
**ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

УДК 538.955.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
КОНТАКТА В НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ВТСП ОБМОТКАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ**

© 2026 г. И. В. Мартиросян^а, *, Д. А. Александров^а, А. Ю. Малявина^а, А. А. Михайлов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: mephizic@gmail.com

Поступила в редакцию 02.05.2025 г.

После доработки 28.07.2025 г.

Принята к публикации 31.07.2025 г.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований теплового поведения сдвоенной неизолированной галетной ВТСП обмотки (дабл-панкейка) при инициации переходных процессов с использованием локального теплового возмущения. Представлены экспериментально измеренные вольтамперные характеристики обмотки при различных токах нагревателя. С использованием численной модели проведено определение уровня теплового и электрического контактов между витками обмотки, продемонстрированы различия в тепловом поведении обмотки при различных уровнях межвиткового контакта.

Ключевые слова: ВТСП композиты, тепловой и электрический контакт, неизолированные ВТСП обмотки, распространение нормальной зоны

DOI: 10.56304/S2079562926010288

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), в частности современные ленточные сверхпроводники, находят все более широкое практическое применение в различных областях науки и техники. Они нашли применение в энергетике (сверхпроводниковые накопители энергии [1]), медицине (установки магнитно-резонансной томографии [2]), науке (установки ядерного магнитного резонанса и высокополевые магниты [2]), в промышленности (магнитные сепараторы [3]), а также в транспорте (поезда на магнитной подушке [4]). В частности, особый интерес представляют так называемые галетные обмотки (pancake coils в англоязычной литературе) и сдвоенные галетные обмотки (double-pancake coils). При разработке и эксплуатации устройств из ВТСП обмоток критическим аспектом остается их стабильность. Поэтому одним из ключевых объектов исследования является так называемое распространение нормальной зоны (РНЗ), возникающее в случае локального теплового возмущения в следствие возникшего течения магнитного потока — квенча [5].

РНЗ в галетных обмотках имеет ряд специфических особенностей, обусловленных их геометрией, наличием или отсутствием изоляционного

покрытия на ленточных сверхпроводниках и анизотропией теплопроводности. Одними из перспективных методов токовой стабилизации ВТСП катушек является использование неизолированных сверхпроводящих обмоток (НИСО) [6–8] и использование твердого азота для их охлаждения для дополнительной термической стабилизации из-за его высокой теплоемкости [9]. Большинство работ по исследованию процессов РНЗ выполнены для отдельных ВТСП элементов, однако в литературе сравнительно небольшое количество экспериментальных [10, 11] и расчетных [12] работ, посвященных исследованиям процессов распространения нормальной зоны и способам детектирования квенча в самих сверхпроводящих обмотках. Скорость распространения нормальной зоны в ВСП составляет несколько сантиметров в секунду, что на несколько порядков ниже, чем в низкотемпературных сверхпроводниках. Из-за этой особенности и разрушающего эффекта квенча невозможно проводить измерение асимптотического значения скорости РНЗ вдали от точки теплового возмущения. При этом в большинстве работ авторы ограничиваются использованием универсальных методов минимизации риска теплового разрушения ВТСП лент [13], или избеганием превышения экспериментально определенных критических “квенч-напряжений” [14].

Другой важной проблемой, затрудняющей анализ процессов РНЗ в НИСО, является определение свойств контактов между витками. Определение уровня механического, электрического и теплового контактов в неизолированных галетных ВТСП обмотках представляет собой сложную задачу и значительно затрудняет моделирование подобных систем [15].

В настоящей работе в рамках исследования тепловых свойств НИСО проведены экспериментальные измерения воль-амперной характеристики (ВАХ) дабл-панкейка с нагревателем при различных токах нагревателя. Для оценки коэффициента теплового и электрического контактов между витками НИСО используется численная модель, ранее верифицированная путем сравнения расчетных результатов с аналитическим решением для двух идеальных случаев – обмотки с идеальной тепловой изоляцией и обмотки с идеальным тепловым контактом [16]. После чего, варьируя коэффициент теплового и электрического контактов в модели, можно добиться совпадения численных ВАХ с экспериментальными и таким образом определить искомые характеристики контакта между витками обмотки. Полученные свойства межвитковых контактов могут быть использованы для прогнозирования развития процессов распространения нормальной зоны при различных режимах охлаждения и нагрузки.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве образца для экспериментальных, а также численных исследований выступает ВТСП обмотка, которая представляет собой сдвоенную галетную катушку (дабл-панкейк), намотанную из ВТСП ленты ширины 4 мм на круглый формер диаметра 45 мм сверхпроводящим слоем внутрь. Общее количество витков ВТСП ленты составляет 10 (по 5 слоев в галете). Для реализации обмотки использована неизолированная ВТСП лента на основе соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (далее YBCO) промышленного производства российской компании Суперокс [17]. Критический ток ВТСП ленты в собственном магнитном поле при температуре кипения жидкого азота (77.4 К) и давлении насыщенных паров (101.3 кПа) составляет 120 А. Критическая температура контрольных образцов ВТСП ленты была измерена экспериментально и согласно данным транспортных измерений составила 92 К. Ширина сверхпроводящего перехода по температуре не превышает 0.3 К.

Для проведения тестовых экспериментальных исследований процессов РНЗ в НИСО при инициации процессов РНЗ посредством локального теплового воздействия был изготовлен экспериментальный стенд для измерения вольтамперных характеристик ВТСП обмоток, охлаждаемых

жидким азотом. Экспериментальный стенд включает криостат с держателем образца НИСО (с закрепленным на обмотке нагревателем), импульсный источник постоянного тока (максимальный ток – 300 А, напряжение – 3 В), нановольтметр Agilent 34420, источника тока нагревателя и расчетно-измерительный комплекс (управляющий компьютер). Для экспериментального исследования транспортных свойств ВТСП катушки с нагревателем используется четырехконтактная схема подключения. Нагревательный элемент с сопротивлением 100 Ом и геометрическими размерами $2 \times 2 \times 0.1$ мм закрепляется на третьем из пяти слоев верхней части дабл-панкейка. Общий вид распределительной коробки с установленным образцом, а также принципиальная схема проведения измерений представлены на рис. 1. Намотка катушки выполняется без фиксированного натяжения, однако для механической стабилизации обмотки последний слой закрепляется на форме с помощью каптона, что позволяет предотвратить смещение витков в процессе проведения измерений. В процессе экспериментальных исследований образец помещается в криостат с жидким азотом, после чего на нагреватель подается постоянный ток в интервале от 0 до 100 мА. После установления теплового равновесия в системе производится измерение воль-амперной характеристики ВТСП обмотки.

3. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование динамики тепловых процессов в неизолированных ВТСП обмотках при инициации переходных процессов посредством локального теплового возмущения выполнено методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics. В качестве управляющего уравнения системы выступает нестационарное неизотермическое уравнение теплового баланса, где в качестве объемного источника тепла выступают, во-первых, ВТСП слой обмотки, переносящий электрический ток, монотонно возрастающий от 0 до 100 А за 20 секунд, и, во-вторых, объемный источник нагревателя на третьем витке с постоянным током (в интервале от 0 до 100 мА). Геометрия ВТСП обмотки и положение нагревателя полностью соответствуют геометрии экспериментальных исследований. Используемая для реализации обмотки ВТСП лента представляет собой композит со сложной слоистой архитектурой, содержащей слои подложки сплава Хастеллой С-276 толщины 40 мкм, буферные слои общей толщины ~120 нм, ВТСП слой YBCO толщины 2 мкм, слой серебра толщины 3 мкм, а также двустороннее медное покрытие, толщина которого составляет 10 мкм с каждой стороны. В рамках численной модели слои-

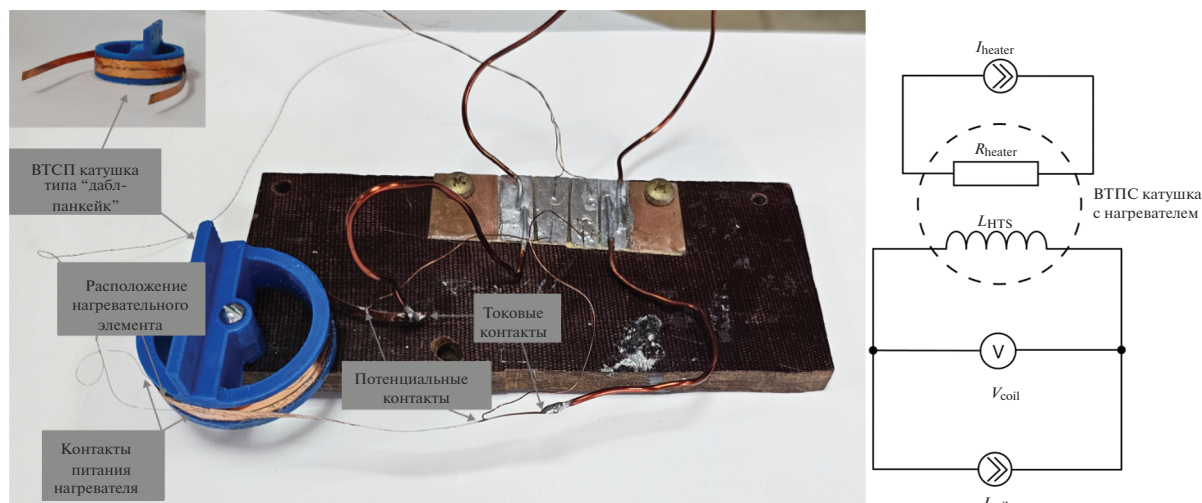


Рис. 1. Общий вид держателя образца (слева) и принципиальная схема измерений (справа) для проведения экспериментальных исследований транспортных свойств ВТСП обмотки.

стая архитектура лент учитывается в явном виде, за исключением буферных слоев, которые задаются как тонкий (плоский) резистивный слой с усредненными характеристиками. Сопротивление ВТСП слоя ρ_{HTS} задается в виде кусочно-непрерывной функции вида:

$$\rho_{\text{HTS}}(T) = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \rho_{\text{sh}}(T, J), & T_s \leq T < T_c \\ \rho_n(T), & T \geq T_c \end{cases} \quad (1)$$

где T_s – температура начала сверхпроводящего перехода, T_c – критическая температура ВТСП лент, J – плотность тока. Когда $T < T_s$, сопротивление ВТСП слоя пренебрежимо мало, и весь ток протекает в сверхпроводнике. При возникновении горячей точки с температурой в диапазоне $T_s \leq T < T_c$, сопротивление $\rho_{\text{sh}}(T, J)$ рассчитывается согласно степенному закону для нелинейной вольтамперной характеристики (ВАХ) сверхпроводника [18], для которого температурная зависимость показателя степени n определяется согласно транспортным измерениям ВАХ ВТСП лент. При этом между T_s и T_c токи могут перераспределяться между слоями ВТСП композита. При температурах выше T_c сверхпроводник находится в нормальном состоянии, и все токи протекают в несверхпроводящих слоях с сопротивлением $\rho_n(T)$. Для учета зависимости критического тока от магнитного поля и температуры в рамках модели в виде интерполяции экспериментальных данных вводится критическая поверхность для лифт-фактора критического тока ВТСП лент [17]. Контакты между витками ВТСП обмотки моделируются как

тонкие (плоские) резистивные слои, определяющие контактные сопротивления между медными слоями соседних витков согласно выражениям:

$$J_1 = \frac{1}{d_s} \left(\sigma + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial}{\partial t} \right) (V_1 - V_2), \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{d_s} \left(\sigma + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial}{\partial t} \right) (V_2 - V_1), \quad (3)$$

где $J_{1,2}$, $V_{1,2}$ – проекции плотностей токов на вектор нормали и величины электрических потенциалов соответственно, d_s – толщина слоя меди (10 мкм), $\sigma = 1/\rho(T)$ – проводимость меди, ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость меди, t – время. Для каждого из моделируемых слоев учитываются экспериментально измеренные зависимости теплопроводностей k и теплоемкостей C_p от температуры T , а также температурные зависимости сопротивлений для несверхпроводящих слоев [19]. Стоит отметить, что коэффициенты теплового k_T и электрического k_e контактов взаимосвязаны благодаря одинаковой геометрии контакта и физической зависимости между теплопроводностью и электропроводностью, выраженной законом Видемана–Франца [20]. При условиях, характерных для неизолированных ВТСП обмоток, эти коэффициенты оказываются приблизительно равными, что подтверждается как теоретическими расчетами, так и экспериментальными данными [21]. На практике уровни электрического и теплового контактов также тесно связаны со степенью механического контакта между витками обмотки и для электрически неизолированных систем также, как правило, оказываются одного

порядка величины, особенно в случае одинаковых материалов контакта. Поскольку величина механического контакта не является предметом обсуждений настоящей работы, она задается равной единице, а управление контактными свойствами обмотки осуществляется посредством варьирования коэффициента $k_{e-T} = k_T \approx k_e$, на который могут быть умножены теплопроводность и электропроводность границы контактов витков ВТСП обмотки. Учет приблизительного равенства теплового и электрического контактов позволяет существенно упростить численные модели без значительной потери в точности. Таким образом, в рамках модели предполагается идеальный тепловой и электрический контакт между отдельными слоями ВТСП композитов, а уровень контакта самих ВТСП лент в обмотке (межвитковый контакт k_{e-T}) является варьируемым параметром и изменяется от 0 до 1, где 0 — полное отсутствие контакта (электрическая и термическая изоляция), а 1 — идеальный контакт.

И наконец, на внешних границах ВТСП обмотки задаются условия теплоотвода, соответствующие контакту обмотки с жидким азотом с учетом гистерезисного характера кривой кипения хладагента.

При моделировании азотного охлаждения НИСО рассматриваются два режима кипения — конвективный (или стационарный) и пузырьковый. Эти режимы характеризуются различными коэффициентами теплоотдачи. Для пузырькового кипения коэффициент теплоотдачи рассчитывается как:

$$\alpha_{\text{boil}} = C_h q^{0.624} (\rho C_p k)^{0.117}, \quad (4)$$

где ρ — плотность, C_p — теплоемкость, k — теплопроводность жидкого азота, q — тепловой поток, C_h — коэффициент [17, 22].

Коэффициент теплоотдачи для стационарного кипения жидкого азота определяется разностью температур ΔT на границе между стопкой лент и жидким азотом и рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{\text{conv}} = C_{\text{conv}} \Delta T^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

C_{conv} — коэффициент [17, 23].

Выбор использования того или иного коэффициента теплоотдачи зависит от разницы температур ΔT и теплового потока в жидкий азот q и задается с помощью условия “if”.

Поскольку в некоторых жидкостях, в том числе в жидком азоте, при быстром росте теплового потока может возникнуть дополнительный перегрев (задержка момента кипения) на несколько градусов ΔT_{oh} (overheating), температура кипения жидкости может превышать обычное значение теплового напора начала пузырькового кипения ΔT_{cb} (переход от конвекции к кипению). Следовательно, условие “if” первого типа выполняется,

когда разность температур ΔT достигает температуры перегрева жидкого азота ΔT_{oh} , которая задается постоянной равной 3 К. При уменьшении теплового потока возврат от пузырькового кипения к конвекции происходит не при перепаде температур ΔT_{oh} , а при перепаде температур ΔT_{cb} (второй тип условия “if”), т. е. имеет место гистерезис кипения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное измерение вольтамперных характеристик для ВТСП обмотки было выполнено при охлаждении жидким азотом при давлении насыщенных паров для различных величин тока нагревателя (в интервале от 0 до 100 мА). Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2. Хорошо видно, что для каждого из исследованных случаев при увеличении приложенного к обмотке тока имеет место два режима: низкоомный режим с почти нулевым напряжением (так называемый режим крипа магнитного потока), а также омический режим (режим течения магнитного потока), характеризующийся резким нелинейным ростом напряжения на образце. Причем чем выше ток нагревателя, тем раньше наблюдается возникновение омического режима обмотки. Такое поведение обусловлено локальным снижением критического тока ленты в зоне теплового возмущения в следствие дополнительного нагрева от нагревателя. Стоит отметить, что само по себе возникновение омического режима еще не свидетельствует о переходе обмотки в нормальное состояние (резистивный режим), но говорит о возникновении термодинамической неустойчивости.

Для исследуемой системы выберем в качестве критерия существования омического режима напряжение на обмотке величины $U_{\text{ohm}} = 5$ мВ, точно зная, что при любом токе нагревателя при напряжении 5 мВ ВАХ сверхпроводника находится в нелинейном режиме течения магнитного потока (см. рис. 2). В рамках численного моделирования этот критерий будет задан как напряжение отсечки для построения модельной ВАХ и дальнейшего сравнения с экспериментальными данными. Результаты численного анализа подтвердили, что при снижении коэффициента межвиткового контакта k_{e-T} величина транспортного тока, при котором наблюдается возникновение напряжения U_{ohm} , также снижается. Этот результат является вполне предсказуемым, поскольку чем ниже степень контакта витков, тем хуже токи и выделявшееся тепло могут перераспределяться между соседними витками обмотки. Для визуализации влияния свойств межвиткового контакта на тепловые процессы в НИСО на рис. 3 представлены распределения температур для фрагмента

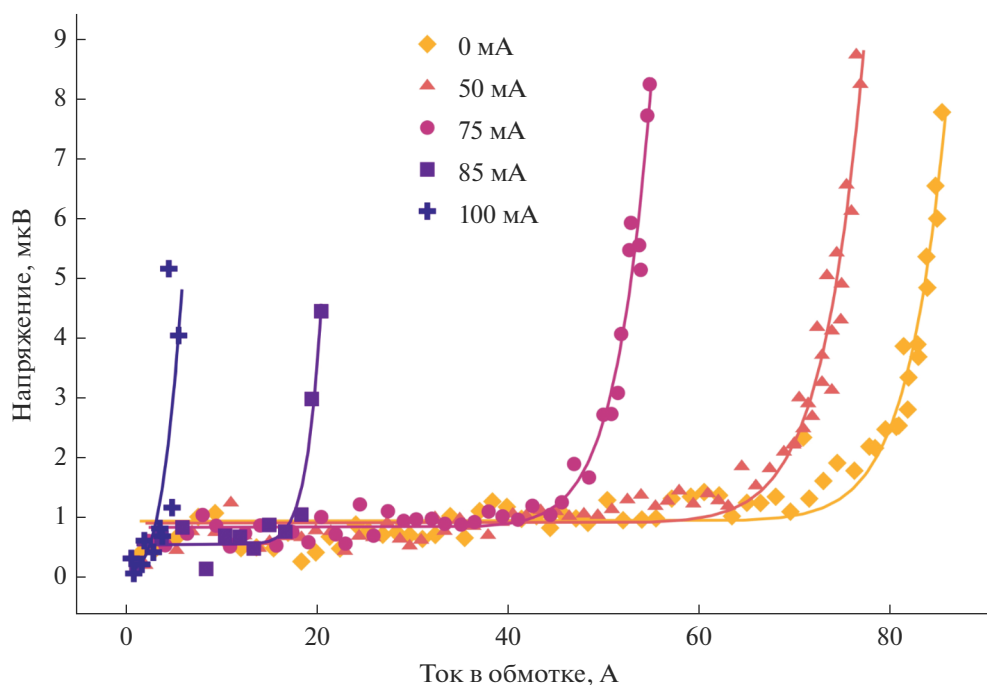


Рис. 2. Вольтамперные характеристики неизолированной ВТСП обмотки при различных токах нагревательного элемента с сопротивлением 100 Ом, установленного на 3 из 5 витков. Охлаждение жидким азотом.

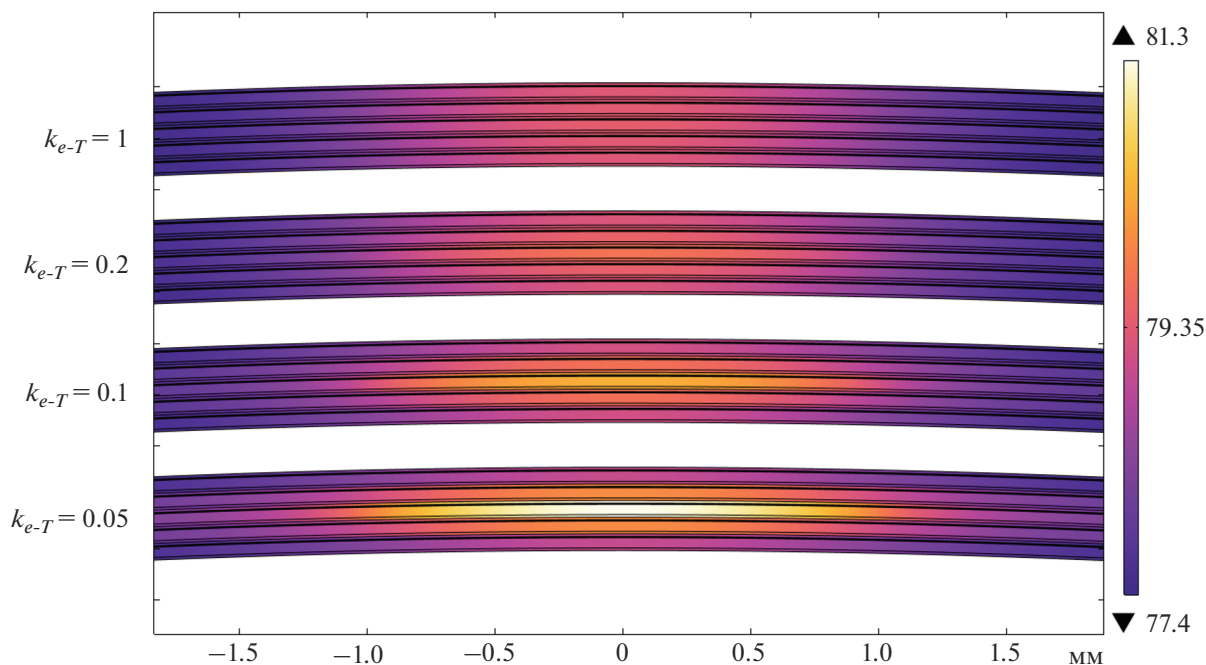


Рис. 3. Стационарные температурные распределения во фрагменте ВТСП обмотки в зоне нагревателя при различных значениях коэффициента межвиткового контакта k_{e-T} . Нагреватель с сопротивлением 100 Ом и током 50 мА расположен на 3 витке обмотки. Охлаждение жидким азотом.

обмотки в зоне нагревателя (при токе нагревателя 50 мА) при различных значениях k_{e-T} после установления теплового равновесия в системе.

Действительно, при наиболее низком уровне межвиткового контакта тепло, выделяющееся в зоне нагревателя, оказывается «запертым» в гре-

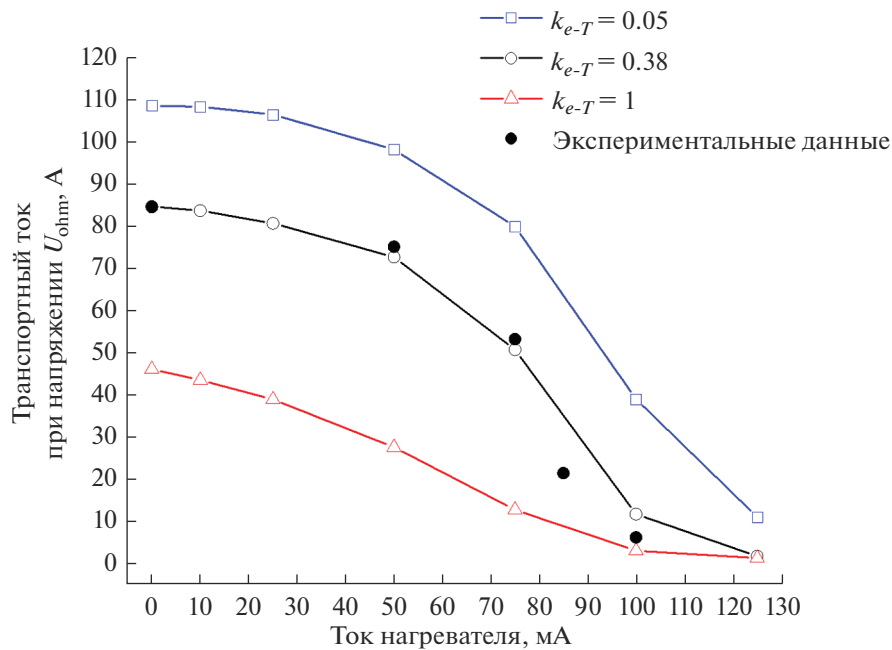


Рис. 4. Зависимости транспортного тока в ВТСП обмотке при напряжении 5 мкВ от тока нагревателя при различных значениях коэффициента межвиткового контакта k_{e-T} . Нагреватель с сопротивлением 100 Ом и током 50 мА расположен на 3 витке обмотки. Охлаждение жидким азотом.

ющемся витке и распространяется в большей степени в продольном направлении ВТСП обмотки. При изменении величины тока нагревательного элемента картина качественно не отличается от представленной на рис. 3. Важно отметить, что на рис. 3 представлены распределения после установления теплового баланса между теплопритоком от нагревателя и теплоотводом в жидкий хладагент. Несмотря на то, что стационарные во времени температурные распределения при величине k_{e-T} свыше 0.2 визуально становятся трудно-различимы, динамика тепловых процессов при развертке транспортного тока в обмотке сильно зависит от ее контактных свойств. При плавном изменении тока в рамках численного анализа воспроизводится полная ВАХ обмотки с учетом магнитной и тепловой предыстории сверхпроводника, что позволяет оценить значения k_{e-T} путем сравнения результатов расчета с соответствующими экспериментальными данными.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости для нескольких значений k_{e-T} и экспериментальные точки для величины тока обмотки, при котором достигается критерий по напряжению $U_{ohm} = 5$ мкВ, от величины тока нагревателя с сопротивлением 100 Ом. Наилучшее совпадение расчетных результатов с экспериментальными данными было достигнуто при величине межвиткового контакта $k_{e-T} = 0.38$. Сравнительно низкий уровень контакта может быть обусловлен двумя основными факторами, влияющими на эффективную площадь

контакта: недостаточным механическим натяжением при намотке катушки и влиянием коэффициента теплового расширения материалов на геометрию обмотки при охлаждении до криогенных температур. Свойства межвиткового контакта в обмотках определяются, прежде всего, условиями его создания (например, уровень механического натяжения при намотке) и последующими условиями эксплуатации (например, влияние магнитного поля на распределение механических напряжений). Эти факторы оказывают значительное влияние не только на электропроводность и теплопроводность контакта, но и на устойчивость обмотки в целом к переходным процессам. В связи с этим экстраполяция результатов, полученных для одной конфигурации ВТСП обмоток, на другие типы или геометрии является некорректной.

Примечательным является также тот факт, что в модельном случае идеального контакта ($k_{e-T} = 1$) в отсутствие тока на нагревательном элементе максимальный ток при $U_{ohm} = 5$ мкВ несколько ниже критического тока самой ВТСП ленты (120 А). Это может быть связано, во-первых, с менее эффективным теплоотводом в слоистой обмотке (в сравнении с непосредственным контактом ленты с жидким азотом), а, во-вторых, с влиянием на критический ток композита магнитного поля, индуцируемого ВТСП катушкой в целом.

Таким образом, с использованием комбинации экспериментальных исследований с методами численного моделирования была проведена

оценка свойств теплового и электрического контакта в галетной неизолированной ВТСП обмотке. Стоит уточнить, что при недостаточном механическом натяжении при намотке и полном погружении обмотки в жидкий азот хладагент может проникать между витками, значительно увеличивая интенсивность охлаждения. В настоящей работе данный эффект не учитывается, что может приводить к некоторым отклонениям между расчетными и экспериментальными данными, особенно при увеличении масштаба обмоток. В дальнейшем планируется включение в численную модель взаимосвязь площади механического контакта витков с параметрами охлаждения системы. Тем не менее, полученные результаты позволяют проводить оценку степени теплового и электрического контакта между витками в НИСО и применять эти данные для прогнозирования и анализа теплового поведения ВТСП обмоток.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований теплового поведения двоянной неизолированной галетной ВТСП обмотки (дабл-панкейка) при инициации переходных процессов с использованием локального теплового возмущения. Получены экспериментальные вольтамперные характеристики ВТСП обмотки при различной величине тока нагревательного элемента, установленного на среднем витке ВТСП обмотки. Установлено, что при токе нагревателя в интервале от 0 до 100 мА при увеличении приложенного к обмотке тока имеет место два режима: низкоомный режим с почти нулевым напряжением (погрешность ~ 1 мкА) и омический режим, характеризующийся резким нелинейным ростом напряжения на образце. При увеличении тока нагревателя возникновение омического режима в обмотке наблюдается при более низких транспортных токах, что обусловлено локальным снижением критического тока ленты в зоне теплового возмущения.

С использованием методов численного моделирования показано наличие влияния уровня межвиткового контакта на распределение температур в обмотке при установлении теплового равновесия в системе. Кроме того, путем сравнения модельных и экспериментальных ВАХ ВТСП катушки проведена оценка коэффициента теплового и электрического контакта между витками обмотки. Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных было достигнуто при величине межвиткового контакта $k_{e-T} = 0.38$. Сравнительно низкий уровень контакта может объясняться слабым натяжением при намотке и влиянием коэффициента теплового расширения материалов на геометрию обмотки при охлаждении. Было показано, что даже при наличии идеального

теплового и электрического контактов между витками, переход обмотки в омический режим наблюдается при токах, ниже номинального критического тока ВТСП ленты. Такое поведение обусловлено менее эффективным теплоотводом посредством теплопроводности между витками в сравнении с непосредственным контактом ленты с хладагентом, а также влиянием магнитного поля обмотки на критический ток ВТСП лент. Таким образом, представленная модель применима для анализа теплового поведения НИСО, а полученные с использованием экспериментальных и численных методов свойства межвитковых контактов могут быть использованы для прогнозирования развития процессов распространения нормальной зоны в НИСО при различных режимах охлаждения и нагрузки.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00278, <https://rscf.ru/project/24-79-00278/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Gupta R. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26 (4). P. 5700208.
2. Kim W.-S. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25 (3). P. 4301504.
3. Rey C.M. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2002. V. 12 (1). P. 971–974.
4. Dong F. et al. // Energy. 2020. V. 190. P. 116403.
5. Lécrevisse T. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2022. V. 35 (7). P. 074004.
6. Choi J. et al. // J. Phys. 2017. V. 871 (1). P. 012086.
7. Hahn S., Park D.K., Bascunan J., Iwasa Y. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21 (3). P. 1592–1595.
8. Yoon S. et al. // Phys. C (Amsterdam, Neth.). 2013. V. 494. P. 242–245.
9. Lee J. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. V. 31 (5). P. 4601205.
10. Marchevsky M. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (6). P. 4701705.
11. Heller R., Blanchier P., Fietz W.H., Wolf M.J. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2019. V. 29 (7). P. 4703111.
12. Janitschke M. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. V. 31 (5). P. 4000905.
13. Park D. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. V. 31 (5). P. 4300206.
14. Kim H.-W., Jo Y.-S., Kim S.-W. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2023. V. 33 (5). P. 4602505.
15. Pi W. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2020. V. 33 (8). P. 084005.
16. Мартиросян И.В., Александров Д.А., Покровский С.В., Анищенко В.В. // Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. 2025. № 1 (6). С. 34–45. <https://doi.org/10.62539/2949-5644-2025-6-1-34-45>

17. Zubko V.V., Ryabov S.M., Fetisov S.S., Vysotsky V.S. // Phys. Procedia. 2015. V. 67. P. 619–624.
18. Покровский С.В., Мартиросян И.В., Александров Д.А. // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10 (4). С. 537–555.
19. Van Nugteren J. Normal Zone Propagation in a Yb–Co Superconducting Tape. 2012. Enschede, The Netherlands: Univ. Twente.
20. Jonson M., Mahan G.D. // Phys. Rev. B. 1980. V. 21 (10). P. 4223.
21. Chang H.-M., Lee S.I. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22 (3). P. 4800904.
22. Stephan K., Abdelsalam M. // Int. J. Heat Mass Transf. 1980. V. 23 (1). P. 73–87.
23. Высоцкий В.С., Зубко В.В., Рябов С.М., Фетисов С.С. // Наука и техника. 2015. V. 3 (362). P. 3–7.

Determination of Thermal and Electrical Contact Characteristics in Non-Insulated HTS Windings Using Experimental and Numerical Methods

I. V. Martirosian¹, *, D. A. Aleksandrov¹, A. Y. Malyavina¹, and A. A. Mikhailov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: mephizic@gmail.com

Received May 2, 2025; revised July 28, 2025; accepted July 31, 2025

Abstract—This paper presents the results of experimental and numerical investigation of the thermal behaviour of a non-insulated double-pancake HTS winding during the initiation of transition processes using a local thermal perturbation. Experimentally measured voltampere characteristics of the winding at different heater currents are presented. Using a numerical model, the level of thermal and electrical contact between winding turns has been determined, and differences in the thermal behaviour of the winding with different coefficients of inter-winding contact have been demonstrated.

Keywords: HTS, thermal and electrical contact, non-insulated HTS windings, normal zone propagation