ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2005–48
На правах рукописи

Ткаченко Леонид Михайлович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2005

УДК 621.384.6 М-24

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино)

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ К.П. Мызников (г. Протвино).

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук В.Е. Балакин (ФТЦ ФИАН, г. Протвино), доктор физико-математических наук А.Д. Коваленко (ОИЯИ, г. Дубна), доктор технических наук В.С. Высоцкий (ВНИИКП, г. Москва).

Ведущая организация – Институт сверхпроводимости и физики твердого тела (ИСФТТ) РНЦ "Курчатовский институт" (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____”_____ 2006 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142280, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01 Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2005

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Широкое распространение для исследования микромира получили ускорители заряженных частиц, энергия которых за последние 40 лет растет практически экспоненциально. Одним из основных элементов подавляющего большинства кольцевых ускорителей заряженных частиц на большие энергии является магнитная система, составляющая до 60% общей стоимости всей машины. Постоянно растущие требования в физических экспериментах к увеличению энергии ускорителей, их интенсивности, повышению светимости в коллайдерных режимах, росту темпа набора энергии в процессе ускорения и пр. приводят к необходимости разработки новых проектов ускорителей заряженных частиц на высокие и сверхвысокие энергии (УНК, SSC, LHC, VLHC, Neutrino Factory, Muon Collider, GSI) и модернизации существующих рабочих установок (Tevatron, HERA). В большинстве случаев новые магнитные системы предъявляют требования к физическим параметрам, превосходящие те, что имелись в предыдущих системах. Это приводит к необходимости поиска новых решений, использованию новых материалов и пр.

Конструкция магнитных систем должна обеспечить высокую однородность поля в апертуре, хорошую повторяемость при массовом производстве, стабильность всех магнитных характеристик в процессе ускорения, минимальную стоимость системы (в том числе и эксплуатационную стоимость), высокую надежность и работоспособность в различных режимах. Разработка магнитных систем непрерывно сопровождается математическим моделированием, позволяющим резко сократить расходы на создание различных элементов и системы в целом, выявить ряд проблем, требующих дополнительного исследования, найти оптимальные решения, упростить конструкцию, повысить ее эффективность, сократить эксплуатационные расходы и т.д.

Цель диссертационной работы – разработка сверхпроводящих магнитных систем для крупных проектов ускорителей типа УНК, GSI (SIS300), а также для модернизации работающих ускорителей, в частности Tevatron. Для решения этих задач были разработаны методы расчета нелинейных трехмерных магнитных полей, на основе которых создано соответствующее программное обеспечение. Разработаны методики, позволяющие обеспечить необходимую точность и воспроизведение качества магнитного поля в процессе массового производства.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Основные характеристики сверхпроводящих диполей и квадруполей УНК, их особенности. Разработка методов коррекции качества магнитного поля в процессе массового производства на основе анализа результатов измеренных магнитных характеристик опытно-промышленной партии сверхпроводящих диполей.
2. Разработка конструкции магнитной системы Tevatron Electron Lens, установленной на ускорителе Tevatron.
3. Оптимизированная конструкция квадруполя с высоким градиентом поля. Основным элементом конструкции квадруполя является сверхпроводящая обмотка из Nb_3Sn. Магнит имеет независимо подавленные нелинейности поля и интеграла поля и может с успехом применяться в новых проектах ускорителей заряженных частиц, в частности, в участках встреч коллайдеров.
4. Исследование и оптимизация геометрий магнитных систем для четырех каналов Neutrino Factory.
5. Сверхпроводящий диполь, создающий быстроциклирующие магнитные поля, который имеет рекордные параметры по скорости изменения поля, на порядок превышающие существующие аналоги. Минимизация тепловых потерь в таком магните существенно снижает эксплуатационные расходы. Предложенная автором конструкция этого сверхпроводящего диполя принята за основу для моделирования прототипа дипольного магнита, используемого в последней ступени SIS300 разрабатываемого в GSI (Дармштадт) нового комплекса ускорительного комплекса для ускорения тяжелых ионов.
6. Программное обеспечение для расчета магнитных характеристик и оптимизации геометрии магнитных систем произвольной трехмерной конфигурации с учетом реальной зависимости магнитной проницаемости от поля.

Научная новизна

1. Параметры сверхпроводящих диполей УНК, изготовленных в ИФВЭ, и сегодня позволяют им конкурировать с аналогичными магнитами, разрабатываемыми в других лабораториях мира.
2. Магнитная система Tevatron Electron Lens, представленная в диссертации, разработана и изготовлена в ИФВЭ. Это – уникальная конструкция, состоящая из 7 сверхпроводящих и 12 теплых магнитов. Данная система позволяет провести пучок электронов над пучком антипротонов в местах встреч ускорителя Tevatron и ослабить кулоновское возмущение, вызванное пучком протонов. Предусмотрена регулировка как траектории, так и поперечной формы электронного пучка.
3. Оптимизированная конструкция квадруполя с высоким градиентом поля, разработанная автором, использует обмотку из Nb_3Sn с геометрией, в которой впервые в мире были независимо подавлены нелинейности поля и интеграла поля. Минимизация поля на лобовых частях квадруполя позволила резко повысить градиент в центральной части и увеличить эффективную длину магнита.
4. Разработка магнитных систем и предложенные автором алгоритмы минимизации поля в магнитах соленоидальных каналов Neutrino Factory открыли возможность создания сверхпроводящих магнитных систем на основе Nb_3Sn с требуемыми параметрами. Проведен анализ использования в обмотках ВТСП для повышения амплитуды поля.
5. Сверхпроводящий диполь, создающий быстроциклирующие магнитные поля, имеет рекордные параметры по скорости изменения поля, на порядок превышающие существующие аналоги. Предложенная автором конструкция выбрана для моделирования прототипа дипольного магнита, предназначенного для использования в качестве основного элемента магнитной структуры SIS300. Конструкция обладает минимальными тепловыми потерями, что существенно снижает эксплуатационные расходы.
6. Разработанные автором методы оптимизации трехмерной геометрии сверхпроводящих магнитов по быстродействию на несколько порядков превосходят зарубежные аналоги, что дает возможность проведения глубокого анализа при поиске наиболее оптимальной конструкции с точки зрения качества поля.

Практическая ценность работы

- Исследования и разработки, проведенные автором, применены для изготовления магнитных систем, работающих в действующих ускорителях Tevatron, HERA [1], на установке Tesla Test Facility [2]. Автором создано уникальное программное обеспечение, с помощью которого разработаны

магнитные системы, принятые за основу в проектах ускорителей УНК, Neutrino Factory, SIS300.

- Магнитная система Tevatron Electron Lens, представленная в диссертации, разработана и изготовлена в ИФВЭ. Она установлена на ускорителе Tevatron и успешно эксплуатируется в течение нескольких лет. С помощью этой системы удалось улучшить параметры пучков протонов и антипротонов ускорителя, работающего в коллайдерном режиме.
- Конструкция квадруполя с высоким градиентом поля, разработанная автором, использует обмотку из Nb_3Sn и может с успехом применяться в новых проектах ускорителей заряженных частиц, в частности, в участках встреч коллайдеров.
- Предложенная автором конструкция сверхпроводящего диполя, создающего быстроциклирующие магнитные поля, принята за основу для моделирования прототипа дипольного магнита в качестве главного элемента магнитной структуры в последней ступени SIS300 разрабатываемого в GSI (Дармштадт) нового ускорительного комплекса для ускорения тяжелых ионов.
- Предложенные автором методы оптимизации и созданное программное обеспечение с успехом можно применять при конструировании магнитных систем в любой области науки и техники, например при разработке магниторезистивного томографа для медицинских целей [3].

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- научных семинарах ИФВЭ, FNAL, GSI, DESY;
- всесоюзных и российских совещаниях по ускорителям заряженных частиц в Дубне (1989; 1992; 2004 гг.), Протвино (1994, 1996; 1998, 2000 гг.), Обнинске (2002 г.);
- европейских конференциях по ускорителям в Берлине (1992 г.), Лондоне (1994 г.), Стокгольме (1998 г.), Париже (2002 г.), Люцерне (2004 г.), Генуе (2005 г.);
- национальных конференциях США по ускорителям в Далласе (1995 г.), Чикаго (2001 г.), Сан–Франциско (2003 г.), Ноксвилле (2005);
- международных ускорительных конференциях в Цукубе (1992 г.) и Гамбурге (1992 г.);
- Международной конференции по прикладной сверхпроводимости в Джексонвилле (2004 г.);
- международных конференциях по магнитным технологиям в Цукубе (1989 г.), Ленинграде (1992 г.), Пекине (1997 г.), Женеве (2001 г.), Мориоке (2003 г.), Генуе (2005 г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1] – [27] в виде препринтов ИФВЭ и FNAL, статей в российских (“Атомная энергия” и “Электротехника”) и иностранных (“Nuclear Instruments & Methods”) журналах, а также в сборниках трудов соответствующих конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 160 наименований. Объем диссертации без списка литературы составляет 260 страниц, в том числе 136 рисунков и 85 таблиц. Список основных научных работ, представляющих важнейшие результаты диссертации, составляет 26 наименований.

Содержание работы

В первой главе приводятся описание основного программного обеспечения, разработанного автором, а также основные формулы и представления поля и интеграла поля, которые будут использованы далее. Комплекс программ, включающий в себя пакет программ MULTIC [4] и программу HARM-3D [5], дает возможность расчета практически всех характеристик трехмерных магнитных полей любой конфигурации и произвольной трехмерной геометрии. Предложенные алгоритмы минимизации поля и оптимизации геометрии позволяют уменьшить процессорное время счета на несколько порядков по сравнению с аналогичными программами, имеющимися в других лабораториях мира.

Разработанное программное обеспечение с успехом может применяться в любых отраслях науки и техники для создания систем, в состав которых входят магнитные элементы.

Во второй главе приведены основные характеристики диполей и квадруполей УНК, результаты испытаний опытно-промышленной партии полномасштабных диполей УНК [6] – [7] и трех полномасштабных квадруполей УНК [9]. Проведенный статистический анализ результатов магнитных и геометрических измерений позволил сформулировать методы коррекции качества поля в процессе массового производства магнитов. Сравнение параметров сверхпроводящего магнита УНК с другими аналогичными конструкциями, разработанными в научных лабораториях мира, показывает, что и сегодня эта конструкция не потеряла актуальности. Сверхпроводящий диполь УНК не уступает, а в некоторых случаях и превосходит по своим характеристикам другие сверхпроводящие диполи аналогичного класса, что позволяет использовать эту конструкцию в качестве базовой для разработки новых перспективных магнитов следующего поколения.

Система коррекции УНК состоит из диполей, квадруполей и секступолей. Проведенный анализ показал, что магнит с совмещенными обмотками обладает рядом недостатков, и предпочтительнее использовать раздельные магниты типа

«суперферрик». В результате численного исследования магнитных характеристик, проведенной оптимизации качества поля и минимизации веса магнитов выбрана оптимальная конструкция магнитов, удовлетворяющая требованиям системы коррекции [12]. Система коррекции по сравнению с аналогичной системой, основанной на мультипольных корректорах, имеет более простые системы управления, питания и охлаждения. Конструкция магнитов типа «суперферрик» более технологична, что удешевляет их производство, и имеет расход сверхпроводящего материала в 1.6 раза меньше по сравнению с мультипольными корректорами.

Важные результаты были получены при разработке диполя с повышенной передаточной функцией. На основе конструкции диполя УНК с минимальной доработкой был разработан, изготовлен и испытан диполь с номинальным полем 6 Тл и скоростью нарастания поля 0.28 Тл/сек [13]. Полученные результаты подтверждают, что разработанная конструкция диполя УНК имеет большой запас надежности и может быть взята за основу для дальнейших разработок дипольных магнитов с более критическими параметрами.

В третьей главе рассматривается соленоидальная магнитная система. Для компенсации кулоновского взаимодействия протон-антипротонных пучков на Tevatron предложен эксперимент Beam-Beam Compensation (BBC). Идея эксперимента заключается в использовании пучка электронов для компенсации возмущения пучка антипротонов, вызванного зарядом пучка протонов. В результате должен уменьшиться разброс бетатронных частот, что приведет к уменьшению потерь пучка антипротонов и, в итоге, к увеличению светимости Tevatron.

Для проведения пучка электронов вдоль всей трассы, начиная от электронной пушки и кончая электронным коллектором, в ИФВЭ разработана и изготовлена магнитная система Tevatron Electron Lens (TEL) [14] – [15]. Она состоит из основного сверхпроводящего соленоида длиной 2.5 м, внутренней апертурой 152 мм и максимальным рабочим полем 6.5 Тл. Над соленоидальной обмоткой размещаются 6 сверхпроводящих диполей для управления траекторией электронного пучка. Все сверхпроводящие магниты расположены в одном криостате. Электронная пушка и коллектор помещены в отдельные резистивные соленоиды, в которых дополнительно размещены корректирующие теплые обмотки, которые можно коммутировать как два диполя, или как один квадруполь. После модернизации магнитной системы в нее было добавлено еще шесть резистивных поворотных соленоидов [16]. Уникальная магнитная система позволяет работать в разных режимах магнитного поля. TEL установлена в Tevatron и работает в течение нескольких лет. Эксперименты на ней продолжаются, но уже получен ряд положительных результатов.

В четвертой главе рассмотрены конструкции магнитов на основе Nb_3Sn. Для повышения светимости в ускорительно–накопительных комплексах необходимо увеличение силы квадрупольных магнитов в участках встреч. Использова-

ние материала NbTi ограничивает силы квадруполя из-за того, что поле на обмотке может превысить область допустимых рабочих полей для данного материала. Использование Nb_3Sn для обмотки позволяет существенно увеличить градиент квадруполя. Требования к качеству поля в 70-мм апертуре квадруполя достаточно жесткие. Нелинейности как поля, так и интеграла поля не должны превышать 1×10^{-4} на радиусе нормализации 25 мм.

В предложенной конструкции [17], [18] были независимо подавлены нелинейности поля в центральном сечении и нелинейности краевого поля. В итоге, нелинейности интегрального поля также были минимизированы. Вдобавок, форма лобовых частей обеспечила величину магнитного поля в них, не превышающую соответствующую величину в центральном сечении, что позволило иметь максимальную эффективную длину магнита. Следует отметить, что на момент разработки этого квадруполя критическая плотность тока Nb_3Sn J_C была равна 0.55 кА/мм^2 в поле 12 Тл при 4.2 К, при которой разработанная конструкция позволяет достичь рекордной величины градиента поля в 220 Тл/м. К настоящему времени J_C увеличена в 4–5 раз, что дает возможность повысить градиент выше 250 Тл/м и использовать такую конструкцию в участках встреч коллайдеров.

Проект Neutrino Factory (NF) возник как прототип проекта Muon Collider. Тем не менее, NF сам по себе является достаточно сложной машиной, требующей при разработке применения новых нестандартных решений. Основу NF составляют четыре соленоидальных канала [19], и параметры каждого из них сильно отличаются. Во всех каналах будут использоваться сверхпроводящие соленоиды, исходя из экономических расчетов и ограничений на габаритные размеры.

Первый канал не представляет больших проблем для разработок. Длина его равна 50 м при апертуре от 30 до 70 см и номинальным рабочим полем от 1.25 до 3 Тл. После проведения экономических и стоимостных расчетов было выбрано минимальное поле 1.25 Тл. Второй канал имеет большую апертуру от 1.5 до 2 м с центральным полем 1.25 Тл. Параметры третьего канала практически совпадают со вторым, но его длина равна 100 м. Наиболее сложным для разработок оказался четвертый канал длиной 100 м и апертурой от 1.5 до 2 м. В нем необходимо создать синусоидальное продольное поле с амплитудой от 3.4 до 5 Тл. При этом в обмотке соленоидов возникают сильные магнитные поля вплоть до 20 Тл. После проведения оптимизации геометрии удалось снизить максимальное поле в обмотке до уровня ниже 8.5 Тл, что позволило технически решить создание этого канала на основе использования сверхпроводящего материал Nb_3Sn.

Во всех каналах особое внимание было обращено на расчет пондеромоторных сил и запасенной энергии, достигающих достаточно больших величин. Для предотвращения разрушения обмотки из-за больших пондеромоторных сил в четвертом канале предложено использовать бронированный сверхпроводящий

кабель. Для повышения амплитуды магнитного поля рассмотрена возможность использования ВТСП материала из Bi2223.

В настоящее время в GSI (Дармштадт) разрабатывается новый ускорительный комплекс, предназначенный для ускорения тяжелых ионов, в частности U^{+28}, U^{+92}. Последняя ступень этого комплекса SIS300 основана на сверхпроводящих диполях, создающих быстроциклирующие магнитные поля. Амплитуда магнитного поля в таком магните равна 6 Тл, а скорость нарастания поля во время ускорения – 1 Тл/сек. **В пятой главе** рассматривается разработка конструкции сверхпроводящего диполя с требуемыми параметрами. Первоначально апертура магнита была равна 80 мм, что соответствовало апертуре магнита диполей УНК. После проведенной работы автором было показано, что конструкция диполей УНК с успехом может быть принята за основу нового диполя. При этом необходимо использовать новый токонесущий элемент, оптимальные параметры которого были определены на этой стадии разработок.

После этой итерации требования к физическим экспериментам на SIS300 были расширены, что вызвало необходимость увеличения апертуры по обмотке до 100 мм. При этом конструкция диполя существенно усложнилась. Для выбора оптимальной геометрии с целью снижения тепловых потерь в магните автором были проанализированы три возможные конструкции, отличающиеся в основном толщиной бандажа. Первая из них имела бандаж с толщиной, обеспечивающей удержание всех сил, возникающих в обмотке. Во второй конструкции толщина бандажа была уменьшена, и бандаж предназначался только для сборки и захолаживания обмоточного блока. Далее все пондеромоторные силы будут восприниматься магнитопроводом. В третьей конструкции бандаж отсутствует, и все его функции выполняет магнитопровод. При приближении магнитопровода к обмотке вклад в центральное поле от него увеличивается, при этом уменьшается рабочий ток в обмотке и снижаются тепловые потери в магните. Но увеличивается насыщение магнитопровода, что приводит к большому искажению поля. Конструкция магнита также усложняется. Температурный запас всех конструкций превышал 0.5 К, что близко к диполям УНК и SSC.

При анализе и исследовании магнитных характеристик автором были предложены дополнительные условия оптимизации геометрии поперечного сечения и лобовых частей, при выполнении которых подавлялись низшие нелинейностей поля и интеграла поля, интегрированные по времени ускорения частиц. Это позволит снизить нагрузку на системы коррекции.

После численного моделирования и анализа полученных зависимостей как компромисс вышеперечисленных преимуществ и недостатков за основу была выбрана вторая конструкция с бандажом, предназначенным для сборки магнита и его захолаживания. В этой главе представлены также пути понижения тепловых потерь в обмотке и возможные методы повышения температурного запаса магнита. Автором показано, что для каждой конструкции существует оптималь-

ный диаметр СП-провода, минимизирующий потери в обмотке. Повышать температурный запас гораздо экономичнее за счет понижения входной температуры гелия, чем за счет увеличения объема сверхпроводника путем увеличения числа проволок в кабеле.

После длительных обсуждений с разработчиками SIS300 и международным комитетом было принято решение повысить температурный запас до 1 К путем увеличения числа проволок в кабеле и оставить в качестве резерва возможность понижения температуры входного гелия. При этом число проволок возросло до 36, что соответствует числу проволок в кабеле, применяемом для наружного слоя сверхпроводящих диполей LHC. Конструкция этого кабеля была принята за основу. Использование не полностью кистоунированного кабеля существенно усложнило конструкцию магнита. При разработке этой конструкции автору удалось комбинацией параметров толщины магнитопровода и радиуса отверстия для обратного потока II-фазного гелия независимо подавить низшие нелинейности поля и интеграла поля, проинтегрированные по времени ускорения частиц.

В **Заключении** подводятся итоги проведенных автором исследований и разработок.

В диссертации представлены разработанные методы формирования магнитных полей в сверхпроводящих магнитах для ускорителей заряженных частиц. Обобщены методики аналитических и численных расчетов, обеспечивающие получение качества магнитного поля с высокой точностью. Разработаны методы, позволяющие производить коррекцию геометрии магнитов в процессе их изготовления и обеспечить воспроизводимость характеристик при массовом производстве. Установлена корреляция результатов магнитных измерений, проведенных при комнатной температуре и температуре жидкого гелия.

На основе результатов магнитных измерений, выполненных при комнатной температуре, предложены методы коррекции магнитного поля в процессе массового производства, которые позволяют оперативно исправить случайные ошибки при изготовлении дипольных магнитов. Показано, что сортировка полуобмоток дает возможность улучшить качество магнитного поля и повторяемость при массовом производстве. Определено минимальное число полуобмоток, необходимое для проведения сортировок и получения надежных результатов.

Сравнение параметров сверхпроводящего магнита УНК с другими аналогичными конструкциями, разработанными в научных лабораториях мира, показывает, что и сегодня эта конструкция не потеряла свою актуальность. Сверхпроводящий диполь УНК не уступает, а в некоторых случаях и превосходит по своим характеристикам другие сверхпроводящие диполи аналогичного класса, что позволяет использовать эту конструкцию в качестве базовой для разработки новых перспективных магнитов следующего поколения.

Магнитная система Tevatron Electron Lens, представленная в диссертации, разработана и изготовлена в ИФВЭ. Она установлена на ускорителе Tevatron и

успешно эксплуатируется в течение нескольких лет. С помощью этой системы удалось повысить светимость ускорителя. Кроме того, эта система позволяет сдвигать бетатронные частоты протонного пучка, что полезно при настройке параметров машины в целом.

Представленная работа по разработке конструкции сверхпроводящего квадруполя с высоким градиентом поля была сделана в 1998 г. За прошедшее время в развитии свойств материала Nb_3Sn произошел большой прогресс. Изменились как технология производства, так и качественные характеристики материала Nb_3Sn. Достаточно сказать, что критическая плотность тока Nb_3Sn за это время возросла с 0.55 до 3 кА/мм^2 при стандартных условиях (поле 12 Тл, температура 4.2 К). Учитывая это обстоятельство, все критические параметры, включая градиент поля и критическую температуру магнита, можно повысить довольно существенно. Это позволяет утверждать, что конструкция квадрупольного магнита до сих пор не потеряла своей актуальности, и в настоящий момент является конкурентоспособной среди существующих и разрабатываемых конструкций в других лабораториях мира.

Оптимизированная конструкция квадруполя с высоким градиентом поля, разработанная автором, использует обмотку из Nb_3Sn, имеет независимо подавленные нелинейности поля и интеграла поля и может с успехом применяться в новых проектах ускорителей заряженных частиц, в частности, в участках встреч коллайдеров.

Проведен предварительный выбор геометрий магнитных систем для четырех каналов проекта Нейтринной фабрики, что позволило провести предварительную оценку стоимости проекта, включая стоимость разработок магнитных систем, их изготовление и эксплуатацию. Некоторые геометрические и магнитные параметры систем были оптимизированы, и были определены их оптимальные значения. Окончательная стоимость проекта может быть определена только после разработки детальных чертежей. Видно, что основную часть стоимости каналов составляет стоимость сверхпроводящих магнитов, и львиная доля приходится на Drift Channel. Разумеется, проведена только первая итерация, и для завершения всех разработок необходимо продолжать работы в тесном сотрудничестве с разработчиками сопутствующих систем, таких как резонаторы, линейный ускоритель, системы защиты магнитов, источники тока и пр. При этом необходимо проводить большой цикл не только магнитных расчетов, но также и расчетов механики и тепловых расчетов.

Сверхпроводящий диполь, создающий быстроциклирующие магнитные поля, имеет рекордные параметры по скорости изменения поля, на порядок превышающие существующие аналоги. Минимизация тепловых потерь в таком магните существенно снижает эксплуатационные расходы. Оригинальная форма магнитного экрана позволяет подавить интегралы низших нелинейностей поля в процессе ускорения пучка. Предложенная автором конструкция этого сверхпроводящего диполя принята за основу для моделирования прототипа дипольного

магнита, используемого в последней ступени SIS300 разрабатываемого в GSI (Дармштадт) нового комплекса ускорительного комплекса для ускорения тяжелых ионов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

[1] Parker B., Smirnov N.L., **Tkachenko L.M.** Development of Septum Quadrupole Prototype for DESY. Препринт ИФВЭ 98-55, Протвино, 1998. NIM, A 434 (1999) pp. 297-302.

[2] Бахер Р., Курнаев О.В., Милов П.А., Милова Н.В., Смирнов Н.Л., Сычев В.А., **Ткаченко Л.М**. Разработка и испытание квадрупольных магнитов для Tesla-Test Facility. Труды. XV Вс. сов. по УЗЧ. - ИФВЭ, Протвино,1996, т.2, с.158.

[3] Барбашев Э.В. Матвейчук П.А. Рубинраут А.М., **Ткаченко Л.М**. Магнитное поле магниторезонансного томографа с постоянными магнитами. - Электротехника, 8, 1995, с. 47.

[4] **Ткаченко Л.М.** Пакет программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной конфигурации. Препринт ИФВЭ 98-28, Протвино 1998**.**

[5] Purtov S.V, **Tkachenko L.M.** HARM-3D - a Code to Calculate Magnetic Characteristics of SC Magnets. Proc. of 15 Int. Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, October 20-24. 1997. Science press, Beijing, China, Vol. 1, pp. 1335-1338.

[6] Балбеков В.И., Герцев К.Ф., Злобин А.В., **Ткаченко Л.М**., Мызников К.П., Петренко И.И., Смирнов Н.Л., Чирков П.Н.. Анализ результатов магнитных измерений опытно промышленной партии СП диполей УНК. Труды. XIII Вс. сов. по УЗЧ. - ОИЯИ, Дубна, 1992, т.2, с. 331-336.

[7] Balbekov V.I., Gertsev K.F., Myznikov K.P., Petrenko I.I., Smirnov N.L., **Tkachenko L.M**., Zlobin A.V. Magnetic Field Quality in the Pilot Industrial Batch's of the SC dipoles of the UNK. Proc. XV Int. Conf on High Energy Accelerators, IPAC'92, Hamburg, July 1992, V.2, p.632. Балбеков В.И., Герцев К.Ф., Злобин А.В., Мызников К.П., Петренко И.И., Смирнов Н.Л., **Ткаченко Л.М**., Чирков П.Н. Качество магнитного поля в опытно-промышленной партии СП-диполей УНК. Препринт ИФВЭ 92-69, Протвино 1992.

[8] Ageev A.I., Andreev N.I., Balbekov V.I., Chirkov P.N., Dolzhenkov V.I., Gertsev K.F., Gridasov V.I., Myznikov K.P., Smirnov N.L., Sychev V.A., Sytnik V.V., Tarakanov N.M., **Tkachenko L.M.**, Vasiliev L.M., Zinchenko S.I.,

Zlobin A.V. Results on Testing Pilot Industrial Batch of SC Magnets for the UNK. Proc. of European Particle Accelerator Conference EPAC'1992, Berlin, Germany, March 1992, pp. 1411-1413.

[9] Andreev N.I., Chirkov P.N., Gertsev K.F., Gridasov V.I., Myznikov K.P., Sytnik V.V., **Tkachenko L.M.**, Trofimov S.V., Zinchenko S.I., Zlobin A.V. Development and Study of the Superconducting Quadrupole Magnet for the UNK. Proceed. of European Particle Accelerator Conference EPAC'1994, London, 1994, Vol.3, p.p.2280-2282. London, June, 1994.

[10] Chirkov P., Gertsev K., Gridasov V., Myznikov K., Sytnik V., Sychev V., **Tkachenko L.**, Zinchenko S., Zlobin A.. Development and Study of the UNK Superconducting Magnets. Proc. of 1993 Particle Accelerator Conf., Washington, USA, May 12-16, 1993, Vol.4, p. 2772-2774.

[11] Korablev V.M., **Tkachenko L.M.** Calculation of Magnetic Fields Using Surface Currents and Law of Full Current Conservation. Препринт ИФВЭ 95-44, Протвино, 1995. NIM, A 378 (1996) 620-623.

[12] Васильев Л.М., Козуб С.С., Мызников К.П., Сытник В.В., Ткаченко Е.В., **Ткаченко Л.М.**, Чирков П.Н. Сверхпроводящие корректирующие магниты УНК. Труды XVI Вс. сов. по УЗЧ. - ИФВЭ, Протвино, 1998, стр. 53.

[13] Васильев Л.М., Гридасов В.И., Козуб С.С., Мызников К.П. Слабодчиков П.И., Сытник В.В., **Ткаченко Л.М**, Трофимов С.В. Сверхпроводящий дипольный магнит с повышенной передаточной функцией. Труды. XV Вс. сов. по УЗЧ. - ИФВЭ, Протвино, 1996, т.2, с. 98.

[14] Bogdanov I., Kashtanov E., Kozub S., Kuznetsov G., Pleskach V., Sery A., Shiltsev V., Sytnik V., **Tkachenko L.**, Zintchenko S., Zubko V.. Tevatron Electron Lens Magnetic System. Proc. of 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001, pp.3630-3633. SLAC-PUB-9011, FERMILAB-CONF-01-153.

[15] Bogdanov I., Kozub S., Pleskach V., Sytnik V., Shcherbakov P., Tikhov A., **Tkachenko L.**, Zintchenko S., Zubko V., Bishofberger K., Hively R., Krafzcyk G., Kuznetsov G., Martinez A., Pfeffer H., Shiltsev V., Solyak N., Wolff D. Test Results of the Magnetic System for the Tevatron Electron Lens. Proc. of European Particle Accelerator Conference EPAC 2002, Paris, France, 2002, pp.2433-2435.

[16] Zhang X., Crisp J., Fitzgerald J., Kuznetsov G., Olson M., Pfeffer H., Saewert G., Semenov A., Shiltsev V., Solyak N., Wildman D., Bishofberger K., Kashtanov E., Kozub S., Sytnik V., Tiunov M., **Tkachenko L.** Upgrades of the Tevatron Electron Lens. Proc. of 2003 Particle Accelerator Conf., San-Francisco, California, USA, May 12-16, 2003, pp. 1781-1783.

[17] Bogdanov I.V., Gridasov V.I., Myznikov K.P., Shcherbakov P.A., Sytnik V.V., **Tkachenko L.M.**, Vassiliev L.M. Geometry Optimization of a High Gradient Quadrupole Magnet. Proc. of 15 Int. Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, October 20-24. 1997. Science press, Beijing, China, Vol. 1, pp. 1388-1391.

[18] Bogdanov I.V., Gridasov V.I., Myznikov K.P., Shcherbakov P.A., Slabodchikov P.I., Sytnik V.V., **Tkachenko L.M.**, Vassiliev L.M., Nikulin A.D., Shikov A.K., Silaev A.G., Vorobyova A.E., Klimenko E.Yu., Novikov S.I., Novikov M.S. Development of a High-Gradient Quadrupole Magnet with a Nb_3Sn Cable. Proceed. of European Particle Accelerator Conference EPAC'1998, Stockholm, 1998, pp. 2035-2037.

[19] Bodanov I., Kozub S., Pleskach P., Shcherbakov P., Sytnik V., Zubko V., Holtkamp N., **Tkachenko L.**, Terechkine I. Muon Transport Channels with Longitudinal Magnetic Field. Proc. of 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001, pp. 3627-3629.

[20] Ageev A., Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Slabodchikov P., **Tkachenko L.**, Sytnik V.. Zubko V., Blasche K., Kaugerts J., Moritz G. Development of a Superconducting Dipole with Fast-Cycling Magnetic Fields. Proceed. of European Particle Accelerator Conference EPAC 2002, Paris, France, 2002, pp. 2436-2438.

[21] Агеев А.И., Богданов И.В., Зубко В.В., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Сытник В.В., **Ткаченко Л.М.**, Щербаков П.А., Blasche K., Kaugerts J., Moritz G. Исследование возможности использования СП дипольных магнитов УНК для создания быстроциклирующих магнитных полей. 18-е совещание по УЗЧ. - Обнинск, 1-4 октября 2002 г. с.332-337. АЭ, т.93, вып.6, 2002, стр. 442-445.

[22] Агеев А.И., Богданов И.В., Зубко В.В., Козуб С.С., Мызников К.П., Олюнин А.А., Слабодчиков П.И., Сытник В.В., **Ткаченко Л.М.**, Щербаков П.А.. Разработка и исследование дипольного магнита с обмоткой из высокотемпературного сверхпроводника. Труды. 18-го совещания по УЗЧ. - Обнинск, 1-4 октября 2002 г. с.319-325.. АЭ, т.93, вып.6, 2002, стр. 437-442.

[23] Ageev A., Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Slabodchikov P., Sytnik V., **Tkachenko L.**, Zubko V., Kaugerts J., Moritz G. Development of Superconducting Dipole Design for Creation of Fast-Cycling Magnetic Fields. Proceed. of 18 Int. Conf. on Magnet Technology, Morioka, Japan, 2003. IEEE Trans. on Appl. Sup., Vol. 14, Num. 2, pp. 295-299.

[24] **Tkachenko L.,** Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Slabodchikov P., Sytnik V., Zubko V., Kaugerts J., Moritz G. Comparison of three Designs of Wide Aperture Dipole for the SIS300 Ring. Proc. of European Particle Accelerator Conference EPAC'2004, Lucerne, Switzerland, 2004, pp. 1747-1749.

[25] **Tkachenko L.**, Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Slabodchikov P., Zubko V., Moritz G., Sytnikov V. Methods for Reducing Cable Losses in Fast-Cycling Dipoles for the SIS300 Ring. Proc. of European Particle Accelerator Conference EPAC'2004, Lucerne, Switzerland, 2004, pp. 1750-1752.

[26] Kaugerts J. E., Moritz G., Muehle C., Ageev A., Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Sytnik V., **Tkachenko L.**, Zubko V., Tommasini D., Wilson M.N., Hassenzahl W. Design of a 6 T, 1 T/s Fast-Ramping Synchrotron Magnet for GSI's Planned SIS 300 Accelerator. ASC-2004. IEEE Trans. Applied Supercon. Vol.15, No. 2, June 2005, pp. 1225-1227.

[27] Bogdanov I. Kozub S., Shcherbakov P., **Tkachenko L.**, Zubko V., Muehle C., Moritz G., Tommasini D. Optimization of Dipole with Partial Keystone Cable for the SIS300. Proc. of 19 Conf. on Magnet Technology, MT-19, Genoa, Italy, 2005.

Рукопись поступила 29 декабря 2005 г.

Л.М. Ткаченко.
Разработка и исследование перспективных направлений развития сверхпроводящих магнитных систем для ускорительных комплексов заряженных частиц

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word.*
Редактор Н.В.Ежела. .

Подписано к печати 30.12.2006. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,9. Уч.-изд.л. 0,75. Тираж 100. Заказ 5. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2005–48 И Ф В Э, 2005