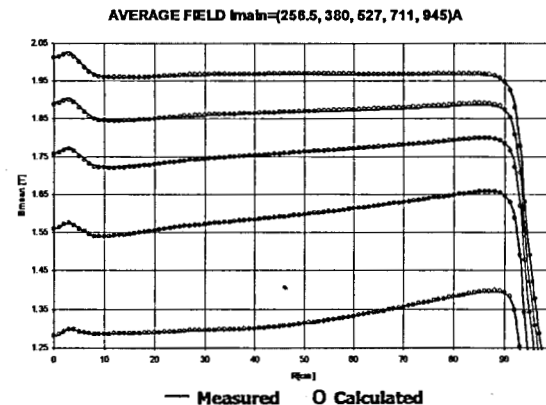


Рис. 4. Расчетные и измеренные распределения среднего поля циклотрона VINCY

Основные задачи, решению которых было посвящено компьютерное моделирование при помощи вышеуказанных моделей, были:

- Расчетное шиммирование поля ферромагнитными элементами.
- Расчеты вкладов концентрических и гармонических корректирующих обмоток и формирование поля при помощи этих обмоток.
- Обнаружение погрешностей изготовления и сборки структурных элементов магнитной системы путем сопоставления расчетных и измеренных полей.

Для решения вышеприведенных проблем потребовалась полная перестройка магнитной структуры циклотрона, выполнявшаяся в несколько этапов последовательным преобразованием исходной системы к окончательно полученной. Реконструкция системы проводилась с учетом ограничений, накладываемых уже существующим к этому времени магнитом, системой измерения магнитного поля, а также имея в виду переориентацию установки на медицинские применения, где ускорению ионов H^- придавалось первостепенное значение.

В новой структуре, в частности, удалось успешно решить проблему формирования поля в центральной зоне, опираясь на численное моделирование

пространственных магнитных полей при помощи вышеописанных компьютерных моделей. Причем, экспериментальный метод проб и ошибок был полностью исключен из рассмотрения. Нужный результат сразу получался при установке структурных элементов расчетной конфигурации ввиду наблюдавшегося совпадения расчетов и измерений с требуемой точностью.

Изохронизация магнитных полей при различных уровнях тока основной обмотки была достигнута экспериментально на основе лишь расчетных вкладов полей концентрических корректирующих обмоток.

Перестройка магнитной структуры, приводящая к изменениям формы секторов, внесла соответствующее перераспределение магнитного потока вблизи медианной плоскости машины, а также заметные изменения сил, действующих на сектора и магнитные пробки. В результате, эти силы вызвали деформацию некоторых болтов, используемых для крепления секторов и магнитных пробок. Оказалось, что эти болты были недостаточно большого диаметра и выполнены из мягкой стали. Радикальная перестройка системы крепления с устранением слабых мест позволила получить устойчивую в механическом отношении структуру [22].

Динамические характеристики полученных распределений магнитных и ускоряющих электрических полей анализировались для 4-х характерных режимов ускорения ионов и были найдены удовлетворительными [23], [24] (Рис. 5).



Рис. 5. Центральная область циклотрона VINCY и орбиты ускоренного пучка ионов H^- . 1-инфлектор, 2-сектор, 3-анти-дуант, 4-дуант, 5-орбита, 6-магнитная пробка

В **третьей главе** описывается расчетное формирование магнитного поля таможенного циклотрона. Использование резонансного поглощения гамма-лучей (GRA) соединяет в себе высокую проникающую способность гамма лучей с хорошей чувствительностью к азотосодержащим взрывчатым веществам. Этот метод используют, в частности, гамма-кванты с энергией 9.17 МэВ, которые испытывают резонансное поглощение в веществах с высокой плотностью ядер азота ^{14}N [19*]. Одним из лучших источников гамма-лучей служит спектр излучения возбужденного ядра ^{14}N , образующегося в результате захвата протона в реакции $^{13}C(p, \gamma)^{14}N$. В установке для обнаружения взрывчатых веществ в качестве источника 1.75 МэВ протонов (H^- ионов) предполагается использовать компактный циклотрон [25]. Общий вид установки показан на Рис. 6. Выбору параметров магнитной системы циклотрона, а также расчету пространственных распределений магнитного поля установки при помощи программы Mermaid и Tosca посвящена третья глава [26].

Магнитная структура циклотрона была выбрана, исходя из заданной конечной энергии H^- ионов = 1.747 МэВ и среднего конечного радиуса ускорения=30см. Эти параметры автоматически определяют величину магнитного поля в центре=0.64 Т и соответствующую частоту обращения ионов=9.7462 МГц. Для получения максимального набора энергии за оборот с помощью двух дуантов угловой протяженности 45 градусов, расположенных в двух противоположных "долинах" радиально-секторной структуры магнита с периодичностью = 4, выбран режим ускорения на 4 гармонике, обеспечивающий максимальное разделение орбит на радиусе вывода пучка. Минимально допустимый аксиальный зазор между секторами =30мм выбран, исходя из аксиального размера пучка с учетом кулоновского расталкивания частиц. Зазор в долинах магнитной структуры выбран = 400 мм для получения максимально возможного флаттера поля и комфортного размещения ВЧ системы.

Для выбранных параметров системы были получены расчетные распределения магнитного поля вдоль линии аксиальной инжекции и в области инфлектора, которые необходимы для проектирования системы аксиальной

инъекции. Кроме того, были выполнены расчеты карт магнитного поля в рабочем диапазоне радиусов и в зоне выводной системы пучка, которые использовались при численном моделировании вывода пучка из камеры ускорителя и для варианта с внутренним источником.

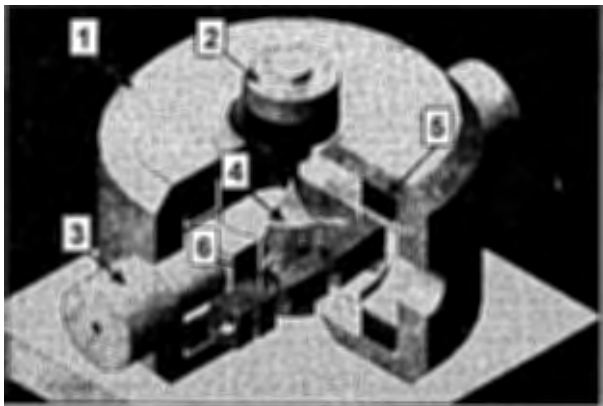


Рис. 6. Таможенный циклотрон. 1-магнит, 2-внешняя инъекция, 3-ВЧ система, 4-сектор, 5-обмотка, 6-дефлектор

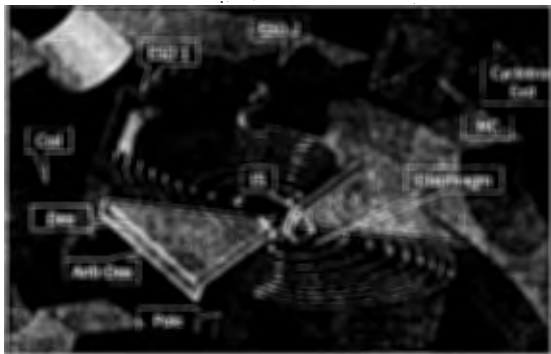


Рис. 7. Ускорение пучка в таможенном циклотроне в варианте с внутренним источником частиц

Расчет ускорения пучка, выполненный в [27], показал, что увеличение аксиальной фокусировки за счет создания спадающего поля в центре (так называемый “бамп” поля) практически не уменьшило потери частиц на первых оборотах. Тем не

менее, было решено оставить бамповую форму магнитного поля для использования ее в будущем для ограничения аксиального размера пучка, применяя улучшенное согласование инжектированного пучка и с учетом возможного искажения магнитного поля в медианной плоскости, которое также влияет на качество пучка и на коэффициент трансмиссии. Динамические характеристики магнитных и ускоряющих полей циклотрона оценивались аналитически и численно для ряда замкнутых равновесных орбит (РО) при помощи программы Cyclops, а также при помощи численного моделирования процесса ускорения пучка [28], [29]. На начальной стадии расчетов использовалась аналитическая аппроксимация пространственного распределения электрического поля в ускоряющем зазоре между дуантом и дуантной рамкой. В последующих расчетах применялась трехмерная расчетная карта ускоряющего поля, полученная автором при помощи программы Mermaid, а затем и при помощи программы Tosca. Результаты расчета динамики пучка (Рис. 7) подтвердили представление о выполнении всех требований, предъявляемых к сформированным при помощи расчетов распределениям магнитного и электрического полей.

В четвертой главе приводится анализ воздействия на магнитное поле конструкций детектора ATLAS/LHC. Установка АТЛАС сооружается для исследования протон-протонных взаимодействий при сверхвысоких энергиях (до 14 ТэВ) Большого адронного коллайдера (LHC), в том числе детального изучения физики топ-кварка, поиска бозонов Хиггса, суперсимметричных частиц и новых физических явлений [20*].

Вид детектора, установленного в экспериментальном зале в месте встреч пучков (LHC, point 1), показан на фото Рис. 8.

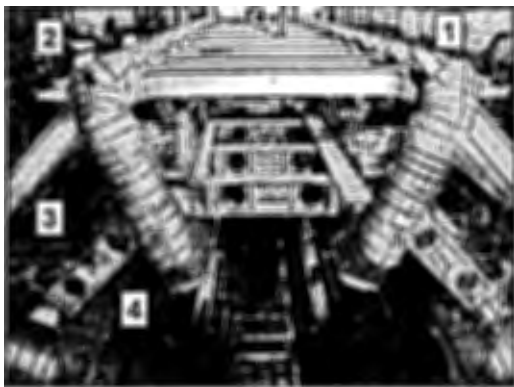


Рис. 8 Фото эксперимента АТЛАС. 1-НС структура, 2- ВТ- обмотка, 3-МДТ камера, 4-рабочий

Формирование магнитного поля эксперимента АТЛАС при помощи сверхпроводящих обмоток позволяло оптимизировать его конфигурацию для анализа траекторий частиц в различных детекторах. При этом использовалась легкая (по количеству материала на траекториях частиц) и открытая конструкции магнитной системы, что позволяло минимизировать эффекты рассеяния частиц в элементах этой конструкции. Однако в процессе разработки детектора стала ясна неизбежность применения более дешевых и надежных структур из ферромагнитных материалов.

Естественно, на этапе проектирования установки прилагались все усилия для минимизации возмущения основного магнитного поля от этих вкраплений [30]. Тем не менее, устранить эти возмущения так и не удалось, и возникла задача детального изучения соответствующих распределений с тем, чтобы можно было их учесть в основной карте поля при восстановлении треков регистрируемых частиц. С этой целью автором проводились подробные расчеты вкладов полей от различных ферромагнитных элементов, а также магнитные измерения в отдельных точках для проверки и калибровки результатов численного моделирования. Результаты этих исследований приведены в четвертой главе диссертации.

В процессе работ автором был создан ряд компьютерных моделей отдельных структур. В качестве примера можно привести полную модель торцевых областей спектрометра (Рис. 9), включающую в себя следующие элементы:

- платформа (HF) и стол для юстировки положения радиационной защиты;
- торцевая защита (JF);
- защита, устанавливаемая внутри торцевых тороидов с учетом недавно одобренного замещения бронзы на сталь (JTT).

Пример сравнения измерений поля вблизи так называемой 'гибкой цепи' с расчетами по программе Tosca показан на Рис. 10. С учетом различных геометрических характеристик расчетной модели и реальных размеров при измерении поля согласие расчетов и измерений можно считать удовлетворительным, а с точки зрения предъявляемых требований к анализу возмущений поля и достаточным.

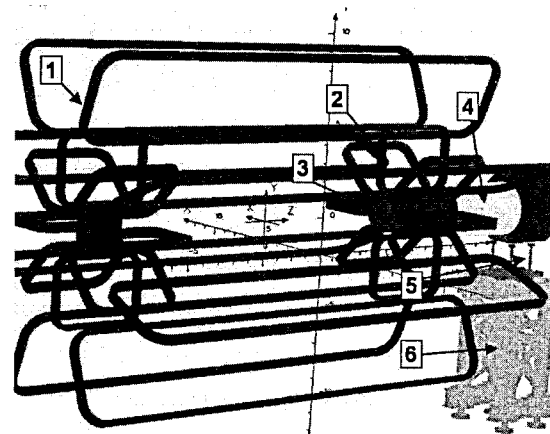


Рис. 9 Компьютерная модель торцевой области эксперимента АТЛАС. 1-ВТ обмотка, 2-ЕСТ-обмотка, 3-JTT, 4-JF, 5-стол для юстировки, 6-HF.

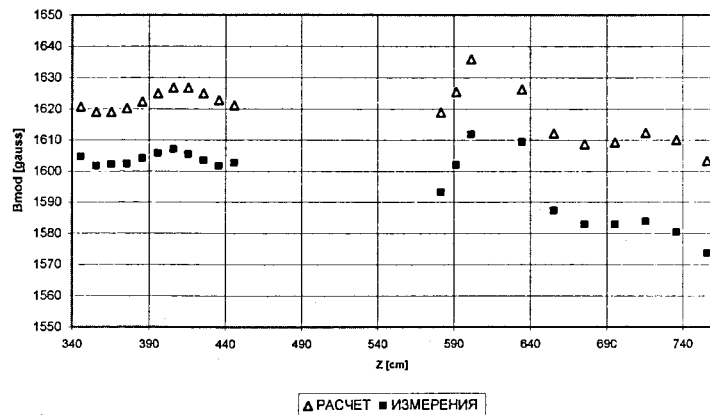


Рис. 10 Магнитное поле эксперимента АТЛАС с учетом вклада от ферромагнитных структур в области датчика холла N 3 в зависимости от продольной координаты Z

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Впервые сформировано магнитное поле циклотрона VINCY исключительно на основе численного моделирования пространственных магнитных полей, включая наиболее сложную для формирования центральную область установки (отсутствие секторов, универсальность магнитной пробки при перестройке поля, ограниченное пространство для размещения магнитной структуры, системы внешней инжекции и измерения магнитного поля). Изохронизация магнитных полей при различных уровнях тока основной обмотки циклотрона при помощи концентрических обмоток также базировалась только на расчетных вкладах полей этих обмоток.
2. Выполнены расчеты вкладов в магнитное поле концентрических корректирующих катушек для всех уровней основного поля и проведено сравнение с измерениями для тока основной обмотки 256.5А циклотрона VINCY.

3. Разработан комплекс программ для формирования требуемого среднего магнитного поля циклотронов при помощи концентрических корректирующих катушек.
4. Изохронизация магнитных полей циклотрона VINCY при различных уровнях тока основной обмотки была достигнута экспериментально на основе лишь расчетных вкладов полей концентрических корректирующих обмоток.
5. В результате принятых мер для подавления низших гармоник магнитного поля в измеренных данных получена приемлемая величина первой гармоники в диапазоне рабочих полей циклотрона VINCY.
6. Динамические характеристики полученных распределений магнитных и ускоряющих электрических полей циклотрона VINCY анализировались для 4х характерных режимов ускорения ионов и были найдены удовлетворительными с точки зрения условия изохронизма и аксиальной фокусировки пучка.
7. Предложены и реализованы меры по креплению секторов и магнитных пробок, что существенно улучшило ситуацию с механической стабильностью магнитной структуры циклотрона VINCY при включенном магнитном поле.
8. Создана магнитная структура циклотрона VINCY на базе имевшегося к началу работ магнита.
9. При помощи численного моделирования пространственных полей получены параметры магнитной структуры, определены размеры, и форма электродов электростатических секций дефлектора таможенного циклотрона. Найдены соответствующие распределения электромагнитных полей для анализа динамики ускоренного пучка циклотрона,
10. Анализ динамических характеристик полученных распределений полей таможенного циклотрона показал, что оно соответствует требуемым значениям.
11. Впервые была разработана магнитная структура уникального по параметрам таможенного циклотрона на энергию ионов H^- 1.75 МэВ, используемого в установке для обнаружения взрывчатых веществ.
12. Создан набор компьютерных моделей для расчета влияния конструктивных ферромагнитных элементов на магнитное поле детектора ATLAS, LHC.

Решена сложнейшая проблема создания модели тайл калориметра детектора ATLAS с его особой формой анизотропии активной зоны, определяемой множеством отверстий для сцинтилляторов, расположенных в шахматном порядке. Подготовленный набор компьютерных моделей принят сотрудничеством АТЛАС в качестве официального, используемого как для сравнения с измерениями, так и генерации магнитного поля детектора.

13. Выполнено численное моделирование магнитного поля уникальной магнитной структуры эксперимента АТЛАС, LHC, CERN, состоящей из 3-х тороидальных и одной соленоидальной сверхпроводящих обмоток, а также магнитопровода возвратного потока, являющегося частью тайл калориметра с его особой формой анизотропии активной зоны, определяемой множеством отверстий для сцинтилляторов, расположенных в шахматном порядке (ферромагнитная среда $\approx 8 \times 12$ м², отверстия ≈ 4 мм, воздушные зазоры ≈ 50 мкм). Получены распределения как основного магнитного поле детектора, так и вклада конструктивных ферромагнитных элементов установки.
14. Результаты расчетов применялись для программ реконструкции регистрируемых событий в эксперименте ATLAS, в частности при оценке акцептанса детектора.
15. Измерено магнитное поле детектора ATLAS и проведено его сравнение расчетными данными. Согласие результатов с учетом имеющейся неопределенности исходных данных моделей по отношению к параметрам реально установленных объектов, а также погрешностей в измерениях оказалось удовлетворительным.

Цитируемая литература

- 1*. M. Qaim, 'New cyclotron radionuclides for nuclear medicine', XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.
- 2*. N. Nešković, A. Dobrosavljević and J. J. Čomor, 'Status report on the TESLA Project', XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.

3*. Th. Kwan. Discussion on 'Recent developments with currently deployed and next generation bulk detection systems, including CT, XRD, neutron-based detection, and image and density analysis. Applications in cargo and checked baggage screening, and other new R&D areas were highlighted. 2005 GRC on Detecting Illicit Substances: Explosives & Drugs. August 28 - September 2, 2005. Les Diablerets Conference Center, Les Diablerets, Switzerland.

- 4*. L.M. Onischenko. "Investigation of Possible Improvements of the Quality of the Beam Accelerated in the Customs Cyclotron." Technical Workshop on the Development a High-Explosives Screening System Based on Nuclear Resonance Absorption (NRA) of 9.17-MeV Gamma Rays in Nitrogen. August 3-5, 2005, Moscow, Russia.
- 5*. D. Guillemaud Mueller, 'Strategic plan for nuclear physics research in Europe', XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.
- 6*. Dubrovin A.N. User's guide MERMAID: Magnet design in two and three dimensions, SIM Limited, Novosibirsk department. Russia, 1994, p. 3-60.
- 7*. Abrossimov N.K. et al., Proc. of the XIII Intern. Conf. On cyclotrons and their applications, Canada, Vancouver, 1992, p. 58-61.
- 8*. V. Kukhtin, E. Lamzin and S. Sytchevsky, 'Magnetic field formation in cyclotrons on the basis of 3D numerical simulations'. XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.
- 9*. S. Sytchevsky et al, "Numerical Technology for design, development & measurements of magnet systems in Cyclotrons". XXXV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2006), November 2-4, 2006.
- 10*. I.A.Ivanenko. 'Design of cyclotron DC 60 magnetic field (Astana, Kazakhstan)'. Lectures of PNPI School Accelerator Physics and Technics (St.Petersburg, Repino, February 15 - 19, 2006).
- 11*. OPERA/TOSCA Reference Manual. Vector Fields Limited.
- 12*. Ю.Г. Аленицкий, и др. "Циклотрон для лучевой терапии". Сообщение ОИЯИ P9-2005-32. Журнал "Прикладная физика", N5-2005, стр. 50-54.
- 13*. E.E.Perepelkin and S.B.Vorozhtsov. 'CBDA. Cyclotron Beam Dynamics Analysis'. User's Guide, version from 28.10.2004.

14*. L. Stingelin et al. 'BEAM-CAVITY INTERACTION SIMULATION FOR THE PSI RING-CYCLOTRON'. CYCLOTRONS 2004. The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, October 17 - 22, 2004.

15*. L. A. Adelman et al "RECENT RESULTS ON SIMULATIONS OF HIGH INTENSITY BEAMS IN CYCLOTRONS". CYCLOTRONS 2004. The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, October 17 - 22, 2004.

16*. W. Kleeven. 'Extraction and Injection'. Lectures given at the CAS course on: Small Accelerators (Zeegse, 24 May - 2 June 2005).

17*. N. Nešković, A. Dobrosavljević and J. J. Čomor, «Status report on the TESLA Project». XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), Belgrade, October 6-8, 2005.

18*. B. Ćizmić et al. "Magnetic field measurement system of the VINCY Cyclotron". Eighteenth Information Meeting on the TESLA Accelerator Installation. Seventh Meeting of the TESLA Advisory Committee. September 26 - 27, 2003, Belgrade, Serbia.

19*. V.A.Mashinin et al. Review of the Possibilities of Gamma-Resonance method of HE Detection.

20*. ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN. CERN/LHCC/94-43. LHCC/P2. 15 December 1994.

Список работ опубликованных по теме диссертации

1. А.С.Ворожцов и др. "Расчет магнита циклотрона-инжектора для фазотрона ОИЯИ". Сообщение ОИЯИ, Р9-2000-116, ОИЯИ, Дубна, 2000.

2. А.С. Ворожцов и др.. "Расчет магнитного поля циклотрона-инжектора для фазотрона ОИЯИ". Сообщение ОИЯИ, Р9-2001-194, ОИЯИ, Дубна, 2001.

3. А.С. Ворожцов и др.. "Эффекты продольного пространственного заряда пучка в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ". Сообщение ОИЯИ, Р9-2001-195, ОИЯИ, Дубна, 2001.

4. Ю.Г. Аленицкий, А.С. Ворожцов и др. 'Сильноточный циклотрон-инжектор для Фазотрона ОИЯИ'. Письма в ЭЧАЯ. 2005. N.3 (126). С. 24. Part. and Nucl., Lett. 2005. No. 3[126]. P. 24.

5. S.B.Vorojtsov, A.S.Vorojtsov et al. "Magnetic field simulation in the central region of the VINCY Cyclotron". XXXIII European Cyclotron Progress Meeting. Poland, September 17 - 21, 2002. Nukleonika 2003, vol. 48, supplement 2, p.S39.

6. S. B. Vorozhtsov, ...A. S. Vorozhtsov et al. "Final shaping of the magnetic structure of the VINCY Cyclotron". CYCLOTRONS 2004. The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, October 17 - 22, 2004, p.390.

7. A. S. Vorozhtsov et al, 'Magnetic field of the VINCY Cyclotron', XXXV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2006), Nice, November 2-4, 2006.

8. Alenitsky Yu.G. ... Vorozhtsov A.S. et al, Cyclotron for beam therapy application. RuPac-2004. XIX RUSSIAN CONFERENCE ON CHARGED PARTICLE ACCELERATORS. October 4-9, 2004, Dubna, Russia, p.150.

9. Yu. G. Alenitsky, ...A. S. Vorozhtsov et al. 'Variable Energy Cyclotron for Proton Therapy Application'. Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, N.1(124). С. 84-95. Part. and Nucl., Lett. 2005. No. 1[124]. P. 84.

10. Ю.Г.Аленицкий, ..., А.С. Ворожцов и др., "Циклотрон с регулируемой энергией для протонной терапии". Сообщение ОИЯИ, Р9-2004-32, ОИЯИ, Дубна, 2004.

11. Ю.Г. Аленицкий, ...А.С. Ворожцов и др.. "Циклотрон для лучевой терапии С220р (магнитная система)" XI Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 10-14 октября 2005, p228-232, ICAA'05 proc. SPbUniv. 2005. ISBN 5-9651-0132-5.

12. Ю. Г. Аленицкий, ...А. С. Ворожцов и др. 'Возможности циклофонов по генерации пучков для протонной терапии'. Письма в ЭЧАЯ. 2005. N.3 (126). С. 39. Part. and Nucl., Lett. 2005. No. 3[126]. P. 39.

13. Yu. G. Alenitsky, ... A.S. Vorozhtsov et al. 'Specialized cyclotron for proton therapy application'. The XX Russian Accelerator Conference (RuPAC2006), Novosibirsk, Russia, September 10 - 14, 2006.
14. S.B. Vorozhtsov, A.S. Vorozhtsov, T. Mitsumoto, A. Goto, Y. Yano. "Beam Space Charge Simulation in RIKEN SRC". ISSN 1346-2431, RIKEN-AF-AC-36, August 2002.
15. A.S. Vorozhtsov et al, "Focusing Limit of a Cyclotron: Betatron Instability..." Int. Sci. J. "Nuclear Technology and Radiation Protection", XXI, No.2 p.40, 2006.
16. N. Nešković, ... A.S. Vorozhtsov et al. "Status report on the VINCY Cyclotron". XXXIII European Cyclotron Progress Meeting. Poland, September 17 - 21, 2002. Nukleonika 2003, vol. 48, supplement 2, p.S135.
17. P. Beličev, ... A. S. Vorozhtsov et al, "Influence of the horizontal component of the magnetic field on the ion beam dynamics in a spiral inflector", XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.
18. P. Beličev, ... A. S. Vorozhtsov et al "Ion beam dynamics in the central region of the VINCY Cyclotron", XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.
19. J. Ristić-Đurović, ... A. S. Vorozhtsov et al. "Foil stripping extraction systems of the VINCY Cyclotron". CYCLOTRONS 2004. The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, October 17 - 22, 2004, p.453.
20. С. Ђирковић, ... А. С. Ворожцов et al, Калибрација симулационог МОДЕЛА МАГНЕТА Циклотрона ВИНЦИ", Zbornik radova XLVI Konf za ETRAN, Banja Vrućica – Teslić, 4-7 juna 2002, tom IV – Proc. XLVI ETRAN Conference, Banja Vrućica – Teslić, June 4-7, 2002, vol. IV.
21. S. Ćirković, ... A.S. Vorozhtsov et al, "Calibration of the simulation model of the VINCY Cyclotron Magnet", Int. Sci. Journ. "Nuclear Technology and Radiation Protection", 1-2/2002, (2202) Vol. XVII, p.13. VINCA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Yugoslavia.

22. S. B. Vorozhtsov, ... A.S. Vorozhtsov et al, "Forces within the magnetic structure of the VINCY Cyclotron". XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), October 6-8, 2005.
23. S.B. Vorozhtsov, ... A.S. Vorozhtsov et al, 'Ion beam dynamics simulations for the VINCY Cyclotron'. The XX Russian Accelerator Conference (RuPAC2006), Novosibirsk, Russia, September 10 - 14, 2006.
24. E.E. Perepelkin, ... A.S. Vorozhtsov et al, "Ion beam dynamics in the VINCY Cyclotron". XXXV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2006), November 2-4, 2006.
25. L.M. Onischenko, ... A.S. Vorozhtsov, et al. "Development of Compact Cyclotron for Explosives Detection by Nuclear Resonance Absorption of Gamma-Rays in Nitrogen". RuPac-2004. XIX RUSSIAN CONFERENCE ON CHARGED PARTICLE ACCELERATORS. October 4-9, 2004, Dubna, Russia, p.126.
26. A.S. Vorozhtsov et al. "Magnetic Field Simulation in the Customs Cyclotron". RuPac-2004. XIX RUSSIAN CONFERENCE ON CHARGED PARTICLE ACCELERATORS. October 4-9, 2004, Dubna, Russia, p.138.
27. S.B. Vorozhtsov, ... A.S. Vorozhtsov. "Dynamical Properties of the Electromagnetic Field of the Customs Cyclotron". RuPac-2004. XIX RUSSIAN CONFERENCE ON CHARGED PARTICLE ACCELERATORS. October 4-9, 2004, Dubna, Russia, p.135.
28. E.V. Samsonov, A.S. Vorozhtsov et al. "BEAM DYNAMICS IN THE CUSTOMS CYCLOTRON WITH INTERNAL ION SOURCE". In: Proc. of the XIX International Workshop on Charged Particle Accelerators. September 12-18, 2005, Ukraine, Alushta, the Crimea.
29. Evgeny Perepelkin, Alexey Vorozhtsov et al. 'BEAM DYNAMICS SIMULATIONS FOR THE CUSTOMS CYCLOTRON'. The XX Russian Accelerator Conference (RuPAC2006), Novosibirsk, Russia, September 10 - 14, 2006.
30. S.B. Vorozhtsov, A.S. Vorozhtsov et al. "ATLAS Cavern Magnetic Field Calculations". Communication of the JINR, E9-2000-47, Dubna, 2000.