



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2012-132

На правах рукописи

УДК 621.384.6

K-59

345 d

КОЗУБ
Сергей Сергеевич

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ И КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственном научном центре Российской Федерации – Институте физики высоких энергий» (ГНЦ ИФВЭ), г. Протвино.

Официальные оппоненты:

Алексеев Николай Николаевич, доктор физико - математических наук, ИТЭФ, г. Москва, начальник ускорительного центра ИТЭФ;

Коваленко Александр Дмитриевич, доктор физико - математических наук, ОИЯИ, г. Дубна, заместитель директора ЛФВЭ ОИЯИ;

Образцов Владимир Федорович, член - корреспондент РАН, доктор физико - математических наук, ГНЦ ИФВЭ, г. Протвино, начальник Лаборатории электрослабых процессов Отделения экспериментальной физики.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится “ _____ ” _____ 2012 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д720.017.001.03 в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.А. Батусов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Ускорители заряженных частиц являются эффективным средством экспериментального исследования элементарных частиц. Для решения этой задачи созданы ускорители, имеющие сверхпроводящие дипольные магниты либо с высоким значением поля (8,3 Тл), но низкой скоростью изменения магнитного поля (0,007 Тл/с), либо с высокой скоростью (1 Тл/с), но невысоким значением поля (1,5 Тл).

Эффективность исследований в физике высоких энергий повышается с ростом энергии ускоряемых частиц. Однако эта возможность ограничивается сильно растущими затратами на создание и эксплуатацию ускорителя.

Повышение интенсивности пучков частиц за единицу времени позволяет увеличить эффективность работы экспериментальных установок. Для существенного повышения энергии и интенсивности пучков необходимо создать сверхпроводящие быстроциклирующие высокопольные магниты.

Разность критической и рабочей температуры сверхпроводящих магнитов ускорителей составляет всего около одного градуса Кельвина. Поэтому для достижения заданных параметров сверхпроводящие системы, особенно системы большой протяженности на основе быстроциклирующих высокопольных магнитов, должны иметь эффективную криогенную систему их охлаждения.

Таким образом, существует актуальная задача создания быстроциклирующих высокопольных магнитов, имеющих магнитное поле 6 Тл и скорость изменения магнитного поля 1 Тл/с, а также системы криостатирования, осуществляющей эффективное охлаждение цепочки из таких магнитов. Подобные магниты необходимы для проектируемого ускорителя SIS 300 (последней ступени ускорительного комплекса по исследованию антипротонов и ионов FAIR, Германия), и для модернизации ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРН (Швейцария).

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Использование сверхпроводящих устройств на выводных каналах ускорителя позволяет существенно повысить интенсивность потоков частиц на экспериментальные установки. Создание системы криогенного обеспечения сверхпроводящего сепаратора является актуальной задачей, которую необходимо решить для получения сепарированного пучка К - мезонов на Ускорительном комплексе У-70 ГНЦ ИФВЭ.

Цель диссертационной работы – разработка и создание сверхпроводящих быстроциклирующих высокопольных магнитов и систем криогенного обеспечения для повышения энергии и интенсивности потоков частиц в экспериментах по физике высоких энергий. Достижение этой цели связано с решением ряда задач, таких как снижение тепловыделений в сверхпроводящих магнитах, разработка эффективных систем криогенного обеспечения, обеспечение необходимого температурного запаса магнитов и постоянство их магнитных характеристик при работе ускорителя. Для решения этих задач необходимо создать устройства, с помощью которых определить характеристики материалов, используемых при создании сверхпроводящих устройств и систем их криостатирования, исследовать процесс теплообмена сверхпроводящей обмотки магнита с охлаждающим жидким гелием, провести расчеты с использованием полученных экспериментальных результатов для выбора оптимальных технических решений и реализовать эти решения на практике.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Результаты исследования теплофизических, механических и электрических свойств сверхпроводящих, изоляционных и конструкционных материалов в интервале температур 300 - 4 К, а также тепловые и гидравлические характеристики процесса теплообмена сверхпроводящей обмотки магнита с жидким гелием.

2. Разработка и исследование сверхпроводящего быстроциклирующего высокопольного дипольного модельного магнита для проекта ускорителя SIS 300.
3. Схема криостатирования быстроциклирующей сверхпроводящей магнитной системы для проекта ускорителя SIS 300 большой протяженности и с повышенными тепловыделениями.
4. Разработка и исследование криогенной системы сверхпроводящего высокочастотного сепаратора канала К-мезонов ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ.

Научная новизна

1. Созданы устройства и исследованы теплофизические и механические характеристики сверхпроводящих и конструкционных материалов, предложены уравнения, описывающие поведение этих величин, что является новыми результатами, необходимыми для расчета сверхпроводящих устройств и систем их криогенного обеспечения.
2. На основе теории проводимости получены расчетные зависимости, позволяющие по отношению сопротивлений при температурах 300 и 10 К определить с погрешностью в пределах 15% значения коэффициентов теплопроводности и удельного сопротивления кабеля из композитного ниобий – титанового провода в интервале температур 300 - 4 К, а также учесть влияние магнитного поля на эти величины.
3. Получены тепловые и гидравлические характеристики процесса теплообмена сверхпроводящей обмотки магнита с жидким гелием и аналитические выражения, описывающие эти характеристики.
4. Создан и успешно испытан сверхпроводящий быстроциклирующий высокопольный модельный дипольный магнит для проекта ускорителя SIS 300, имеющий рекордное сочетание полученного значения магнитного поля 6,8 Тл и достигнутой при этом скорости изменения магнитного поля 1,15 Тл/с.

5. Разработана схема криостатирования для проекта ускорителя SIS 300, позволяющая эффективно снимать повышенные тепловыделения в цепочке сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов ускорителя большой протяженности.
6. Создана и введена в эксплуатацию криогенная система сверхпроводящего высокочастотного сепаратора канала К-мезонов на ускорительном комплексе У-70 ГНЦ ИФВЭ, которая является самой крупной в России системой охлаждения сверхпроводящих устройств сверхтекучим гелием и включает в себя уникальное оборудование, разработанное для этих целей.

Практическая ценность работы

- Результаты исследования автором теплофизических и механических свойств сверхпроводящих, конструкционных и изоляционных материалов при низких температурах, а также тепловых и гидравлических характеристик процесса охлаждения сверхпроводящей обмотки магнита жидким гелием представляют практический интерес при расчете процессов теплопередачи и механических напряжений не только в сверхпроводящих магнитных системах, но и в других низкотемпературных конструкциях. Часть результатов включена в «Справочник по физико-техническим основам криогеники» под редакцией профессора М.П. Малкова. Полученные результаты могут быть использованы в ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», ОИЯИ, НИЦ КИ, ОАО «Криогенмаш», ОАО НПО «Гелиймаш» и других организациях, создающих сверхпроводящие и криогенные системы.
- Созданный и успешно испытанный под руководством автора сверхпроводящий быстроциклирующий высокопольный дипольный модельный магнит для проекта ускорителя SIS 300 представляет большой интерес для создания будущих ускорителей с повышенной

энергией и интенсивностью пучка для экспериментов по физике высоких энергий.

- Разработанная схема криостатирования быстроциклирующих магнитов проекта ускорителя SIS 300 способна решить задачу охлаждения протяженной сверхпроводящей магнитной системы с повышенными тепловыделениями.
- Созданная и успешно введенная в эксплуатацию под руководством автора криогенная система сверхпроводящего высокочастотного сепаратора, охлаждаемого сверхтекучим гелием при температуре 1,8 К, позволила обеспечить необходимый температурный режим сепаратора нового канала ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ и начать работу с пучком К-мезонов.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- научных семинарах ИФВЭ, FNAL, CERN, GSI;
- всесоюзных и российских совещаниях по ускорителям заряженных частиц в Дубне (1986; 2004 гг.), Протвино (1996; 1998, 2000, 2010 гг.), Обнинске (2002 г.), Новосибирске (2006 г.), Звенигороде (2008 г.);
- европейских конференциях по ускорителям в Париже (2002 г.), Люцерне (2004 г.);
- национальных конференциях США по ускорителям в Вашингтоне (1993г.), Чикаго (2001г.), Сан-Франциско (2003г.), Ноксвилле (2005г);
- международных конференциях по прикладной сверхпроводимости в Джексонвилле (2004 г.), Брюссель (2007 г.), Чикаго (2008 г.);
- международных конференциях по магнитной технологии в Цукубе (1989 г.), Ленинграде (1991 г.), Виктории (1993), Пекине (1997 г.), Флориде (1999), Женеве (2001 г.), Мориоке (2003 г.), Генуе (2005 г.), Филадельфии (2007 г.), Хефее (2009г.).

Представленные в диссертации результаты опубликованы в виде препринтов ИФВЭ, FNAL, BNL, статей в советских, российских (Инженерно-физический журнал, Атомная энергия, Новости и проблемы фундаментальной физики, Холодильная техника) и иностранных (Cryogenics, IEEE Transaction on Magnetics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams) журналах, трудах соответствующих конференций.

Достоверность представленных в диссертации экспериментальных и расчетных результатов проверена на практике при испытании сверхпроводящих устройств и систем их криогенного обеспечения.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 148 наименований. Объем диссертации без списка литературы составляет 213 страниц, в том числе 84 рисунка и 49 таблиц. Список основных опубликованных научных работ, представляющих важнейшие результаты диссертации, составляет 20 наименований.

Содержание работы

Во введении представлен обзор текущего состояния ускорителей, в том числе со сверхпроводящими магнитами, поставлена задача повышения энергии и средней по времени интенсивности пучка частиц в ускорительном комплексе и обоснована актуальность решения этой задачи.

В первой главе рассмотрены устройства и результаты исследования механических, тепловых и электрических свойств материалов, используемых при создании сверхпроводящих устройств. Представлены результаты исследований деформации сжатия, ползучести, температурной деформации, теплоемкости, теплопроводности, удельного сопротивления в интервале

температур 300 – 4 К для конструкционных, изоляционных и сверхпроводящих материалов, а также обмотки сверхпроводящего магнита.

Получены расчетные зависимости, описывающие полученные результаты, в том числе, позволяющие по отношению сопротивлений при температурах 300 и 10 К определить с погрешностью в пределах 15% значения коэффициентов теплопроводности и удельного сопротивления кабеля из композитного ниобий - титанового провода при низких температурах, а также учесть влияние магнитного поля на эти величины.

Представлены результаты исследования теплопритока к гелиевому сосуду и тепловому экрану магнита по опорам различной конструкции. Эти исследования позволили определить вклад теплопритока по опорам в тепловую нагрузку на систему криостатирования сверхпроводящего магнита.

Рассмотрены вопросы охлаждения сверхпроводящей обмотки магнита жидким гелием. Представлены разработанные методики и результаты исследования как теплопередачи через различные изоляционные покрытия от образцов обмотки магнита к кипящему в большом объеме жидкому гелию, так и гидравлического сопротивления каналов обмотки при протекании охлаждающего гелия. По результатам исследования теплообмена через различные изоляционные покрытия и их электрической прочности проведена оптимизация изоляционного покрытия сверхпроводящего кабеля.

Проведенное комплексное исследование тепловых, электрических и механических свойств материалов и сверхпроводящей обмотки магнита позволило получить необходимую информацию для расчета сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов и систем их криогенного обеспечения.

Во второй главе приводится описание конструкции сверхпроводящего быстроциклирующего высокопольного дипольного модельного магнита проектируемого ускорителя SIS 300. Представлены результаты оптимизации геометрии и основных магнитных характеристик сверхпроводящей обмотки магнита. С учетом измеренных механических характеристик материалов

определена конструкция системы бандажирования сверхпроводящей обмотки магнита. Приведены результаты расчетного анализа механических напряжений в обмотке и необходимой величины предварительной деформации обмотки в процессе ее сборки.

Представлен расчетный анализ динамических тепловыделений в сверхпроводящем кабеле, железном яре и других элементах магнита, на основании которого сформулированы требования к конструкции этих элементов и определены величины динамических тепловыделений в них. На основе результатов исследования тепловых характеристик материалов и теплообмена сверхпроводящей обмотки с жидким гелием проведен расчет нагрева обмотки и ее температурного запаса для планируемого рабочего цикла ускорителя SIS 300.

По результатам проведенных расчетов изготовлена обмотка магнита. С учетом измеренных при комнатной температуре характеристик этой обмотки проведена сборка дипольного магнита. Представлены результаты испытаний магнита в жидком гелии: величина критического тока в зависимости от скорости ввода тока и числа переходов обмотки в нормальное состояние, динамические потери и передаточная функция диполя. В процессе испытаний магнита получено уникальное сочетание достигнутого магнитного поля 6,8 Тл и скорости изменения поля до 1,15 Тл/с.

В третьей главе проведено исследование криогенного обеспечения протяженных сверхпроводящих устройств на примере системы охлаждения сверхпроводящих магнитов проектируемого ускорителя SIS 300. Проведен расчет теплопритоков (с использованием результатов исследования теплопритока по опорам магнита) и тепловыделений в магнитной системе SIS 300. На температурном уровне 4,5 К тепловая нагрузка на систему криостатирования SIS 300 составляет примерно 4,3 кВт плюс 4,6 г/с расход жидкого гелия на охлаждение тоководов корректирующих магнитов. Динамические тепловыделения в магнитах примерно в два раза превышают

статические тепловыделения в системе, которые остаются при перерыве в работе магнитов.

Показано, что температурный запас сверхпроводящих магнитов (разность между критической и рабочей температурой) в протяженных системах уменьшается за счет нагрева жидкого гелия по длине цепочки. Предложено схемное решение системы криостатирования сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов, позволяющее за счет введения необходимого числа дополнительных теплообменников уменьшить нагрев гелия вдоль цепочки магнитов до требуемой величины. Например, введение двух дополнительных теплообменников в цепочку магнитов SIS 300 позволяет уменьшить нагрев гелия вдоль этой цепочки до 0,3 К, что обеспечивает требуемый температурный запас не менее 1 К в сверхпроводящих быстроциклирующих магнитах SIS 300.

Представлены результаты расчета режима охлаждения сверхпроводящих магнитов SIS 300, которые показали, что выбранное схемное решение позволит провести охлаждение магнитов SIS 300 от комнатной до рабочей температуры в течение 60 часов, что является приемлемым временем.

Разработанная схема криостатирования ускорителя SIS 300 позволяет обеспечить требуемые режимы охлаждения и криостатирования сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов этого ускорителя.

В четвертой главе рассмотрено криостатирование локальных сверхпроводящих устройств на примере разработки и создания криогенной системы сверхпроводящего высокочастотного сепаратора нового канала Ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ для изучения К-мезонов. Созданная криогенная система обеспечивает работу в интервале температур 4,3-1,7 К двух сверхпроводящих высокочастотных дефлекторов, расположенных на расстоянии 76 м друг от друга. Представлены результаты расчета, разработки конструкции, изготовления и испытаний оборудования этой криогенной системы в составе: Ванны промежуточного охлаждения, Большого вакуумного теплообменника, низкотемпературных

теплообменников, криогенного коллектора, Откачной машины. Предложено уравнение для расчета поверхности теплообменников, в которых поток сверхкритического гелия охлаждается кипящим гелием.

Анализ различных режимов работы системы показал, что она обеспечивает в течение трех суток охлаждение от комнатной температуры до 1,8 К сверхпроводящих высокочастотных дефлекторов, их длительное и стабильное криостатирование сверхтекучим гелием при температуре 1,8 К и отепление до комнатной температуры в течение трех суток. Выполнен анализ возможных аварийных ситуаций и предложены режимы работы системы, позволяющие поддерживать рабочую температуру дефлекторов во время устранения этих ситуаций.

Можно констатировать создание и успешное начало работы на Ускорительном комплексе У-70 ГНЦ ИФВЭ самой крупной в России криогенной системы, охлаждающей сверхпроводящие устройства сверхтекучим гелием. Успешная работа этой системы холодопроизводительностью 280 Вт при температуре 1,8 К позволила обеспечить необходимые параметры сверхпроводящего высокочастотного сепаратора 21 канала, получить свыше миллиона событий на установке ОКА и планировать набор большого количества каонных распадов, что необходимо для их исследования на новом уровне.

В заключении подводятся итог проведенных исследований и разработок.

В диссертационной работе представлены результаты исследования деформации сжатия, ползучести, температурной деформации, теплоемкости, теплопроводности, удельного сопротивления, электрической прочности в интервале температур 300 – 4 К для конструкционных, изоляционных и сверхпроводящих материалов, предложены уравнения, описывающие поведение этих величин. Представлено описание методик и устройств, созданных для проведения этих исследований. Исследован теплоприток по опорам различной конструкции к гелиевому сосуду и теплового экрану

магнита, что позволило определить вклад этого теплопритока в тепловую нагрузку на систему криостатирования как отдельного магнита, так и ускорителя. Предложенные автором методики позволили провести комплексное исследование как теплопередачи от сверхпроводящей обмотки магнита к кипящему в большом объеме жидкому гелию через различные изоляционные покрытия, так и электрической прочности этих изоляционных покрытий, а также гидравлического сопротивления каналов обмотки при протекании охлаждающего гелия. Представлены уравнения, описывающие результаты проведенных исследований. Полученная информация необходима для проведения расчетов сверхпроводящих устройств и систем их криогенного обеспечения.

Проведен анализ проблем, возникающих при создании сверхпроводящих быстроциклирующих высокопольных магнитов. С использованием результатов исследований деформации сжатия, ползучести, термической деформации материалов рассчитаны механические напряжения в сверхпроводящей обмотке быстроциклирующего высокопольного дипольного магнита и требуемая величина предварительной деформации его обмотки в процессе сборки магнита, оптимизирована конструкция системы бандажирования сверхпроводящей обмотки магнита. Выполнен расчетный анализ динамических тепловыделений в сверхпроводящем кабеле, магнитопроводе и других элементах магнита, на основании которого определены принципиальные особенности их конструкций и величина динамических тепловыделений в этих элементах. На основе сформулированных требований к токонесущему элементу дипольного магнита разработаны и изготовлены сверхпроводящий провод и кабель с пониженными динамическими тепловыделениями. С использованием результатов исследования теплоемкости и теплопроводности сверхпроводящих и конструкционных материалов, теплопередачи от сверхпроводящей обмотки к жидкому гелию, гидравлического сопротивления охлаждающих каналов проведен расчет нагрева обмотки

дипольного магнита и ее температурного запаса для рабочего цикла ускорителя SIS 300. По результатам проведенных исследований разработан и изготовлен сверхпроводящий быстроциклирующий высокопольный дипольный модельный магнит SIS 300 с номинальным магнитным полем в апертуре 6 Тл и скоростью изменения магнитного поля 1 Тл/с. В процессе испытаний магнита получено уникальное сочетание достигнутого значения центрального магнитного поля 6,8 Тл при скорости изменения поля до 1,15 Тл/с.

Разработана криогенная система для протяженных быстроциклирующих сверхпроводящих устройств на примере охлаждения сверхпроводящих магнитов ускорителя SIS 300. Проведен расчет теплопритоков и тепловыделений в магнитной системе SIS 300, по результатам которого предложена схема криостатирования этих магнитов жидким гелием. Показано, что минимальная разность между критической и рабочей температурой сверхпроводящего магнита в рабочем цикле (температурный запас) в протяженных сверхпроводящих системах уменьшается за счет нагрева жидкого гелия по длине цепочки магнитов. Предложенное схемное решение системы криостатирования сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов позволяет за счет введения необходимого числа дополнительных теплообменников уменьшить нагрев гелия вдоль цепочки магнитов до требуемой величины. Введение двух дополнительных теплообменников в цепочку магнитов SIS 300 позволяет уменьшить нагрев гелия вдоль этой цепочки до 0,3 К, что обеспечивает требуемый температурный запас не менее 1 К в сверхпроводящих быстроциклирующих магнитах SIS 300. Выполненный расчет режима охлаждения магнитов SIS 300 от комнатной до рабочей температуры показал, что холодопроизводительность системы криогенного обеспечения, определённая из условий криостатирования этого ускорителя, обеспечивает приемлемое время охлаждения оборудования. Разработанная схема криостатирования ускорителя SIS 300 позволяет

обеспечить требуемые режимы охлаждения и криостатирования сверхпроводящих быстроциклирующих магнитов этого ускорителя.

Рассмотрено криостатирование локальных сверхпроводящих устройств на примере разработки и создания криогенной системы сверхпроводящего высокочастотного сепаратора нового канала Ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ для изучения К-мезонов. Созданная под руководством автора криогенная система холодопроизводительностью 280 Вт охлаждает сверхтекучим гелием при температуре 1,8 К два сверхпроводящих высокочастотных дефлектора, расположенных на расстоянии около 76 м друг от друга. Представлены результаты расчета, разработки конструкции, изготовления и испытаний оборудования этой криогенной системы в составе: Ванны промежуточного охлаждения, Большого вакуумного теплообменника, низкотемпературных теплообменников, криогенного коллектора, Откачной машины. Предложено уравнение для расчета поверхности теплообменников, в которых поток сверхкритического гелия охлаждается кипящим гелием. Проведен анализ результатов расчетного и экспериментального исследования криогенной системы как в рабочих условиях, так и в аварийных ситуациях. Успешный запуск и достижение заданных характеристик этой криогенной системы, которая является крупнейшей в России системой, охлаждающей сверхпроводящие устройства сверхтекучим гелием, позволили обеспечить необходимый температурный режим сверхпроводящего высокочастотного сепаратора нового канала Ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ и начать исследования сепарированного пучка К-мезонов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] Агеев А.И., Андреев Н.И., Балбеков В.И., Булатов Э.А., Васильев В.А., Васильев Л.М., Герцев К.Ф., Гридасов В.И., Дмитриевский Ю.П., Долженков В.И., Елистратов В.В., Злобин А.В., Козуб С.С., Мызников К.П., Сытник В.В., Тараканов Н.М. Разработка сверхпроводящих

- диполей УНК. Труды XIII Международной конференции частиц высоких энергий. – Новосибирск, 1986. Т.2.,с.38-42. Proc of ICFA Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics. – BNL, 1986. P. 13-18.
- [2] Козуб С.С., Шпакович Я.В. Теплопроводность конструкционных стеклопластиков в интервале температур 4-300 К. Инженерно-Физический Журнал.1988. Т.54, Л. 5. С. 852-853.
- [3] Ageev A., Bozhko Yu., Kashtanov E., Kozub S., Myznikov K., Shpakovich Ya., Sytnik V., Tarasov A., Zolotov A. Heat load on a SC UNK dipole. Proc. of MT13 Conference. Tsukuba, Japan, 1989, pp. 107-110.
- [4] Kozub S., Veshchikov A., Zlobin A. Study of interlayer channel effect on temperature conditions of SC coil for the UNK. IEEE Transaction on magnetics, V.28, N1,1992, pp. 182-185.
- [5] Kozub S., Veshchikov A., Zlobin A. Thermal conductivity and electric resistance of composite wires based on HT-50. Cryogenics, 1992, V.32, pp. 295-299.
- [6] Gladky V.N., Kozub S.S., Veshchikov A.T., Escher U. Thermal Contraction of SC Magnet Materials. Cryogenics 1995, Volume 35, Number 1, p.67.
- [7] Kozub S., Zubko V. Mechanical and thermal properties of structural materials and coil of UNK superconducting magnet. Proc. of Inter. Conf. on Magn. Technology MT-15, Beijing, China, 1997, Vol. 2, p.1186.
- [8] Агеев А.И., Богданов И.В., Зубко В.В., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Сытник В.В., Ткаченко Л.М., Щербачев П.А., Blasche K., Kaugerts J., Moritz G. Исследование возможности использования СП дипольных магнитов УНК для создания быстроциклирующих магнитных полей. Атомная энергия, 2002, т. 93, вып.6, стр. 442-445.
- [9] Агеев А.И., Бакай А.И., Балугев А.Б., Двойченко А.В., Зинченко С.И., Кальчук А.Д., Каштанов Е.М., Козуб С.С., Муравьев М.И., Орлов А.П., Пименов П.Н., Плескач В.В., Полковников К.Г., Сытник В.В., Харченко А.Д. Криогенный стенд для испытаний сверхпроводящих ВЧ

- резонаторов при температуре 1,8 К. Атомная энергия, 2002, т. 93, стр. 445-448.
- [10] 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. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.14 No.2, June 2004, p. 295.
- [11] Kaugerts J., Moritz G., Ageev A., Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Sytnik V., Tkachenko L., Zubko V., Ghosh A., Wanderer P., Tommasini D., Wilson M., Hassenzahl W. Design of a 6 T, 1T/s Fast-Ramping Synchrotron Magnet for GSI's Planned SIS300 Accelerator, Proceedings of ASC, 2004, USA, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, June 2005, pp. 1225-1227.
- [12] Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Tkachenko L., Zubko V., IHEP, Russia, Muehle C., Moritz G, GSI, Germany, Russenschuck S., Tommasini D., CERN, Switzerland. Optimization of Dipole with Partial Keystone Cable for the SIS300. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 16 No. 2, June 2006, pages 395-398.
- [13] Tkachenko L., Kozub S., Zubko V., IHEP; Floch E., Kaugerts J., Moritz G., GSI; Auchmann B., Russenschuck S., Tommasini D., CERN. Magnetic and Thermal Characteristics of a Model Dipole Magnet for the SIS300, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 17 Issue: 2 part 2, June 2007, pages 1161-63.
- [14] Kozub S., Tchikilev A., Tkachenko L., Zubko V. Geometry Modernization of a Dipole Magnet for the SIS 300. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 18, Issue 2, August, 2007, pp. 264-267.
- [15] Kaugerts J., Moritz G., GSI; Ghosh A., BNL; Wilson M.N., Consultant; den Ouden A., University of Twente; Bogdanov I., Kozub S., Shcherbakov P., Shirshov L., Tkachenko L., IHEP; Fabbricatore P., INFN, Genoa; Volpini G., INFN, Milano. Cable Design for FAIR SIS 300, IEEE

- Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 17 Issue: 2 part 2 , June 2007, p.p. 1477-80.
- [16] Ageyev A. , Bakay A. , Kalashnikov L. , Kaltchuk A. , Kozub S. Muraviev M. , Orlov A. , Orlov A.P. , Solomko V. , Unjakov S. , Khartchenko A. , Shirshov L. , Shovkun Ju. , Zintchenko S. Starting -Up and Adjustment Works on Cryogenic AND Vacuum System of the Superconducting Radio-Frequency Separator, Proceedings of RUPAC-2008, p. 282.
- [17] Агеев А., Козуб С., Ширшов Л. Криогенная система для охлаждения сверхпроводящего сепаратора канала сепарированных каонов, Новости и проблемы фундаментальной физики, номер 1(5), 2009, стр. 32 - 42, Протвино, 2009.
- [18] Агеев А.И., Зинченко С.И., Зубко В.В., Козуб С.С., Система криостатирования ускорителя SIS300, Холодильная техника, № 10, 2010, стр. 49-53.
- [19] Kozub S., Bogdnov I., Pokrovsky V., Seletsky A., Shcherbakov P. Shirshov L. , Smirnov V., Sytnik V., Tkachenko L., Zubko V., Floch E., Moritz G., Mueller H. SIS 300 Dipole Model. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, V20, N3, June 2010, pp. 200- 203.
- [20] Агеев А.И., Богданов И.В., Зинченко С.И., Зубко В.В., Каштанов Е.М., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Сытник В.В., Ткаченко Л.М., Ширшов Л.С., Щербаков П.А. (ГНЦ ИФВЭ, г. Протвино, Московская обл.), Воробьева А.Е., Губкин И.Н., Панцырный В.И., Потанина Л.В., Салунин Н.И. (ОАО ВНИИНМ, г. Москва). Разработка быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов и криогенной системы ускорителя SIS 300. Атомная энергия, февраль 2012, т. 112, вып.2, стр. 76-84.

Получено 13 декабря 2012 г.