

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

Никифоров Дмитрий Николаевич

**Разработка и оптимизация систем криообеспечения стенда для
испытаний сверхпроводящих магнитов проектов NICA**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Дубна – 2019

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина
Объединенного института ядерных исследований

- Научный руководитель** – *Агапов Николай Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник*
- Официальные оппоненты** – *Агеев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логунова национального исследовательского центра «Курчатовский институт», главный научный сотрудник.*
Навасардян Екатерина Сергеевна, доктор технических наук, Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, кафедра Э4 – холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения, преподаватель.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/Dissertations>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В рамках создания комплекса сверхпроводящих колец на встречных пучках тяжелых ионов NICA в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ необходимо собрать и испытать 457 сверхпроводящих (СП) магнитов, из них 133 СП магнита для бустерного синхротрона и 324 СП магнита для коллайдера. Для выполнения этой задачи в 2011 – 2016 гг. был разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию испытательный стенд.

Перед отправкой СП магнита на кольцо ускорителя, он должен пройти криогенные испытания. Криогенные испытания включают в себя:

- магнитные измерения при гелиевом уровне температур,
- измерения статического теплопритока и динамических тепловыделений при работе в цикле с амплитудой поля 1,8 Тл и скорости изменения поля 1,2 Тл/с (стандартный цикл бустерного синхротрона),
- измерение гидравлического сопротивления охлаждающих каналов СП магнита при работе в стандартном цикле.

Для выполнения поставленной задачи была разработана технологическая цепь производства и испытания СП магнитов с определенным порядком и темпом прохождения каждой операции. Для бустерного синхротрона с учетом запасных магнитов необходимо было выпустить 45 дипольных магнитов, 56 квадрупольных линз и 32 корректирующих магнита к концу 2018 года. СП корректирующие магниты имеют разнообразные конфигурации СП обмоток, которые работают в циклическом режиме с амплитудами от 40 А до 80 А. Одной из задач по созданию корректирующих магнитов является разработка технологии производства тоководов. Решение этой актуальной задачи является частью настоящей диссертационной работы.

СП магниты для коллайдера в количестве 85 дипольных магнитов, 83 квадрупольных линз, 136 корректирующих магнитов, 8 дипольных магнитов

вертикального сведения/разведения пучка и 12 квадрупольных линз финального фокуса требуется произвести до конца 2020 года.

Актуальность работы подтверждается высокой международной оценкой и признанием мегасайенс проекта РФ NICA. Данная работа также поддержана Министерством науки и образования Российской Федерации по договору No.05.615.21.0005 в рамках проекта RFMEFI61518X0007.

Целями работы являются разработка технологических операций по сборке и криогенным испытаниям СП магнитов, обеспечивающих необходимый темп их производства; изучение динамических тепловыделений и статического теплопритока к СП магнитам ускорительного комплекса NICA; исследование термодинамических процессов охлаждения и отепления СП магнитов, а также создание слаботочных токовводов для корректирующих магнитов бустерного синхротрона и коллайдера.

Эти цели охватывали следующие направления работы автора:

1) Создание высокотехнологичного криогенного стенда на основе трех гелиевых сателлитных рефрижераторов для проведения криогенных испытаний с максимальной производительностью 12 СП магнитов в месяц.

2) Проведение криогенных испытаний СП магнитов бустерного синхротрона и коллайдера, исследований, направленных на изучение динамических тепловыделений и статического теплопритока к СП магнитам при гелиевом уровне температур, а также тренировки СП магнитов типа «Нуклотрон».

3) Разработка и создание математической модели, позволяющей рассчитать темп охлаждения и отогрева СП магнита в зависимости от изменения термодинамических характеристик охлаждающего потока гелия, массы и конструктивных особенностей магнита. Оптимизация процессов охлаждения и отогрева на основе указанных расчетов.

4) Разработка технологии производства слаботочных токовводов для СП корректирующих магнитов и проведение исследования тепловой нагрузки к СП корректирующим магнитам по токовводам.

Новизна работы. Впервые создан уникальный, высокотехнологичный криогенный участок для испытаний СП магнитов типа – «Нуклотрон», включающий шесть параллельных испытательных стендов с автоматизированными контурами обеспечения жидким азотом. Созданный криогенный участок обладает высокой пропускной способностью, надежностью и простотой управления сложными криогенными процессами.

Получены новые экспериментальные данные по динамическому тепловыделению и статическому теплопритоку к СП магнитам бустерного синхротрона и коллайдера NICA, а также тренировки СП магнитов.

Впервые создана математическая модель, позволяющая рассчитать темп охлаждения и отогрева СП магнита типа – «Нуклотрон». С её помощью удалось сократить время криогенных испытаний СП магнитов различных модификаций и видов и оптимизировать работу на криогенном стенде.

Предложена и реализована уникальная технология производства слаботочных тоководов (до 150 А) для корректирующих магнитов на основе применения трех ступенчатого «косвенного» криостатирования для минимизации тепловой нагрузки к СП обмоткам.

Практическая значимость работы. Созданный криогенный стенд доказал свою надежность, энергоэффективность, стабильность, простоту и удобство в управлении высокотехнологичным криогенным оборудованием на более 150 криогенных испытаниях.

Разработанная технология производства слаботочных тоководов обладает оптимальными свойствами и минимальной тепловой нагрузкой для СП обмоток корректирующих магнитов. Это позволило применять «косвенное» криостатирование СП обмоток, что значительно облегчило систему криогенного охлаждения и сбора жидкого гелия для корректирующих магнитов.

Описанные методики проведения криогенных испытаний и исследования динамических тепловыделений в СП магнитах могут быть для магнитов типа

«Нуклотрон». На результатах измерений динамических тепловыделений и статического теплопритока определена общая тепловая нагрузка на криогенную систему бустерного синхротрона.

Положения, выносимые на защиту:

1) Разработка технологических операций по подготовке к криогенным испытаниям СП магнитов типа - «Нуклотрон», обеспечивающих высоких темп их производства.

2) Экспериментальная база данных динамических тепловыделений и статического теплопритока, полученная в процессе проведения криогенных испытаний всех СП магнитов бустерного синхротрона калориметрическим и электрическим методами

3) Результаты расчетного анализа тепловых нагрузок различных типов СП магнитов, используемых в бустерном синхротроне проекта NICA.

4) Методика и результаты расчета рабочих параметров гелиевого сателлитного рефрижератора дроссельного типа в режимах охлаждения и криостатирования.

5) Математическая модель, позволяющая рассчитать темп охлаждения и отогрева СП магнита типа - «Нуклотрон».

6) Технология производства и конструктивные особенности слаботочных тоководов корректирующих магнитов бустерного синхротрона.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались автором на

1. 12th, 13th, 14th и 15th CRYOGENICS IIR international conference (Dresden, Germany 2012 г., Prague, Czech Republic, 2014 г., Dresden, Germany 2017 г., Prague, Czech Republic 2019 г.),

2. II школе-конференции молодых ученых и специалистов в г. Алушта (2013 г.),

3. 11th European conference on applied superconductivity (Geneva, Italy 2013 г.),
4. IPAC 2014 – 5th international Particle Accelerator Conference (Dresden, Germany 2014 г.),
5. 24th IIR international Congress of Refrigeration (Yokohama, Japan 2015 г.),
6. 1st international conference of Cryogenics and Refrigeration Technology (Bucharest, Romania 2016 г.),
7. Международной конференции RuPAC – 2018 (Protvino, Russia 2018 г.).

Работы, вошедшие в диссертацию, поддержаны грантами ЛФВЭ ОИЯИ для молодых ученых и специалистов в 2013, 2014 и 2015 годах. По результатам работ, вошедших в диссертацию, в 2018 г. Автору присуждена 1-ая премия ОИЯИ за 2017 год.

Результаты работ, составивших основу диссертации, опубликованы в 20 печатных работах, 7 из которых изданы в реферируемых журналах по списку ВАК.

Личный вклад автора.

Все результаты, приведенные в работе, получены самим автором или при его непосредственном участии и руководстве. Соискатель принимал активное участие в проектировании, сборке, пуско-наладочных работах криогенного стенда и руководил всеми криогенными испытаниями, описанными в настоящей диссертационной работе СП магнитов и криогенных установок.

Определяющий вклад автора привнесен в следующие работы: разработка технологической схемы, сборка и оптимизация криогенного стенда для испытаний СП магнитов; разработка, сборка, выполнение пуско-наладочных работ и ввод в эксплуатацию гелиевых сателлитных рефрижераторов и испытательных криостатов; создание математической модели, позволяющая рассчитать время охлаждения СП магнита типа «Нуклотрон» и проведение сравнительного анализа расчётных данных с экспериментальными; исследование динамических тепловыделений и статического теплопритока к СП магниту в циклах,

используемых при работе бустерного синхротрона и коллайдера; проведение сравнительного анализа расчётных данных тепловых нагрузок с полученными в ходе криогенных испытаний; разработка технологии, создание и проведение криогенных испытаний слаботочных токовводов для корректирующих магнитов бустерного синхротрона и коллайдера проекта NICA.

Как в соавторстве, так и лично выполнена апробация результатов исследования. Большинство публикаций и докладов на тему диссертации подготовлены и представлены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 70 наименований. Общий объем диссертационной работы составил 123 страниц, включая 40 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подчеркивается актуальность работ, представленных в диссертации, сформулированы цели и задачи работы, а также отмечена её практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В первой главе. В первом разделе обсуждаются криогенные стенды для испытаний СП магнитов в лабораториях GSI и ЛФВЭ ОИЯИ, различные подходы к созданию стендов, реализации и достоинства и недостатки обоих вариантов. В главе подробно приведена и проиллюстрирована технологическая схема криогенного стенда лаборатории ЛФВЭ, рассмотрены основные составляющие элементы стенда (см. рис.№1).

Во втором разделе подробно описан гелиевый сателлитный рефрижератор дроссельного типа. Выполнен расчетный анализ рабочих параметров гелиевого сателлитного рефрижератора в различных режимах работы и приведены оптимальные значения основных параметров для эффективного охлаждения СП магнитов различных конфигураций.

Разобрана конструкция рефрижератора и приведены достоинства и недостатки различных элементов установки. Теплообменная аппаратура была выбрана пластинчато-ребристого вида и представляет собой два теплообменника. Принципиальную схему рефрижератора можно разделить на две основные части: азотное и гелиевое охлаждение. К азотной части относятся теплообменник (№2 рис.№1) и сборник жидкого азота (№3 рис.№1). К гелиевому охлаждению – теплообменник (№1 рис.№1), гелиевый сборник (№4 рис.№1) и дроссельная ступень окончательного охлаждения.

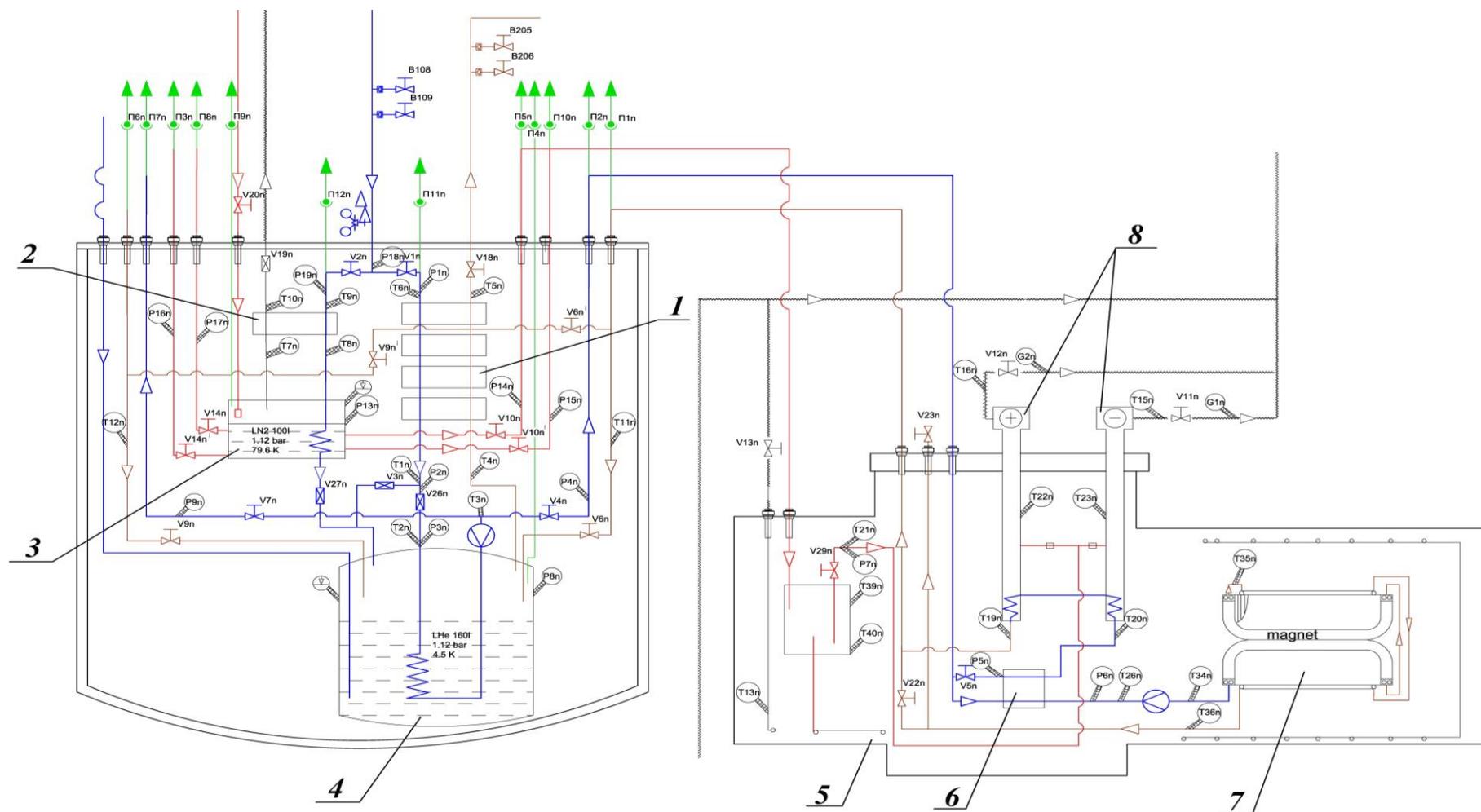


Рисунок №1. Технологическая схема гелиевого спутникового рефрижератора с испытательным плечом: 1, 2 – теплообменники, 3 – сборник жидкого азота, 4 – сборник жидкого гелия, 5 – испытательное плечо, 6 – переохладитель, 7 – СП магнит, 8 – ВТСП токовводы.

В конце главы приведены схемы и алгоритмы систем автоматизации криогенного стенда. В частности, система автоматического поддержания заданной температуры тепловых экранов испытательного криостата и уровня жидкого азота в высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) токовводах. В процессе эксплуатации система хорошо себя зарекомендовала и её аналог будет применён для охлаждения ВТСП токовводов бустерного синхротрона.

Вторая глава посвящена криогенным испытаниям СП магнитов. Криогенные испытания состоят из шести основных этапов: охлаждение, тренировка, проведение магнитных измерений, определение статического теплопритока и динамических тепловыделений, поиск «холодной» течи и отогрев. В главе разобран каждый из этапов криогенных испытаний.

На рисунке №2 представлены графики охлаждения и отепления СП дипольного магнита бустерного синхротрона. Охлаждение протекает в два этапа: первый – азотное охлаждение и второй – гелиевое охлаждение. На первом этапе в СП обмотку, охлаждаемого магнита, поступает сжатый гелий параметрами $T = 80$ К и $P = 23,5$ атм., а во время гелиевого охлаждения $T = 4,5$ К и $P = 6,0$ атм. В этом разделе приведена статистика времен охлаждения и отогрева всех дипольных магнитов и квадрупольных дублетов бустерного синхротрона.

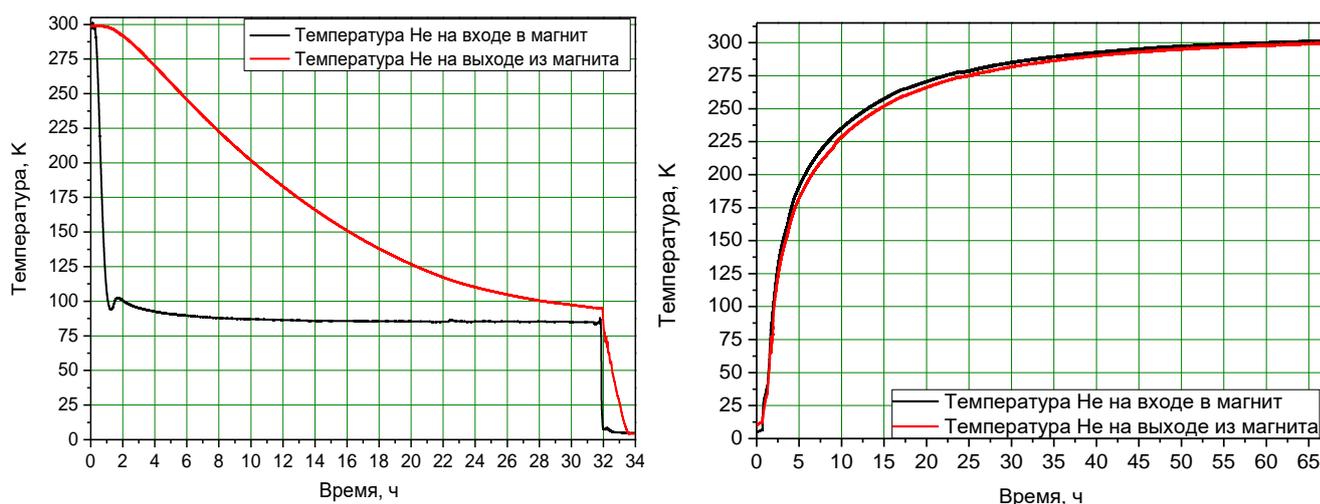


Рисунок №2. Графики охлаждения (слева) и отепления (справа) СП дипольных магнитов бустерного синхротрона.

Во время тренировки СП обмотки (тренировочный цикл изображен на рис. №3) происходит высвобождение внутренних напряжений, заложенных на этапах производства СП обмотки и кабеля, что влечет за собой выделение тепла.

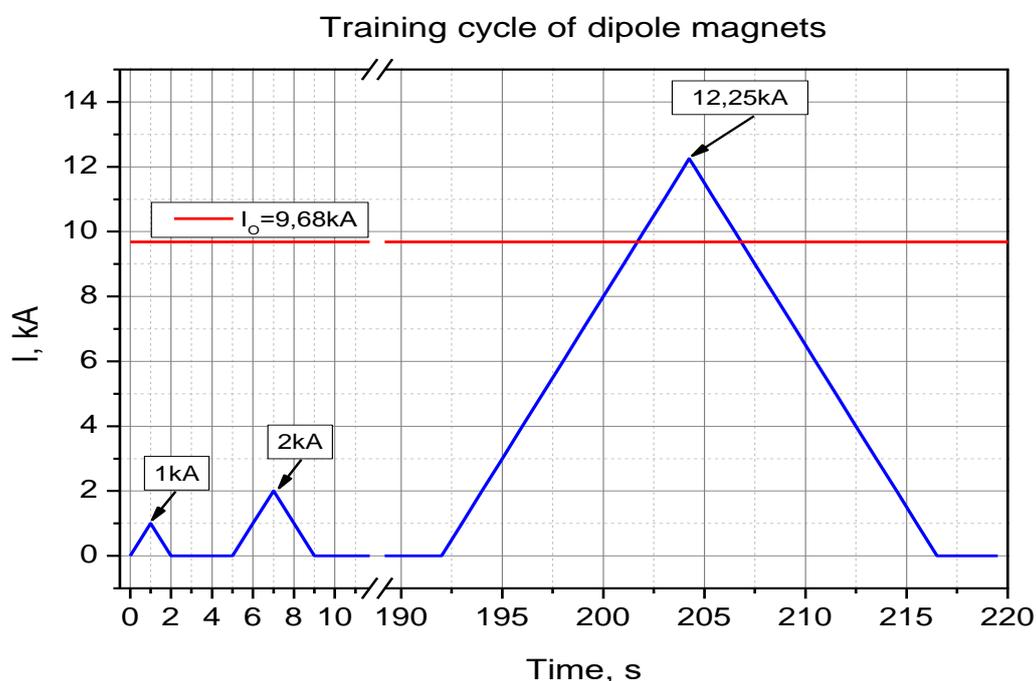


Рисунок №3. Тренировочный цикл для СП обмоток бустерного синхротрона.

При определенном выделенном количестве тепла происходит переход СП обмотки из сверхпроводящего в нормальное состояние (срыв сверхпроводимости). Было проведено исследование при активном участии автора, свидетельствующие о качестве СП обмоток, т.е. происходит ли запоминание СП обмотки первичной тренировки. В этой главе приводятся также результаты тренировок всех СП обмоток бустерного синхротрона.

Одним из окончательных этапов криогенных испытаний является поиск «холодной» течи. В этом разделе описаны методика, схема испытаний и приведена статистика, проведенных тестов.

Для измерения статического теплопритока и динамических тепловыделений в СП магните во время криогенных испытаний использовался калориметрический метод. Представлена схема и обсуждены достоинства и недостатки метода измерения потерь, также произведен сравнительный анализ полученных данных.

Показана методика расчета динамических тепловыделений в СП обмотке и набранном яре магнита.

При сравнении экспериментальных данных измерений статического теплопритока калориметрическим методом, приведенных в главе, с расчетными данными показали, что погрешность эксперимента составила в размере $\pm 2\%$.

В заключения главы приводятся диаграммы и графики динамических тепловыделений и статического теплопритока для различных конфигураций СП магнитов бустерного синхротрона, также таблица №1 общих затрат на одно криогенное испытание различных конфигураций СП магнитов типа - «Нуклотрон».

Таблица №1. Основные затраты на криогенные испытания.

Тип СП магнита	Кол-во жидкого гелия, л	Кол-во жидкого азота, л	Времени, час.	Людские ресурсы
Дипольный магнит бустерного синхротрона	1000	3000	133,5	330 чел/час
Дублет квадрупольных линз бустерного синхротрона	1000	2500	115,5	360 чел/час
Дипольный магнит коллайдера	1500	3500	240	610 чел/час
Квадрупольный магнит коллайдера	1000	2500	200	550 чел/час

В третьей главе представлена математическая модель, разработанная автором. С помощью модели можно рассчитать время охлаждения, оптимальные параметры охлаждающего потока, гидравлические характеристики охлаждающих каналов, изменение термодинамических свойств и характеристик охлаждающего потока и в любой точке листового яра, для СП магнитов типа «Нуклотрон».

В модель вводятся конструктивные параметры СП магнита и при изменении параметров потока, охлаждающего гелия из рефрижератора, меняется время

охлаждения. Данная модель проверена экспериментально на нескольких типах СП магнитов.

СП магнит типа «Нуклотрон» спроектирован таким образом, что охлаждающие медные трубки проходят вдоль ярма в четырех крайних положениях, и порядок соединения обеспечивает возможность охлаждать СП магнит с высокой скоростью так, как температурный градиент внутри самого ярма не превышает 25 К (см. рис.№4). Данные градиента были получены, как экспериментальным путем, так и расчетным, также представлены в третьей главе.

Эксперимент и методика расчета подробно описаны в этой главе. Для расчета необходимо знать конструкцию СП магнита, а также теплофизические свойства материалов и криоагента. Охлаждение магнита рассчитывается с помощью интегрирования процесса охлаждения вдоль ярма. Для дипольного магнита бустера автором применялся диапазон разбиений от 100 до 3290 (так как всего набранных пластин 3290). В процессе расчета было выяснено, что после 1000 разбиений нет смысла увеличивать количество сечений, их температура не изменялась с увеличением количества разбиений.

Математическая модель дает возможность рассчитать гидравлические критерии и теплофизические любых СП магнитов типа «Нуклотрон» которые охлаждаются и криостатируются потоком двухфазного или однофазного криоагента. Алгоритм и методика расчета разработана автором диссертационной работы.

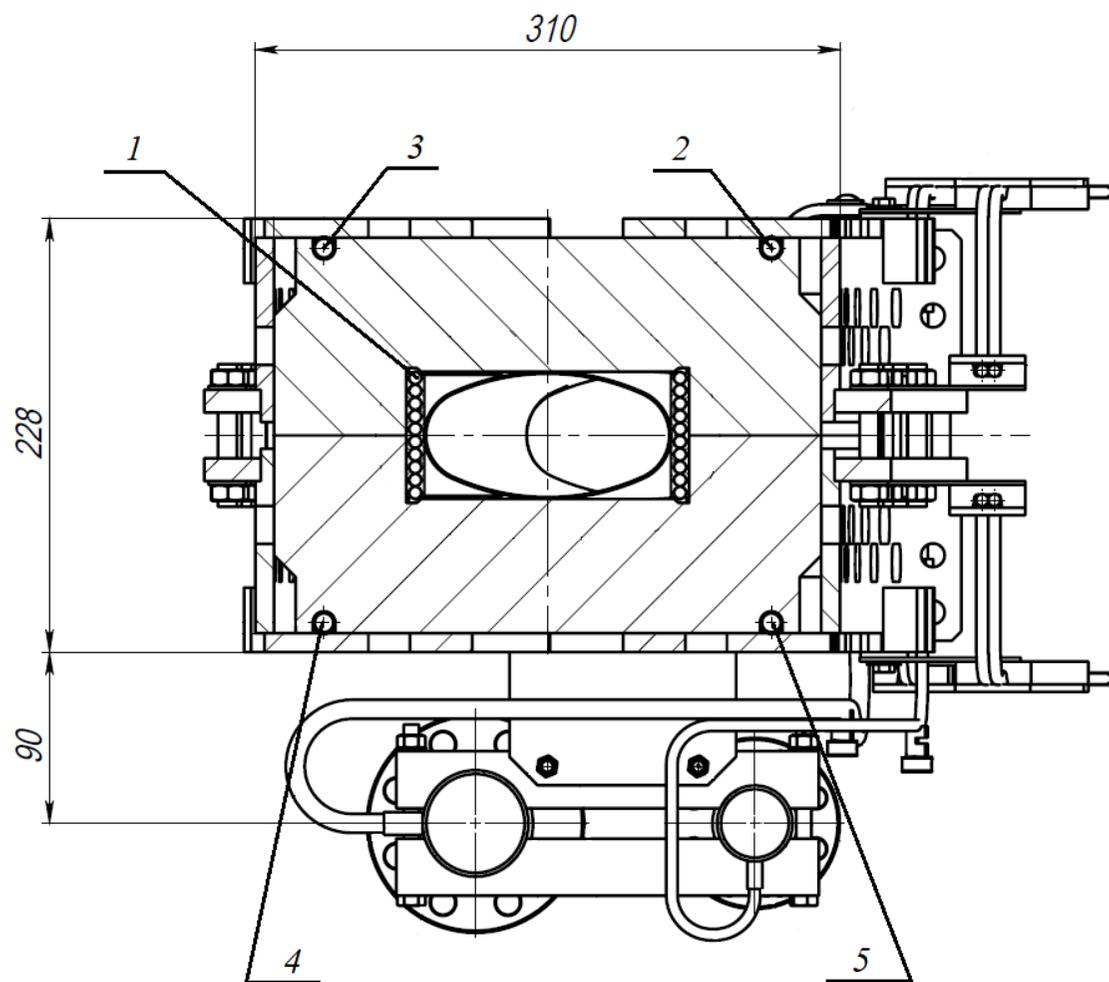


Рисунок №4. Поперечное сечение дипольного СП магнита бустерного синхротрона: 1- мельхиоровая трубка 4x0,5 мм, используемая для СП обмотки, 2 – первая трубка 12x1 мм в ярме СП магнита, 3 – вторая трубка 12x1 мм в ярме СП магнита, 4 – третья трубка 12x1 мм в ярме СП магнита, 5 – четвертая трубка 12x1 мм в ярме СП магнита.

В заключении приводится сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с рассчитанным процессом охлаждения в математической модели в графическом виде (см рис. №5.).

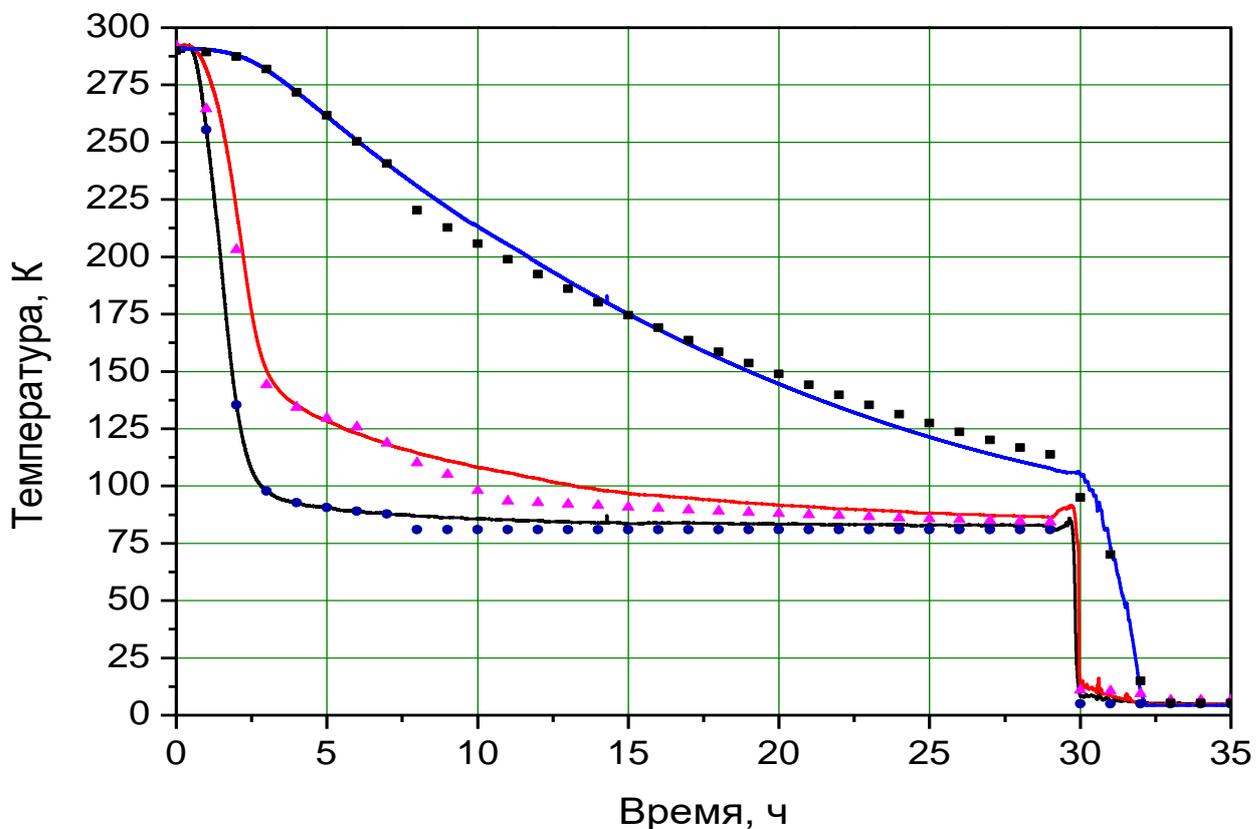


Рисунок №5. Процесс охлаждения дипольного СП магнита бустерного синхротрона:

Экспериментальные данные	Данные, рассчитанные моделью	Комментарий
		Температура на входе в СП магнит
		Температура на выходе из СП обмотки
		Температура на выходе из СП магнита

Четвертая глава посвящена разработке технологии, созданию первых образцов и серийному выпуску слаботочных тоководов для корректирующих магнитов бустерного синхротрона и коллайдера.

Слаботочный токовод состоит из трех температурных зон: 293 К – 80 К, 80 К – 10 К и 10 К – 4,5 К (см. рис.№5). В главе приведен расчет каждой отдельной зоны и показано по каким критериям выбирается оптимальное сечение медного кабеля и площадь теплового якоря.

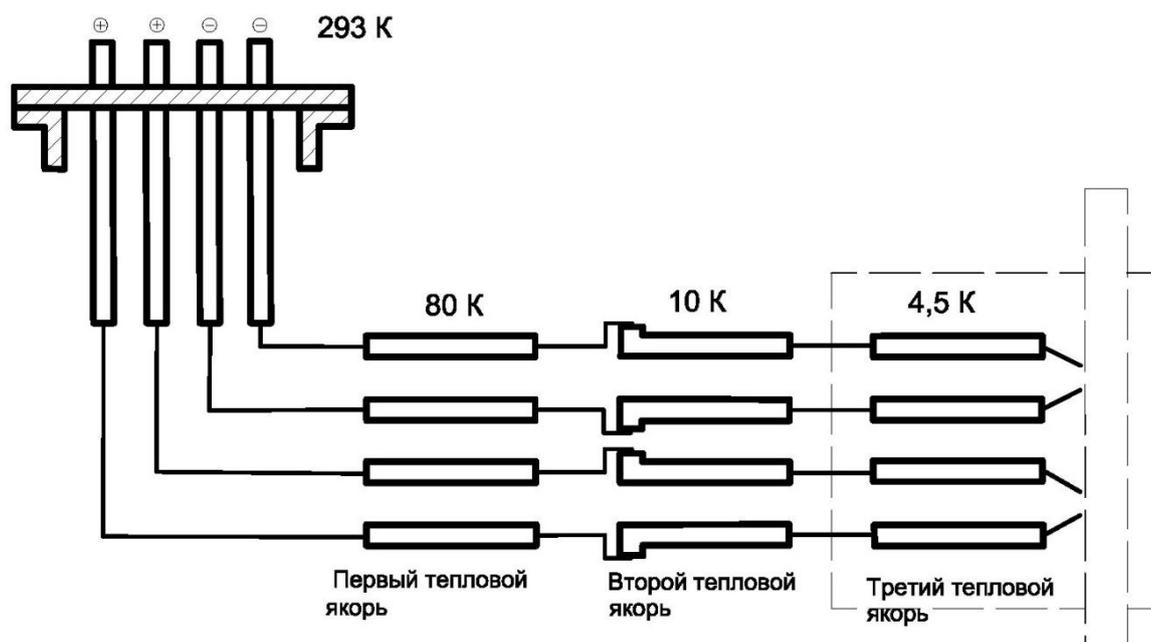


Рисунок №5. Принципиальная схема разводки слаботочных тоководов для дипольного корректирующего магнита бустерного синхротрона.

Для подтверждения правильности расчетов и качественной выполненной работы по сборке слаботочных тоководов, каждый из корректирующих магнитов были проведены криогенные испытания и измерены статический теплоприток и динамические тепловыделения при работе в циклическом режиме.

В конце главы приведены также расчеты дополнительных тоководов для корректировки пучка в бустерном синхротроне.

В заключении сформулированы основные результаты выполненных работ, вошедших в диссертацию.

1) Разработаны и оптимизированы технологические операции по криогенным испытаниям СП магнитов, обеспечивающие высокий темп их производства.

2) Разработана технологическая схема криогенного стенда для испытаний СП магнитов проектов NICA & FAIR и концепция гелиевого сателлитного рефрижератора. Осуществлено курирование создания гелиевого сателлитного рефрижератора дроссельного типа с холодопроизводительностью 100 Вт на уровне температур 4,5 К. Произведены пуско-наладочные работы и введены в эксплуатацию три гелиевых сателлитных рефрижератора.

3) Разработана и введена в эксплуатацию система автоматического поддержания температур теплового экрана криогенного стенда и уровня жидкого азота в бачке ВТСП токоввода.

4) Разработана методика проведения криогенных испытаний для СП магнитов проекта NICA на основе применения гелиевых сателлитных рефрижераторов. Приведены режимы управления рефрижераторами с максимальной энергоэффективностью, полученные опытным путем.

5) Получена экспериментальная база данных тренировок СП обмоток бустерного синхротрона, позволяющая провести анализ и выдать рекомендации по технологии изготовления СП обмоток.

6) Разработаны, испытаны и введены в эксплуатацию экспериментальные стенды по определению тепловых потерь в СП магните калориметрическим методом. Получен большой объем новых экспериментальных данных по динамическим тепловыделениям и гидравлическому сопротивлению охлаждающих каналов в СП магнитов бустерного синхротрона NICA.

7) Создана математическая модель, позволяющая рассчитывать темп охлаждения и отогрева магнита в зависимости от изменения термодинамических характеристик охлаждающего потока, массы и конструктивных особенностей магнита. С помощью модели были рассчитаны

скорость охлаждения, температурный градиент ярма, максимальная скорость отогрева и затраты времени на проведение криогенного испытания для различных видов СП магнитов типа «Нуклотрон».

8) Представлены результаты расчетов и оптимизации теплопритоков для слаботочных тоководов корректирующих магнитов коллайдера. Разработаны, испытаны и введены в эксплуатацию слаботочные тоководы для корректирующих магнитов бустерного синхротрона.

9) Создан и введен в эксплуатацию криогенный участок стенда для испытаний СП магнитов проекта NICA, выполнены криогенные испытания всех элементов бустерного синхротрона NICA.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА НА ТЕМУ ДИССЕРТАЦИИ.

1. 1. Cryogenic test facility of superconducting magnets for the accelerator complex NICA / D.Nikiforov в соавторстве с N. Agarov, H. Khodzhbagiyan, N. Emelianov and V. Korolev // Journal of Physics: conference series, ISSN:1742-6588, eISSN:1742-6596, Изд:IOP Publishing Limited, 507, 032034, 2014.

2. Superconducting magnets for the NICA accelerator collider complex / D Nikiforov в соавторстве с H. G. Khodzhbagiyan, N. N. Agarov, P. G. Akishin, N. A. Blinov, V. V. Borisov, A. V. Bychkov, A. R. Galimov, A. M. Donyagin, V. N. Karpinskiy, V. S. Korolev, O. S. Kozlov, O. A. K и др. // IEEE transactions on applied superconductivity: a publication of the IEEE Superconductivity Committee, ISSN:1051-8223, eISSN:1558-2515, Изд:IEEE, 24, 3, 4001304, 2014.

3. Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Project / D Nikiforov в соавторстве с H. G. Khodzhbagiyan, N. N. Agarov, P. G. Akishin, V. V. Borisov, A. V. Bychkov, A. R. Galimov, A. M. Donyagin, V. N. Karpinskiy, S.A.Kostromin, O.S.Kozlov, A.V.Kudashkin, и др. // Applied Superconductivity, 26, 4, 4003004, 2016.

4. Production and Test Status of the Superconducting Magnets for the NICA project and the SIS100 Synchrotron / D. N. Nikiforov в соавторстве с H. G.

Khodzhibagiyan, V.V. Borisov, V.D. Kekelidze, S. A. Kostromin, A. Yu. Starikov, G. V. Trubnikov, E. Fischer, A. Bleile, V. Datskov, F. Kaether, A. Mierau, и др., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019.

5. Cryogenics for the Future Accelerator Complex NICA at JINR / Nikiforov D. в соавторстве с Agapov N., Emelianov N., etc. // ЭЧАЯ. Изд: ОИЯИ, 11, 4, 760-767, 2014.

6. Испытание прототипов высокотемпературных сверхпроводящих тоководов криогенного стенда для тестирования магнитных элементов ускорительного комплекса NICA / Д.Н. Никифоров в соавторстве с Е.В. Кресь, Г.Г. Ходжибагиан, Chenglian Liu и др. // ЭЧАЯ . Изд:ОИЯИ, 11, 5, 941-944, 2014.

7. Dynamic heat releases measurements in the NICA dipole and quadrupole magnets / D. N. Nikiforov в соавторстве с В. Kondratiev, Н. G. Khodzhibagiyan, S. A. Kostromin // Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд: ОИЯИ, 15, 7, 827, 2018.

8. Cryogenics for the future accelerator complex NICA at JINR / D. N. Nikiforov в соавторстве с N. N. Agapov, V.I. Batin, N.E Emelianov, Iu.A. Mitrofanova, G. V. Trubnikov, I.G. Hisameev, G.F. Ziskin, B.D. Krakovsky, O.M. Popov, V.N. Udut, // physics of Particles and Nuclei Letters, T11, №4, с. 491-496, 2014.

9. Facility for Superconducting Magnet Assembling and Serial Testing / Nikiforov D. в соавторстве с Khodzhibagiyan H., Agapov N., Borisov V., Galimov A., Korolev V., Karpinskiy V., Kostromin S., Starikov A., and Trubnikov G. // Proceeding of the 13th Cryogenics 2014, IIR International Conference, April 2014, Prague, Czech Republic, 66-70, 2014.

10. Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Project / D. N. Nikiforov в соавторстве с H. G. Khodzhibagiyan, N. N. Agapov, P. G. Akishin, V. V. Borisov, A. V. Bychkov, A. R. Galimov, A. M. Donyagin, V. N. Karpinskiy, S. A. Kostromin, O. S. Kozlov, A. V. Kudashkin, G. L. Kuznetsov, I. N. Meshkov,

V. A. Mikhaylov, N. A. Morozov и др. // International Conference on Magnet Technology 24, Seoul, Korea 2015.

11. Creation of cryogenic test bench for superconducting magnets of NICA and FAIR projects / Nikiforov D. // Proceedings of 1st International Conference of Cryogenics and Refrigeration Technology, Bucharest, Romania, 2016.

12. Progress on manufacturing and testing of the SC magnets for the NICA booster synchrotron / D.N. Nikiforov в соавторстве с H. G. Khodzhibagiyan, N.N. Agapov, P.G. Akishin, V.V. Borisov, A.V. Bychkov, A.R. Galimov, O.V. Golubitskiy, A.M. Donyagin, V.N. Karpinskiy, B.Yu. Kondratiev, S.A. Korovkin, S.A. Kostromin, A.V. Kudashkin, G.L. Kuznetsov, A.V. Shemchuk, S.A и др., Proceedings of the RuPAC 2016.

13. Serial cryogenic tests of SC-magnets for NICA project / Nikiforov D. в соавторстве с Kostromin S., Loshmanova K., Proceedings of 14th CRYOGENICS 2017, Dresden, Germany 2017.

14. Control system of the superconducting magnet test bench for the NICA accelerator complex / Nikiforov D.N. в соавторстве с G.S. Sedykh, E.V. Gorbachev, A.E. Kirichenko, V.I. Volkov, A.R. Galimov, D.N. Neapolitanskiy, V.V. Kosachev, R.V. Pivin // CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Nuclear Electronics and Computing Selected Papers of the 26th International Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC 2017), Vol-2023, 1613-0073, 2017.

15. Superconducting magnets for NICA project / Nikiforov D.N. // Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC2018, Protvino, Russia, 2018.

16. Cool-Down Processes of the NICA Accelerator Complex / D. Nikiforov в соавторстве с N. Emelianov // Proceedings of 12th Cryogenics 2012 IIR international conference, Dresden, Germany, 2012.

17. Facility for Assembling and Serial Test of Superconducting Magnets / D. Nikiforov в соавторстве с S.A. Kostromin, N.N. Agapov, V.V. Borisov, A.R.

Galimov, V. Karpinsky, H.G. Khodzhbagiyani, V.S. Korolev, , N.V. Semin, A.Y. Starikov, G.V. Trubnikov // 2700-2702, Proceeding of IPAC2014, 2014

18. Liquid Helium Technologies at Cryogenic Complex of the Heavy Ion Collider NICA / D.N. Nikiforov в соавторстве с Iu.A. Mitrofanova, N.N. Agapov, N. Emelianov, H.G. Khodzhbagiyani, R. Herzog, A. Kade, J. Klier // 2752-2755, Proceeding of IPAC2014, 2014IPAC, 2014.

19. Creation of a cryogenic testing bench for superconducting magnets of a NICA and SIS100 projects / D. Nikiforov в соавторстве с H. Khodzhbagiyani, S. Kostromin // Proceeding of the 24th IIR International Congress of Refrigeration, Yokohama, Japan, 2015.

20. Развитие и реконструкция криогенной системы ЛФВЭ для ускорительного комплекса NICA (2012 – 2015 гг.) / Никифоров Д.Н. в соавторстве с Агапов Н. Н., Батин В. И., Емельянов Н. Э. и др. // P8-2012-14, Сообщение ОИЯИ, 2012