

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

**Фетисова Сергея Сергеевича**

на тему: «Исследования и разработка токонесущих элементов коаксиальных кабелей, токовводов и проводников на основе высокотемпературных сверхпроводящих материалов второго поколения»,  
по специальности 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия  
на соискание учёной степени доктора технических наук

Актуальность темы. Современное развитие электроэнергетики, а также электрофизических и электротехнических устройств невозможно без использования сверхпроводников. Это требуется как для повышения энергоэффективности и экологичности новой энергетики и энергетических устройств, так и для повышения параметров электрофизических установок, таких, например, как устройства управляемого термоядерного синтеза (УТС). Это так же обусловлено развитием технологии производства базовых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые своими свойствами и способны обеспечить высокие параметры электротехнических и электрофизических изделий.

Степень обоснованности научных положений и практическая ценность. В силу технологических ограничений, как и ранее низкотемпературные сверхпроводники, базовый ВТСП проводник выпускается в виде ленты с рабочими токами порядка 100-200 А. Тогда как в большинстве применений требуются токи в тысячи и десятки тысяч ампер. Дополнительная сложность существует в применениях для устройств с меняющимся или переменным током, когда конструкция сверхпроводника требует обеспечения равномерного распределения тока по всем лентам, входящим в сверхпроводник.

Поэтому решение задачи выбранной в рассматриваемой диссертации - создание класса комбинированных высокотемпературных сверхпроводников на основе ВТСП второго поколения (тонкие длиномерные ленты с покрытием на основе соединений  $ReBCO$ , где  $Re$  – редкоземельный элемент) является несомненно актуальным и важным.

Автор работы подошёл к решению задач комплексно, объединив в одной работе технологические разработки, экспериментальные исследования и теоретические расчёты и анализ. В результате созданы базовые технологии создания нового класса сверхпроводников на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. Именно комплексность исследования является наиболее сильной стороной работы.

Достоверность, научная значимость и новизна исследования. Следует отметить обоснованность и достоверность полученных результатов и сформулированных на их основе научных положений, выводов и рекомендаций, выносимых на защиту диссертации. Представляются весьма ценными подтверждающие экспериментальные

данные, полученные в результате испытаний с использованием современного оборудования и новых методик.

Результаты диссертации представлены в большом количестве печатных работ, в частности в 33 статьях в изданиях из перечня ВАК, и 4-х патентах. Список литературы является весьма полным и отражает не только достижения автора диссертации, но и ряда, в том числе зарубежных, исследователей, работающих в данном или близком направлении. Следует также отметить, что публикации автора доказывают научную значимость исследуемых им проблем, а также весьма широкую апробацию результатов среди известных профессионалов и научной общественности на различных конференциях и форумах. За ряд работ, включённых в диссертацию, автор, совместно с коллегами, был удостоен Премии Губернатора Московской области для молодых учёных, а также престижной Премии имени П.Н. Яблочкова Академии Наук РФ. Это дополняет апробацию работы и подтверждает высокий уровень исследований в диссертационной работе.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 179 наименований, и приложения. Общий объём диссертации 277 страниц, включая 141 рисунок.

**Во Введении** автор представляет все необходимые вводные данные о работе: её актуальность, цели и задачи, предмет и методы исследований, положения, выносимые на защиту. Даны сведения об апробации работы и положениях, выносимых на защиту.

**Первая глава** по традиции посвящена литературному обзору. Автор демонстрирует качественное владение материалом и знание состояния дел в мире. На основании обзора сформулированы задачи диссертации.

**Вторая глава** посвящена технике эксперимента и методикам испытаний исходных ВТСП лент, токонесущих элементов (ТНЭ) и кабелей. Это один из наиболее сильных разделов работы, автор демонстрирует прекрасное владение современной экспериментальной техникой, предлагает несколько нетривиальных экспериментальных методик, позволяющих получать уникальные результаты, в частности при измерениях потерь в ВТСП устройствах на переменном токе. Полученные экспериментальные данные не вызывают сомнений.

**Третья глава** представляет разработки в области моделирования, особенности изготовления и результаты экспериментальных исследований силовых компактных коаксиальных и триаксиальных ВТСП-2 кабелей, и коаксиальных ТНЭ, работающих на переменном токе. Автором подробно рассмотрены особенности и проблемы создания особо компактных коаксиальных силовых ВТСП кабелей. Была изготовлена и испытана фаза наиболее компактного ВТСП кабеля с наружным диаметром 15 мм. На сегодняшний день это наиболее компактный кабель в мире.

Ещё одним впечатляющим результатом является разработка и успешные испытания триаксиального кабеля с повышенной токонесущей способностью, имеющего по два повива (слоя) на фазу. Проведённые испытания подтвердили все расчёты и адекватность технологии изготовления кабеля.

**Четвертая глава** посвящена интересной возможности увеличения токонесущей способности кабеля постоянного тока за счёт, так называемого, эффекта продольного поля. Известно, что в слабом магнитном поле параллельном сверхпроводнику, критический ток в нем увеличивается. Это свойство было впервые обнаружено в низкотемпературных сверхпроводниках, но он присутствует и в ВТСП. Автором подробно исследована анизотропия критического тока в базовых ВТСП лентах, рассчитаны и изготовлены модельные кабели. Испытания показали, что эффект действительно имеет место и позволяет поднять рабочий ток кабеля постоянного тока.

Далее автор предлагает использовать этот эффект при создании реального устройства – системы стационарного (берегового) размагничивания кораблей. Была создана небольшая модель такого устройства и проведены испытания, которые подтвердили возможность создания сверхпроводящей системы размагничивания, которая может быть в десятки раз легче системы размагничивания из обычных медных обмоток.

**В пятой главе** излагаются результаты разработки и изготовления ВТСП тоководов, работающих во внешнем магнитном поле, и токонесущих элементов для различного сверхпроводникового оборудования. Это уникальные токовые вводы для питания сверхпроводящих магнитов способны работать в магнитном поле до 2 Тл, что отличает их от обычных ВТСП тоководов работающих в слабых рассеянных полях.

А также предложено, обосновано и испытано остроумное решение для создания обмоток сверхпроводящего трансформатора на 1 МВА, обеспечивающее равномерное распределение переменных токов в обмотке низкого напряжения с рабочим током ~1500 А. Параллельная укладка лент не обеспечит само по себе равномерного распределения при прямой укладке лент. Но если ленты уложены на замкнутую поверхность, то все они будут находиться в одинаковых условиях, что и обеспечит равномерное распределение токов по лентам. Это было подтверждено модельными экспериментами и использовано в реальной обмотке мощного ВТСП трансформатора.

**В заключении** приведены основные выводы по работе. В результате проведённых комплексных исследований был разработан новый класс проводников, кабелей, токонесущих элементов и токовых вводов на основе ВТСП второго поколения. Это новое направление в кабельной технике, хорошо разработанное теоретически, подтверждённое и проверенное экспериментально.

Представленный автореферат диссертации, с учётом требований по его объёму,

в достаточной степени отражает полученные основные результаты и может служить надёжным источником информации, характеризующим выполненную диссертационную работу.

Диссертация представляет собой законченный труд с постановкой задачи, ее решением, комментариями и рекомендациями по практическому использованию, формулированию научной новизны и подтверждения достоверности полученных результатов. Оценивая работу, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук, следует отметить, что получены весьма важные и нетривиальные результаты, имеющие научную новизну и большую практическую ценность.

Отмечая безусловные достижения диссертационной работы следует отметить имеющиеся недостатки:

1. Из представленных результатов в главе 2 измерения анизотропии критического тока ВТСП лент неясно – одинаковая ли зависимость критического тока при параллельном внешнем магнитном поле широкой плоскости ленты при перпендикулярном и параллельном направлении транспортного тока?
2. Рис.2-17 нет комментария – почему больший диаметр оправки показывает меньшее критическое поле и растяжение лучше сжатия (Рис.2-15)?
3. В работе описана остроумная конструкция сверхпроводящего магнита на основе ВТСП первого поколения с полем на обмотке до 0.9 Тл. Не пробовал ли автор работы провести испытания при пониженной температуре с целью повышения магнитного поля?
4. Для верификации расчётных моделей оптимизации коаксиальных кабелей переменного тока были испытаны макетные кабели длиной порядка 5 метров. Существует ли какие-либо отличия в конструкции кабелей при существенном увеличении их длины?
5. В диссертации и автореферате встречаются опечатки, орфографические и пунктуационные ошибки, например, два рисунка значатся под одним и тем же номером 5-24.

Перечисленные недостатки не могут изменить общей оценки диссертационной работы, как законченного научного труда на актуальную тему, соответствующую заявленной специальности.

Диссертация Фетисова Сергея Сергеевича соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» от 24.09.2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями, утвержденными Постановлениями Правительства Российской Федерации № 335 от 21.04.2016, № 1168 от 01.10.2018 г., № 426 от 20.03.2021 г. и N 1539 от 11.09.2021 г.), а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия. Диссертация является научно-квалификационной работой, в результате которой решена научная проблема создания нового класса

сверхпроводящих кабелей, токонесущих элементов и токовводов на основе высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, позволяющих создавать эффективные электротехнические, электрофизические и электроэнергетические устройства на основе явления сверхпроводимости. В работе изложены новые, научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых имеет важное хозяйственное значение и вносит существенный вклад в развитие народного хозяйства страны.

Официальный оппонент  
Мезенцев Николай Александрович  
Доктор физико-математических наук,  
Главный научный сотрудник,  
советник директора Института ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского Отделения  
Российской Академии Наук

/Н.А.Мезенцев/

Новосибирск 630090  
Пр-т Лаврентьева 11  
т. 383 329 4155  
[mezentsev@inp.nsk.su](mailto:mezentsev@inp.nsk.su)

Подпись Мезенцева Н.А. заверено  
Учёный секретарь ИЯФ СО РАН,  
к.ф.-м.н.



А.В.Резниченко

Дата: