

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ДМ 002.262.01
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПРИ УЧАСТИИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 16.12.2015 протокол № 9

О присуждении Новикову Михаилу Станиславовичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка, изготовление и исследования сильноточных токнесущих элементов из ВТСП лент 2-го поколения» в виде рукописи по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки, принята к защите 07.10.2015г., протокол № 7, диссертационным советом ДМ002.262.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук при участии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, <http://www.itae.ru>, (495) 484-2383), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 15.02.2013г. № 75/нк.

Соискатель Новиков Михаил Станиславович 1974 года рождения, в 1997 году окончил Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет).

В 2000 году окончил очную аспирантуру Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Работает научным сотрудником Отдела сверхпроводниковых и криогенных устройств Отделения сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Отделения сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Кейлин Виктор Ефимович.

Научный консультант – д.т.н., начальник Отдела сверхпроводниковых и криогенных устройств Отделения сверхпроводимости Курчатовского комплекса НБИКС-технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Сурин Михаил Израилевич (123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Официальные оппоненты:

д.т.н., Высоцкий Виталий Сергеевич, Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности, Отделение сверхпроводящих проводов и кабелей, директор научного направления - заведующий отделением;

д.ф.-м.н., профессор Фишер Леонид Михайлович, Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации, НПО-22, директор НПО, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», в своем положительном заключении составленном председателем секции НТС отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», директором отделения НТЦ «Синтез», д.ф.-м.н., профессором Беляковым В.А., ученым секретарем секции НТС отделения НТЦ «Синтез» АО «НИИЭФА», ведущим научным сотрудником, к.ф.-м.н. Люблиным Б.В. и начальником научно-исследовательского отдела сверхпроводящих магнитных систем, к.ф.-м.н. Родиным И.Ю. (утвержденном Генеральным директором Акционерного Общества «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», д.ф.-м.н. О. Г. Филатовым), указала следующее:

1. Разработаны, изготовлены и проведен комплекс исследований токнесущих элементов (ТНЭ) сверхпроводниковых ограничителей тока (СОТ) из двух, трех и шести параллельных ВТСП лент, модулей СОТ на 250 А/380 В, СОТ на 250 А/3,5 кВ из 8 модулей, коаксиальных образцов ТНЭ для СОТ на 900 А. Полученные результаты обладают новизной и обеспечивают разработку по требованиям распределительных сетей резистивных СОТ на различные рабочие токи и напряжения.

2. Разработано и изготовлено автоматизированное устройство для намотки модулей СОТ из нескольких параллельных ВТСП лент. Обладающее новизной устройство – прототип промышленных устройств для автоматизированного изготовления СОТ. В перспективе, аналогичные устройства позволят создать промышленную технологию намотки модулей СОТ.

3. Разработаны конструкции, изготовлены и комплексно исследованы образцы геликоидального сильноточного ТНЭ, состоящего из большого количества

ВТСП лент, намотанных по спирали на круглые стальные или полые медные формеры. Впервые полученные результаты позволят приступить к применению геликоидального ВТСП ТНЭ в магнитах термоядерного источника нейтронов, плазменных электрореактивных двигателей, в импульсных магнитных системах, гибких токоподводах с проточным охлаждением и других устройствах. В работе сформулированы конкретные рекомендации к применению геликоидального ТНЭ.

4. Произведена разработка, создание и успешные испытания экспериментального устройства и технологии для изготовления длинномерных кусков геликоидального ТНЭ. Описанное экспериментальное устройство - первое в России и второе в мире специализированное автоматизированное оборудование для производства геликоидального ВТСП ТНЭ – предлагается в качестве прототипа промышленных устройств. На базе него, в настоящее время, отрабатываются промышленные технологии изготовления, и изготавливаются длинномерные образцы в поддержку конструкций геликоидального ТНЭ для различных применений.

Внедрение перечисленных устройств с применением описанных сильноточных ВТСП ТНЭ может вестись, в частности, в следующих организациях: НИЦ "Курчатовский институт", АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Объединенный институт высоких температур РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности, Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации, Московский авиационный институт, ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, ПАО «Россети», ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», РКК «Энергия», КБ Химавтоматики, различных предприятиях, входящие в состав ГК «Росатом» и ГК «Роскосмос», и во многих других научных учреждениях.

Результаты разработок и исследований, изложенных в диссертации, опубликованы в 10 работах, 6 из которых – в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях, перечисленных ниже:

- «European Conference on Applied Superconductivity» EUCAS-2011, 18-23 сентября 2011 г., Гаага, Нидерланды,
- «Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости» НКПС-2011, 6-8 декабря 2011, г. Москва,
- семинары НИЦ “Курчатовский институт” по прикладной сверхпроводимости,
- рабочее совещание «Технология ВТСП-2 проводников и их применение в устройствах электроэнергетики», 23-24 мая 2012 г., Москва,
- «Applied Superconductivity Conference» ASC2012, 7-12 октября 2012 г., Портленд, Орегон, США,

- «Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости» НКПС-2013, 26–28 ноября 2013 г., Москва,
- «Материалы ядерной техники» МАЯТ 2014, 7-9 октября 2014 г., Звенигород,
- научно-практическая конференция “Технология ВТСП-2 проводников и их применение в устройствах электроэнергетики”, г. Москва, 30-31 октября 2014 г.,
- XII Всероссийская научно-техническая конференция «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского», г. Москва, 16-17 апреля 2015 г.

Основные работы по теме диссертации:

1. Study of HTS Coaxial Cable Models, IEEE. Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 13, N2 June, 2003, pp. 1934-1937, V.E. Keilin, V.E. Sytnikov, P.I. Dolgosheev, N.V. Polyakova, G.G. Slavov, I.I. Akimov, A.I. Boev, A.N. Ivanov, I.A. Kovalev, S.A. Lelehov, M.S. Novikov, S.I. Novikov, V.I. Shcherbarov;
2. Конструкция и результаты испытаний макетного ВТСП ограничителя резистивного типа, Препринт ИАЭ-6634/10 Москва 2010, В.Е. Кейлин, В.В. Лобынцев, М.С. Новиков, С.И. Новиков, В.И. Щербаков;
3. Design and Test Results of a 1MVA Resistive Type Fault Current Limiter, Physics Procedia, Vol 36, 2012, pp. 1215 – 1218, Victor E. Keilin, Vladimir V. Lobyntsev, Mikhail S. Novikov, Stanislaw I. Novikov, Vladimir I. Shcherbakov;
4. Investigation of Current Distribution in Multi-Tape HTS Samples, Physics Procedia, Vol. 36, 2012, pp. 1225 – 1230, V.E. Keilin, V.V. Lobyntsev, M.S. Novikov, S.I. Novikov, V.I. Shcherbakov;
5. Исследование распределения токов в токонесущих ВТСП элементах, состоящих из нескольких проводников, материалы НКПС-2011, стр. 163-170, В.Е. Кейлин, В.В. Лобынцев, М.С. Новиков, С.И. Новиков, В.И. Щербаков;
6. Preparation and Experimental Investigation of Heavy-Current Transposed HTS Conductors, IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 23, No. 3, June 2013, Mikhail S. Novikov, Victor E. Keilin, Stanislav I. Novikov;
7. Изготовление и экспериментальные исследования гибких геликоидальных сильноточных ВТСП токонесущих элементов, Электричество, №1, 2014, стр. 48-55, В.Е. Кейлин, М.С. Новиков, С.И. Новиков;
8. Геликоидальные сильноточные гибкие компактные токонесущие элементы из ВТСП лент 2-го поколения, материалы НКПС-2013, стр. 338-347, В.Е. Кейлин, М.С. Новиков, С.И. Новиков, С.А. Шуваев;
9. Токонесущий элемент на основе ВТСП 2-го поколения для магнитной системы термоядерного источника нейтронов, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, стр. 22-29, М.С. Новиков, Д.П. Иванов, С.И. Новиков, С.А. Шуваев;

10. Применение высокотемпературной сверхпроводимости в перспективных космических аппаратах с ядерными энергодвигательными установками, материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского», Сборник докладов, 2015, стр.131, М.С. Новиков, В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, С.И. Новиков.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Московский авиационный институт (д.т.н., профессор, заведующий кафедрой 310 МАИ Ковалев Константин Львович) – отзыв положительный, с замечанием:

- из автореферата не ясно, проводил ли автор исследования по количественному сравнению разработанных в диссертации ТНЭ с зарубежными и отечественными аналогами.

2. Институт физики высоких энергий, НИЦ «Курчатовский институт» (начальник инженерно-физического отдела ФГУП Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий НИЦ "Курчатовский институт", д.ф.-м.н. Козуб Сергей Сергеевич) - отзыв положительный, с замечанием:

- недостаточно уделено внимания переменным и быстропеременным режимам и диссипации энергии в них, а также ряду нюансов конструкции токонесущих элементов – изоляции, кондуитам, материалу и конструкции формера. Возможно, это бросается в глаза потому, что работа представляет собой хотя и заверченный, но только лишь первый этап создания сильноточных ВТСП магнитов и устройств, и невозможно на данном этапе учесть все аспекты создания устройств.

3. Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара (заместитель генерального директора – директор подразделения сверхпроводящих материалов ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, к.т.н. Абдюханов Ильдар Мансурович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- автору стоило бы проанализировать условия разграничения возможностей применения ТНЭ, разрабатываемых им с применением ВТСП 2-го поколения, и ТНЭ из ВТСП-2 других типов, а также ТНЭ из других сверхпроводников – NbTi, Nb₃Sn, MgB₂, ВТСП 1-го поколения и т.д.,

- можно сделать замечание о недостатке внимания к материалам изоляции, формера и кондуита геликоидального ТНЭ – здесь возможны технологические и конструктивные решения, которые существенно улучшат механические, термодинамические и электродинамические параметры ТНЭ. Возможно, это будет сделано на следующих этапах работы по созданию сильноточных ВТСП устройств – в диссертации для этого заложена достаточная основа.

4. Частное учреждение государственной корпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» (ведущий научный сотрудник Частного учреждение

государственной корпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», к.т.н. Лелехов Сергей Андреевич) - отзыв положительный, с замечанием:

- применение разрабатываемых конструкций токонесущих элементов из ВТСП в токамаках, да и других крупных установках промышленной физики вряд ли будет оправдано при максимальных полях на обмотках ниже 16 Тл, за исключением некоторых особых случаев, например, японского FFHR. Для полей до 16 Тл целесообразно применение Nb_3Sn проводников, а ВТСП в тороидальных магнитах нужно будет в следующем поколении токамаков, с плотной плазмой, при поле на обмотке 16-23 Тл. Тогда же и производство ВТСП проводов сможет стать достаточно массовым для применения в токамаках. Тем не менее, начинать разработку токонесущих элементов из ВТСП для термоядерного синтеза необходимо уже сейчас, и хорошо, что такая работа делается.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- **д.т.н. Высоцкий В.С.** является ведущим специалистом в области разработки и исследований сильноточных сверхпроводниковых токонесущих элементов; он также является известным исследователем электрофизических свойств сверхпроводящих материалов, проводов и сильноточных ТНЭ; автор ряда работ по данной тематике:

1. Analysis of critical current reduction in self-field in stacked twisted 2G HTS tapes, Journal of Physics: Conference Series 507 — 2014, N.V. Bykovsky, S.S. Fetisov, A.A. Nosov, V.V. Zubko, V.S. Vysotsky;

2. HTS Tapes Cooled by Liquid Nitrogen at Current Overloads, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 1323-1327, 2011, S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky, V.V. Zubko;

3. AC Loss and Other Researches with 5 m HTS Model Cables, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 1001-104, 2011, V.S. Vysotsky, A.A. Nosov, S.S. Fetisov, K.A. Shutov;

- **д.ф-м.н. Фишер Л.М.** является ведущим специалистом в области разработки, создания и испытаний сверхпроводниковых ограничителей тока резистивного типа; он также известен своими исследованиями в области термодинамики и электрофизики сверхпроводников; автор ряда работ по данной тематике:

1. Modeling Thermal Process in a Resistive Element of a Fault Current Limiter IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, p. 7, 2008, I.N. Dul'kin, L.M. Fisher, D.V.Yevsin, V.P.Ivanov, A.V. Kalinov, V.A. Sidorov;

2. Thermal behavior of 2G HTS tape for use in resistive fault current limiters, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 234, 2010, id. 032001, D.F. Alferov, P.N. Degtyarenko, I.N. Dul'kin, L.M. Fisher, V.P. Ivanov, A.V. Kalinov, V.A. Sidorov, I F Voloshin;

3. AC Magnetization Loss of a YBCO Coated Conductor Measured Using Three Different Techniques, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, p.

3293, 2011, M. Majoros, M.D. Sumption, M.A. Susner, E.W. Collings, J. Souc, F. Gomory, M. Vojenciak, L.M. Fisher, A.V. Kalinov, I.F. Voloshin;

Выбор **Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова в качестве ведущей организации** обусловлен тем, что «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова» является многопрофильной организацией, проводящей обширные исследования, в том числе в области крупных сверхпроводниковых магнитных систем и других сверхпроводниковых устройств, а также токонесущих элементов. В институте активно ведутся работы по магнитным системам токамаков, по различным ВТСП устройствам, создается опытное производство ВТСП лент 2-го поколения и токонесущего элемента типа «рёбель» из них. Основные публикации сотрудников НИИЭФА по тематике, близкой к тематике диссертации:

1. Currents Induced in the Lap-Type Joints of Superconducting Cable-in-Conduit Conductors Exposed to the Time-Varying Magnetic Field, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, No. 3, 2012, M S. Astrov. S.A Egorov. I.Y Rodin. E.R Zapretilina. S.B. Fedotova;
2. Computational Technique for Analysis of Superconductive Fault Current Limiters With Saturated Core, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, No. 3, 2014, A. Belov, V. Belyakov, T. Belyakova, V. Bondarenko, A. Firsov, A. Hon, M. Kaparkova, N. Krylova, V. Kukhtin, E. Lamzin, M. Larionov, A. Pugachev, I. Rodin, N. Shatil, S. Sychevskiy, V. Vasiliev, and E. Zapretilina
3. Winding shop of the PF1 coil double pancakes, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 21, No. 3, pp. 1974–1977, 2010, S. Egorov, A. Mednikov, I. Rodin, A. Pugachev;

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований и разработок:**

- подготовлены научно обоснованные рекомендации для конструкций сильноточных ВТСП-2 ТНЭ, оптимизированных для конкретных применений в магнитных системах и электроэнергетических устройствах различного назначения;
- разработан способ изготовления длинномерных кусков сильноточного геликоидального ТНЭ с рабочими токами до 100 кА и создано экспериментальное устройство для изготовления длинномерных кусков сильноточного геликоидального ТНЭ;
- разработаны конструкции и изготовлены образцы сильноточного геликоидального ТНЭ, позволяющие существенно улучшить параметры магнитных систем перспективных токамаков и других крупных магнитов, а также дающие возможность создания высокоэффективных магнитных систем мощных плазменных двигателей, импульсных СПИН, различных электроэнергетических устройств и ВТСП токоподводов с рабочими токами до десятков кА;

- разработаны конструкции сильноточных ТНЭ с рабочими токами до 900 А, токоограничивающих модулей и резистивных СОТ на напряжение до 27,5 кВ, создано экспериментальное устройство для изготовления модулей СОТ
- проведенные исследования и разработки ТНЭ для резистивных СОТ позволят создать ряд промышленных устройств с различными требуемыми параметрами ограничения тока короткого замыкания для распределительных электросетей.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

применение разработанных конструкций ТНЭ и автоматизированных устройств для изготовления ТНЭ позволит создать сильноточные ВТСП-2 устройства различных классов, в частности:

- перспективных высокополевых ВТСП магнитов токамаков, ускорителей частиц, крупных научно-исследовательских и промышленных магнитных систем;
- импульсных и крупных ВТСП магнитов бортовых и портативных магнитных систем, в том числе для космического применения и для флота – можно выделить магниты безэлектродных плазменных двигателей, магнитную защиту космических аппаратов, обмотки электрогенераторов и электродвигателей, высокополевые магниты МГД генераторов, для МГД движителей;
- токоограничителей резистивного, а также индуктивного типов;
- гибких компактных токоподводов постоянного тока для промышленности и установок индустриальной физики.

Разработка перечисленных устройств с применением описанных сильноточных ВТСП ТНЭ может вестись, в частности, в следующих организациях: НИЦ "Курчатовский институт", АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Объединенный институт высоких температур РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности, Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации, Московский авиационный институт, ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, ПАО «Россети», ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», РКК «Энергия», КБ Химавтоматики, различных предприятиях, входящие в состав ГК «Росатом» и ГК «Роскосмос», и во многих других научных учреждениях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- применены проверенные экспериментальные методики, показана воспроизводимость результатов исследования;
- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, общепризнанных законах электродинамики и теплофизики. Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;
- результаты работы опубликованы в рецензируемых изданиях.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в выборе темы исследования, постановке задач. Диссертант является соавтором научных работ по теме исследования. Все основные результаты диссертации получены либо полностью диссертантом, либо при его непосредственном участии: участие в разработке и изготовлении намоточных устройств, изготовлении модулей СОТ и 8-модульного СОТ в разработке методик, исследования ВТСП лент и геликоидальных ТНЭ, ТНЭ для СОТ, модулей СОТ, в расчетах распределения поля в СОТ и в геликоидальном ТНЭ; изготовление образцов геликоидального ТНЭ и ТНЭ для СОТ; обработка результатов исследований ВТСП лент, ТНЭ для СОТ, геликоидальных ТНЭ; расчеты геометрии ТНЭ, деформации ВТСП в геликоидальном ТНЭ, тепловых процессов в ТНЭ, численное моделирование процессов в СОТ;

Апробация результатов исследования проводилась на более чем 10 российских и международных конференциях и симпозиумах, в которых соискатель принимал личное участие.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 16.12.2015г. диссертационный совет принял решение присудить Новикову М.С. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 19 докторов наук по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета (дополнительно введены на разовую защиту 0 человек), проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета ДМ 002.262.01

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН

Лагарьков А.Н.

Ученый секретарь диссертационного совета ДМ 002.262.01

к.ф.-м.н.

Кугель К.И.

16.12.2015 г.

