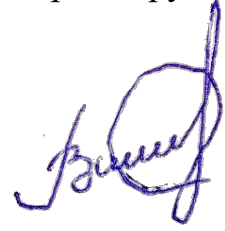


На правах рукописи



Ильин Владислав Викторович

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА В СОСТАВЕ
ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность:

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Моржухина Алена Вячеславовна**
кандидат технических наук

Официальные
оппоненты: **Лившиц Михаил Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов»

Просунцов Павел Викторович
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 24 декабря 2025 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186211

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06,
д.т.н., доцент



Краев В. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Развитие энергетических систем нового поколения требует создания высокоэффективных, компактных и мощных электрических машин. Существенное улучшение массогабаритных и энергетических характеристик может быть достигнуто за счет применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), что делает данное направление одним из наиболее перспективных. К настоящему моменту усилиями научных коллективов доказана принципиальная возможность и перспективность создания подобных машин на основе ВТСП для летательных аппаратов.

Широкое внедрение ВТСП-технологий сдерживается недостаточной изученностью теплофизических свойств сверхпроводниковых материалов и конструкций на их основе, особенно в условиях криогенных температур и сложных многокомпонентных структур. Теплофизические характеристики, такие как теплопроводность и теплоёмкость, оказывают непосредственное влияние на стабильность работы сверхпроводниковых устройств, эффективность систем охлаждения и общую надежность. Особую сложность представляет собой многослойная структура ВТСП-лент, что делает её аналогом композиционного материала с анизотропными и нелинейными свойствами.

В этой связи разработка методики экспериментально-расчётного определения эффективных теплофизических характеристик ВТСП-материалов и обмоток на их основе с использованием методов решения обратных задач теплообмена (ОЗТ) является актуальной научной задачей. Теоретическая база и методология решения ОЗТ успешно апробированы для решения широкого круга прикладных задач в технической отрасли, включая определение теплофизических свойств различных материалов (работы О.М. Алифанова, А.К. Алексеева, Е.А. Артюхина, В.Н. Елисеева, И.С. Кабанихина, Л.А. Коздобы, Ю.М. Мацевитого, Ю.В. Полежаева, С.В. Резника, Д.Ф. Симбирского, В.М. Юдина, А.Г. Яголы). Вместе с тем, комплексное применение этих методов для определения эффективных теплофизических свойств именно ВТСП-материалов и конструкций представляет собой новую задачу.

Таким образом, исследование теплофизических характеристик ВТСП-обмоток с разработкой комплексной методики экспериментально-расчётного их определения на основе методов решения ОЗТ является актуальным и восполняет существующий пробел между теоретическими возможностями методов решения ОЗТ и практическими потребностями проектирования перспективных сверхпроводниковых устройств.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка методики определения теплофизических свойств высокотемпературного сверхпроводникового материала, который используется в качестве обмотки катушки в составе конструкции статора электрогенератора, расчётно-экспериментальным методом с применением идентификации тепловых процессов на основе методов решения ОЗТ. Частными вопросами данной научной проблемы являются следующие:

1. Постановка задач идентификации математических моделей теплообмена с различным числом пространственных измерений.

2. Разработка алгоритмов идентификации промежуточных (упрощённых) моделей и уточнения подробной модели по промежуточным.

3. Планирование и имитационное моделирование режимов теплофизического эксперимента по подробной и промежуточным моделям.

4. Проведение эксперимента для решения задач идентификации.

5. Применение алгоритмов идентификации для определения свойств ВТСП-материала в составе конструкции катушки электрогенератора.

6. Сопоставление экспериментальных температурных полей во времени с полями, полученными по уточнённой модели для оценки её адекватности.

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования выступает обмотка катушки статора генератора, выполненная из ВТСП-материала. Предметом исследования являются алгоритмы идентификации моделей теплопереноса в композитном материале обмотки катушки статора и его корпуса, а также свойства этих материалов как искомые элементы последовательностей, к которым сходятся итерационные процессы алгоритмов.

Научная новизна исследования

Разработаны алгоритмы идентификации моделей теплопереноса в ВТСП-материале обмотки катушки статора, которая является частью генератора для использования в опытной силовой криогенной энергосистеме летательных аппаратов. Исследованы теплофизические характеристики обмотки из ВТСП-ленты посредством использования расчётно-экспериментальной методики на основе методов решения ОЗТ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработанная методика и найденные теплофизические свойства могут быть использованы для дальнейшего исследования электротеплового взаимодействия высокотемпературного сверхпроводника и установления взаимосвязи между теплопроводностью и электропроводностью в температурном интервале выше точки перехода в сверхпроводящее состояние, а также для изучения влияния технологических параметров производства ВТСП-лент (таких как тип и толщина стабилизирующих слоев) на их эффективные теплофизические характеристики.

Методология и методы исследования

Теоретические и экспериментальные исследования проведены в рамках системной методологии, связывающей между собой математические и физические модели, рассматриваемые в единой системе, параметры и функции которой настраиваются решением обратных задач. Методологическую основу исследования составляют иерархическая идентификация, двухмодельный метод, метод регуляризации и метод итерационной регуляризации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы идентификации моделей теплопереноса в ВТСП-материале, который используется в качестве обмотки катушки в составе конструкции статора электрогенератора.

2. Результаты исследования теплофизических характеристик образцов ВТСП-материалов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность разработанной методики и полученных с её помощью результатов обеспечивается корректностью исходных допущений и подтверждается согласованностью численного моделирования с экспериментальными данными и аналитическими решениями.

Основные научные результаты работы были представлены на ряде научно-технических конференций. В частности, на XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева: «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (24-28 мая 2021 г., Екатеринбург), на 8-ом Международном симпозиуме по достижениям в области вычислительной теплопередачи (8th International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, 15-19 августа 2021 г., онлайн), на Всероссийской конференции «XXXVII Сибирский теплофизический семинар» (14-16 сентября 2021 г., Новосибирск), на XLIX Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (11-14 апреля 2023 г., Москва), на XXII Международной конференции «Авиация и космонавтика» (20-24 ноября 2023 г., Москва), на XLVIII Академических чтениях по космонавтике «Королёвские чтения» (23-26 января 2024 г., Москва), на XVII Минском международном форуме по тепломассообмену (20-24 мая 2024 г., Минск, Беларусь), на 11-ой Международной конференции «Обратные задачи в технике: теория и практика» (11th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, 23-28 июня 2024 г., Бузиус, Бразилия), на IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (21-25 октября, 2024 г., Москва).

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 12 публикациях, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ и приравниваемых к ним.

Личный вклад автора

Основные положения диссертации получены автором лично, либо при его непосредственном участии, что подтверждено публикациями, заимствованный материал обозначен в работе ссылками. Автором проведен краткий обзор текущего состояния проблемы, сформулированы задачи исследования, разработаны математические модели и алгоритмы их идентификации. Автор принимал участие в подготовке и проведении испытаний в роли инженера научно-исследовательского отдела и непосредственно обработал экспериментальные данные, используя разработанную методику, в результате чего получил искомые теплофизические свойства объекта исследования.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы; содержит 111 страниц основного текста, 41 рисунок, 8 таблиц, 87 литературных источников.

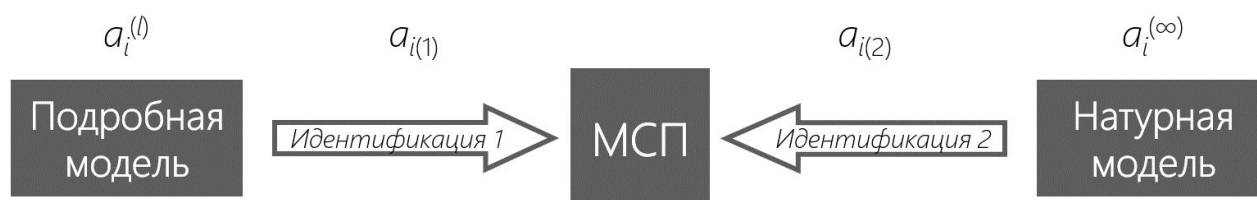
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации и сформулирована цель работы. Кратко охарактеризованы методы теоретического и экспериментального исследования, а также аргументирована научная ценность и значимость работы. Доказана достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы проведён анализ текущего состояния проектов по созданию энергоустановок на основе ВТСП для летательных аппаратов, который продемонстрировал активное развитие данной отрасли. Обоснована необходимость изучения теплофизических характеристик ВТСП-материалов и выполнен краткий обзор методов решения обратных задач для их определения. Предложено рассматривать ВТСП-обмотку как композиционный материал со сложной структурой, для которого может быть применима комплексная экспериментально-расчетная методология идентификации процессов теплообмена на основе методов решения ОЗТ для определения параметров теплового взаимодействия с криогенными жидкостями и эффективных теплофизических характеристик. Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе представлена постановка задачи идентификации математических моделей теплообмена для ВТСП-катушек, используемых в конструкциях статоров электрогенераторов. При построении виртуальной (имитационной) теплофизической модели необходимо учитывать зависимость теплопроводности и теплоёмкости от температуры, которая получается при идентификации этих свойств по экспериментально определённым функциям температуры элементов конструкции от времени.

Идентификация свойств подробной математической модели с плотной объёмной или поверхностной сеткой затруднена большим количеством узлов и связанных с ними уравнений, поэтому целесообразно использовать двухмодельный метод (рисунок 1), ставя в соответствие основной модели упрощённую, построенную для определённого участка подробной модели (тогда упрощённая модель может быть одномерной или в сосредоточенных параметрах (МСП), что вполне оправдано при соблюдении соответствующих условий проведения эксперимента).



$$a_i^{(l+1)} = a_i^{(l)} \cdot (a_{i(2)} / a_{i(1)})$$

Рисунок 1 – Схема применения двухмодельного метода

Система уравнений математической модели с сосредоточенными параметрами записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\frac{dT_0(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{\rho_0 c_0 \delta_0} [q_0 A_{s,0} + \sigma \varepsilon_0 (T_{R,0}(\tau)^4 - T_0(\tau)^4) + \\
&\quad + \alpha_0 (T_{f,0}(\tau) - T_0(\tau)) + \alpha_{0,1} (T_1(\tau) - T_0(\tau))], \\
\frac{dT_1(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{\rho_1 c_1 \delta_1} [\alpha_{1,0} (T_0(\tau) - T_1(\tau)) + \alpha_{1,2} (T_2(\tau) - T_1(\tau))], \\
&\quad \dots \\
\frac{dT_n(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{\rho_n c_n \delta_n} [\alpha_{n,n-1} (T_{n-1}(\tau) - T_n(\tau)) + \alpha_{n,n+1} (T_{n+1}(\tau) - T_n(\tau))], \\
&\quad \dots \\
\frac{dT_{N-1}(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{\rho_{N-1} c_{N-1} \delta_{N-1}} [\alpha_{N-1,N-2} (T_{N-2}(\tau) - T_{N-1}(\tau)) + \\
&\quad + \alpha_{N-1,N} (T_N(\tau) - T_{N-1}(\tau))], \\
\frac{dT_N(\tau)}{d\tau} &= \frac{1}{\rho_N c_N \delta_N} [q_N A_{s,N} + \sigma \varepsilon_N (T_{R,N}(\tau)^4 - T_N(\tau)^4) + \\
&\quad + \alpha_N (T_{f,N}(\tau) - T_N(\tau)) + \alpha_{N,N-1} (T_{N-1}(\tau) - T_N(\tau))], \\
T_i(0) &= T_{i0}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N;
\end{aligned} \tag{1}$$

где T_i – температура слоя, К;
 ρ_0 – плотность слоя, кг/м³;
 c_0 – удельная теплоёмкость слоя, Дж/(кг·К);
 q_0 и q_N – поглощённые слоями 0 и N тепловые потоки, Вт/м²;
 $A_{s,0}$ и $A_{s,N}$ – коэффициенты поглощения слоёв 0 и N ;
 ε_0 и ε_N – коэффициенты излучения слоёв 0 и N .

Промежуточную модель имеет смысл обезразмерить, так как в этом случае появляется теоретическая возможность использовать не полномасштабные натурные модели, а их уменьшенные макеты со свойствами, обеспечивающими те же самые значения безразмерных параметров. Используются следующие безразмерные величины:

– время

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}, \tag{2}$$

где τ_0 – масштаб времени;

– температура

$$\bar{T}_n = \frac{T_n}{T_{n0}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; \tag{3}$$

– теплоотдача

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\tau_0 \alpha_i}{\rho_i c_i \delta_i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; \quad (4)$$

– тепловая проводимость

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{i,i-1} &= \frac{\tau_0 \alpha_{i,i-1}}{\rho_i c_i \delta_i}, \\ \bar{\alpha}_{i,i+1} &= \frac{\tau_0 \alpha_{i,i+1}}{\rho_i c_i \delta_i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1; \end{aligned} \quad (5)$$

При отсутствии датчиков инфракрасного теплового потока для обеспечения единственности решения из первого и последнего уравнений системы (1) необходимо исключить слагаемые с поглощённым потоком тепла. Это возможно, так как эксперимент связан с захлаживанием конструкции криогенной жидкостью. Непосредственные расчёты, проведённые при криогенных температурах, показывают, что при наличии теплоотдачи на внешних границах системы излучательной способностью можно пренебречь.

Тогда система (1) запишется следующим образом с учётом безразмерных величин и исключения вышеуказанных слагаемых:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}_{0,j}}{d\bar{\tau}} &= \bar{\alpha}_{0,j}(\bar{T}_{f,0,j} - \bar{T}_{0,j}) + \bar{\alpha}_{0,1,j}(\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{0,j}), \\ \frac{d\bar{T}_{1,j}(\tau)}{d\bar{\tau}} &= \bar{\alpha}_{1,0,j}(\bar{T}_{0,j} - \bar{T}_{1,j}) + \bar{\alpha}_{1,2,j}(\bar{T}_{2,j} - \bar{T}_{1,j}), \\ &\dots \\ \frac{d\bar{T}_{n,j}}{d\bar{\tau}} &= \bar{\alpha}_{n,n-1,j}(\bar{T}_{n-1,j} - \bar{T}_{n,j}) + \bar{\alpha}_{n,n+1,j}(\bar{T}_{n+1,j} - \bar{T}_{n,j}), \\ &\dots \\ \frac{d\bar{T}_{N-1,j}}{d\bar{\tau}} &= \bar{\alpha}_{N-1,N-2,j}(\bar{T}_{N-2,j} - \bar{T}_{N-1,j}) + \bar{\alpha}_{N-1,N,j}(\bar{T}_{N,j} - \bar{T}_{N-1,j}), \\ \frac{d\bar{T}_{N,j}}{d\bar{\tau}} &= \bar{\alpha}_{N,j}(\bar{T}_{f,N,j} - \bar{T}_{N,j}) + \bar{\alpha}_{N,N-1,j}(\bar{T}_{N-1,j} - \bar{T}_{N,j}), \end{aligned} \quad (6)$$

с начальным условием

$$\bar{T}_{i,j}(0) = 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; \quad (7)$$

и условием непрерывности

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_i(\bar{\tau}_j - 0) = \bar{T}_i(\bar{\tau}_j + 0) \\ \bar{\tau}_0 = 0, \bar{\tau}_{M+1} = \bar{\tau}_{\max} \end{array} \right\} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, M). \quad (8)$$

Вектор неизвестных свойств модели (8):

$$p = (\bar{\alpha}_{0,1}, \bar{\alpha}_{1,2}, \dots, \bar{\alpha}_{N-2,N-1}, \bar{\alpha}_{N-1,N}, \bar{\alpha}_N). \quad (9)$$

Регуляризованное решение выражается суммой приближённого псевдорешения и его вариации на текущей итерации l (ускорения или замедления итерационного процесса можно добиться ведением безразмерного векторного шага спуска $-\beta$):

$$p^{(l+1)} = p^{(l)} - \beta \delta p^{(l)}, \quad l = 0, 1, 2 \dots \quad (10)$$

Вариации искоемых функций определяются из решения задачи в малых приращениях. В отсутствие предварительного сглаживания экспериментальной температуры в метрике пространства E именно производные являются причиной плохой обусловленности задачи идентификации. Поэтому целесообразно считать производные экспериментальной температуры на интервалах временной сетки равными нулю. Строго говоря, мы и измеряем температуру как функцию, кусочно-непрерывную на каждом временном интервале, получая лишь косвенную информацию о её производной. В результате, система уравнений для определения δp :

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{aligned}
 \delta \bar{\alpha}_{0,j} &= \frac{1}{\bar{T}_{f,0,j} - \bar{T}_{0,j}} [-\bar{\alpha}_{0,j}(\bar{T}_{f,0,j} - \bar{T}_{0,j}) - \\
 & -\bar{\alpha}_{0,1,j}(\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{0,j}) + (\bar{\alpha}_{0,j} + \bar{\alpha}_{0,1,j})(\bar{T}_{0,j}^{(01)} - \bar{T}_{0,j})], \\
 \delta \bar{\alpha}_{0,1,j} &= \frac{1}{\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{0,j}} [-\bar{\alpha}_{0,j}(\bar{T}_{f,0,j} - \bar{T}_{0,j}) - \\
 & -\bar{\alpha}_{0,1,j}(\bar{T}_{1,j} - \bar{T}_{0,j}) + (\bar{\alpha}_{0,j} + \bar{\alpha}_{0,1,j})(\bar{T}_{0,j}^{(02)} - \bar{T}_{0,j})]; \\
 & \dots \\
 \delta \bar{\alpha}_{n,n-1,j} &= \frac{1}{\bar{T}_{n-1,j} - \bar{T}_{n,j}} [-\bar{\alpha}_{n,n-1,j}(\bar{T}_{n-1,j} - \bar{T}_{n,j}) - \\
 & -\bar{\alpha}_{n,n+1,j}(\bar{T}_{n+1,j} - \bar{T}_{n,j}) + (\bar{\alpha}_{n,n-1,j} + \bar{\alpha}_{n,n+1,j})(\bar{T}_{n,j}^{(01)} - \bar{T}_{n,j})], \\
 \delta \bar{\alpha}_{n,n+1,j} &= \frac{1}{\bar{T}_{n+1,j} - \bar{T}_{n,j}} [-\bar{\alpha}_{n,n-1,j}(\bar{T}_{n-1,j} - \bar{T}_{n,j}) - \\
 & -\bar{\alpha}_{n,n+1,j}(\bar{T}_{n+1,j} - \bar{T}_{n,j}) + (\bar{\alpha}_{n,n-1,j} + \bar{\alpha}_{n,n+1,j})(\bar{T}_{n,j}^{(02)} - \bar{T}_{n,j})]; \\
 & \dots \\
 \delta \bar{\alpha}_{N,N-1,j} &= \frac{1}{\bar{T}_{N-1,j} - \bar{T}_{N,j}} [-\bar{\alpha}_{N,N-1,j}(\bar{T}_{N-1,j} - \bar{T}_{N,j}) - \\
 & -\bar{\alpha}_{N,j}(\bar{T}_{f,N,j} - \bar{T}_{N,j}) + (\bar{\alpha}_{N,N-1,j} + \bar{\alpha}_{N,j})(\bar{T}_{N,j}^{(01)} - \bar{T}_{N,j})]; \\
 \delta \bar{\alpha}_{N,j} &= \frac{1}{\bar{T}_{f,N,j} - \bar{T}_{N,j}} [-\bar{\alpha}_{N,N-1,j}(\bar{T}_{N-1,j} - \bar{T}_{N,j}) - \\
 & -\bar{\alpha}_{N,j}(\bar{T}_{f,N,j} - \bar{T}_{N,j}) + (\bar{\alpha}_{N,N-1,j} + \bar{\alpha}_{N,j})(\bar{T}_{N,j}^{(02)} - \bar{T}_{N,j})].
 \end{aligned} \right. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Функционал температурной невязки на итерации l запишется как

$$\bar{J} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M (\bar{T}_{i,j} - \bar{T}_{i,j}^{(0)})^2. \quad (12)$$

Подробная САЕ-модель (Computer-Aided Engineering) (рисунок 2) состоит из трёх элементов: обмотки 1, корпуса 2 из композитного материала, медной шины 3 для подведения электрического тока.

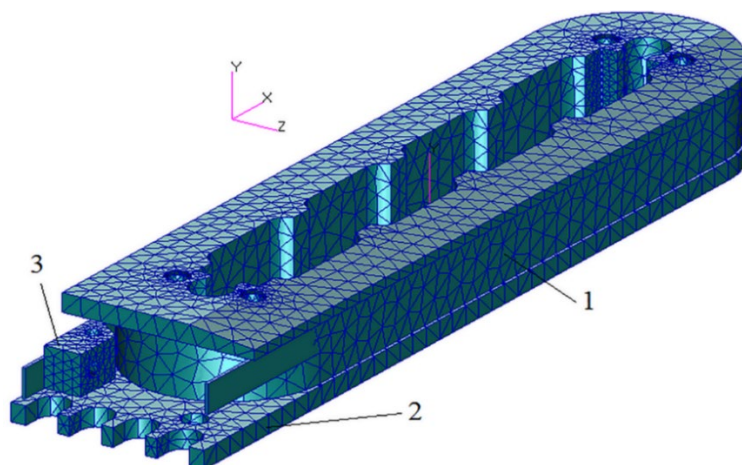


Рисунок 2 – Подробная модель с сосредоточенными параметрами: 1 – обмотка, 2 – корпус из композитного материала, 3 – медная шина

Проведено имитационное моделирование теплофизического эксперимента для идентификации свойств материала корпуса и обмотки. Первый режим – охлаждение наружных открытых поверхностей (торцевые – теплоизолированы), кипящим жидким азотом, второй – нагрев атмосферным воздухом при нормальных условиях. Полученные зависимости температуропроводностей, рассчитанных по компонентам вектора p , представлены на рисунках 3-4.

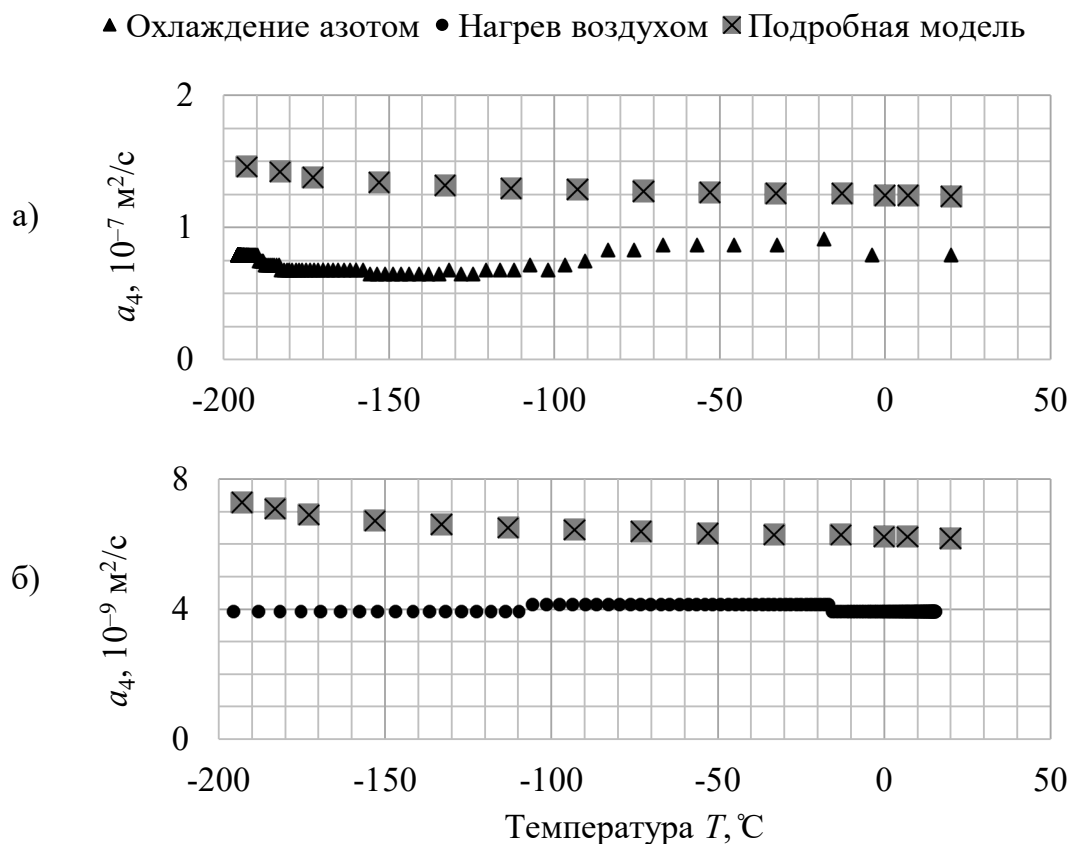


Рисунок 3 – Распределение температуропроводности узла 4 (теплоотдача внешней поверхности обмотки) идентифицированной упрощённой модели в зависимости от температуры: а) при охлаждении жидким азотом; б) при нагреве атмосферным воздухом

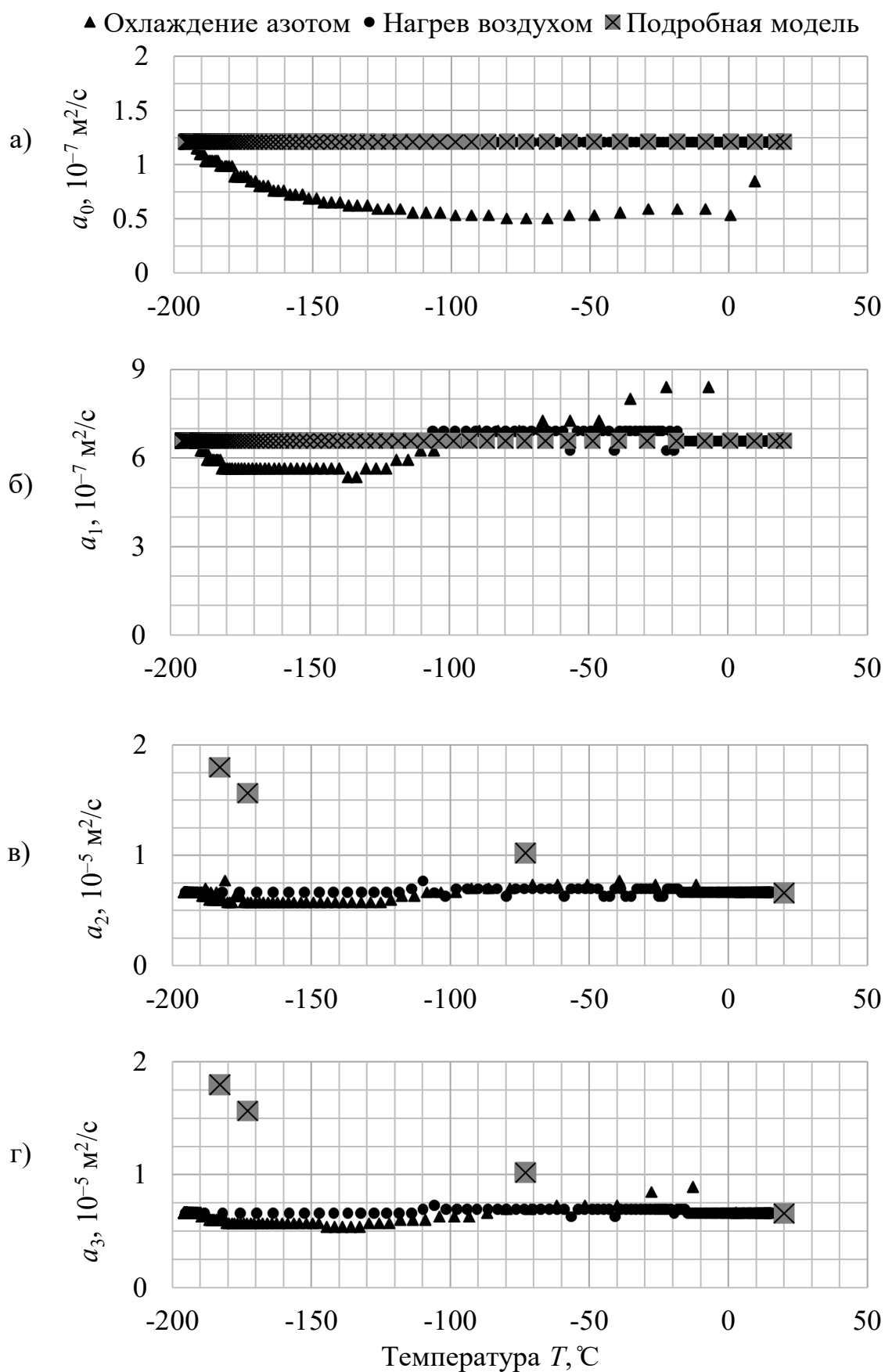


Рисунок 4 – Распределение температуропроводности узлов идентифицированной упрощённой модели в зависимости от температуры:
а) узел 0 (корпус); б) узел 1 (тепловая проводимость контакта между корпусом и ВТСП); в) узел 2 (ВТСП); г) узел 3 (ВТСП)

Упрощённая модель идентифицирована по результатам виртуального эксперимента, воспроизводящего реальные условия, и в этом случае адекватность алгоритмов идентификации проверяется сравнением идентифицированных свойств с заданными в модели, что позволяет проводить проектные расчёты эксперимента даже при неизвестных свойствах материалов.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования.

Объектом исследования в криогенных испытаниях являлась обмотка катушки, изготовленная в НИО-310 МАИ на основе ВТСП-ленты второго поколения и двухкомпонентного эпоксидного компаунда Loctite STYCAST 2850FT с отвердителем Loctite CAT 23LV компании Henkel Loctite.

На рисунке 5 представлены фотографии при различном оптическом увеличении продольного сечения фрагмента обмотки на основе ВТСП-ленты шириной 4 мм, полученные шлифованием ее боковой поверхности. На представленных изображениях наблюдается слоистая структура обмотки с чередованием слоев ВТСП-ленты и слоев компаунда.



а)



б)

Рисунок 5 – Продольное сечение обмотки из ВТСП-ленты шириной 4 мм полученное шлифованием боковой поверхности: а) увеличение 12,5х; б) увеличение 40х

Для определения теплофизических свойств были изготовлены два экспериментальных образца: образец № 1 для определения в направлении оси перпендикулярной плоскости ленты и образец № 2 – в направлении оси параллельной плоскости ленты и направленной поперек ее ширины. Схемы криогенных испытаний представлены на рисунках 6-7.

При проведении экспериментальных исследований образцов обмотки катушки из ВТСП-ленты использовалось экспериментальное, приборное и технологическое оборудование, входящее в состав автоматизированного экспериментального комплекса «ВТС-ОЗТ» Тепловой лаборатории НИО-601 МАИ. Для измерения теплового потока на обратной поверхности исследуемого образца использовался нестационарный специально разработанный в НИО-601 датчик теплового потока (ДТП), выполненный из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

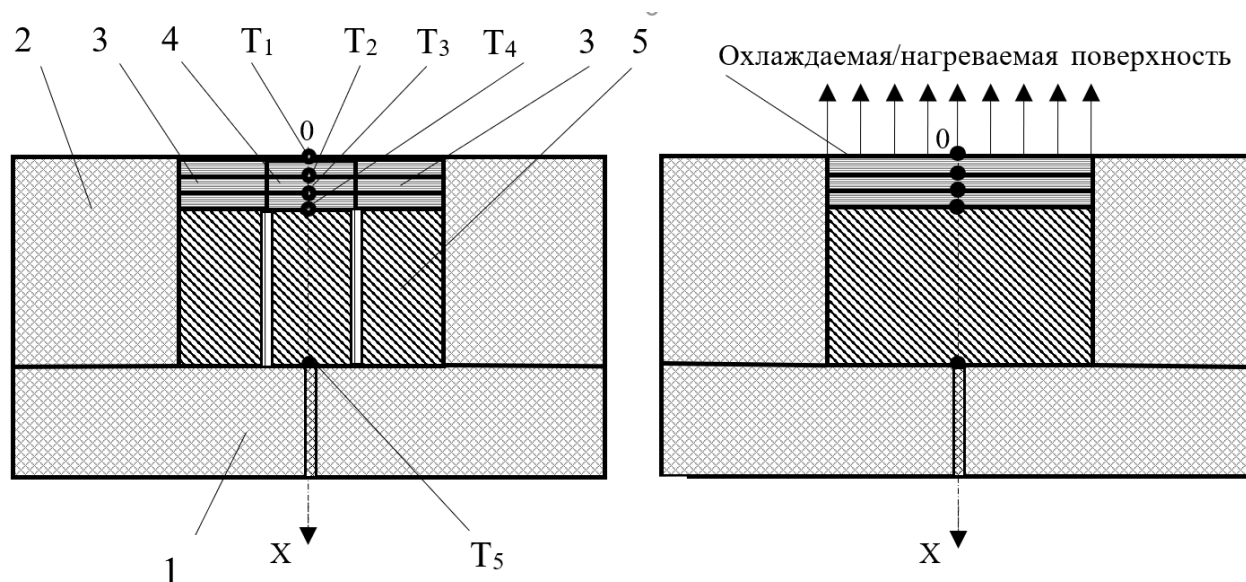


Рисунок 6 – Схема криогенных испытаний образца № 1: 1 – теплоизолирующая пластина, 2 – теплоизоляция, 3 – боковые секции образца, 4 – центральная секция образца, 5 – ДТП; термодатчики: T_1 – на охлаждаемой поверхности образца; T_2 , T_3 – внутренние термодатчики образца; T_4 – на обратной поверхности образца и на охлаждаемой поверхности ДТП; T_5 – на обратной поверхности ДТП

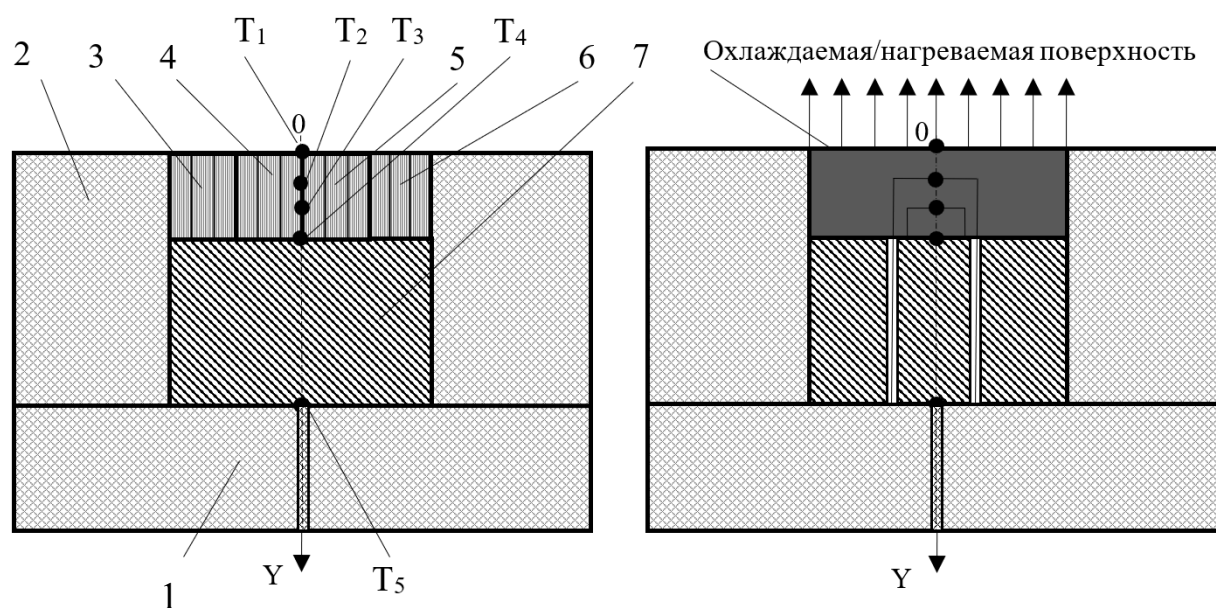


Рисунок 7 – Схема криогенных испытаний образца № 2: 1 – теплоизолирующая пластина, 2 – теплоизоляция, 3, 4, 5, 6 – блоки образца, 7 – ДТП; термодатчики: T_1 – на охлаждаемой поверхности образца; T_2 , T_3 – внутренние термодатчики образца; T_4 – на обратной поверхности образца; T_5 – на обратной поверхности ДТП

Для проведения криогенных испытаний образцов использовался специально изготовленный экспериментальный модуль «ЭМ-К». Экспериментальный модуль предназначен для реализации выбранной схемы

криогенных испытаний и используется для: размещения и фиксации исследуемого образца в заданном положении; обеспечения заданных тепловых режимов образца в процессе испытаний (реализации заданной физической модели процесса теплообмена), включая этапы быстрого охлаждения и последующего нагрева одной из поверхностей образца, и обеспечение требуемых тепловых условий на других границах образца; обеспечения температурных измерений в образце и в конструкции модуля в соответствии с выбранной схемой.

Фотографии, иллюстрирующие основные этапы подготовки модуля «ЭМ-К» к проведению эксперимента, представлены на рисунке 8.

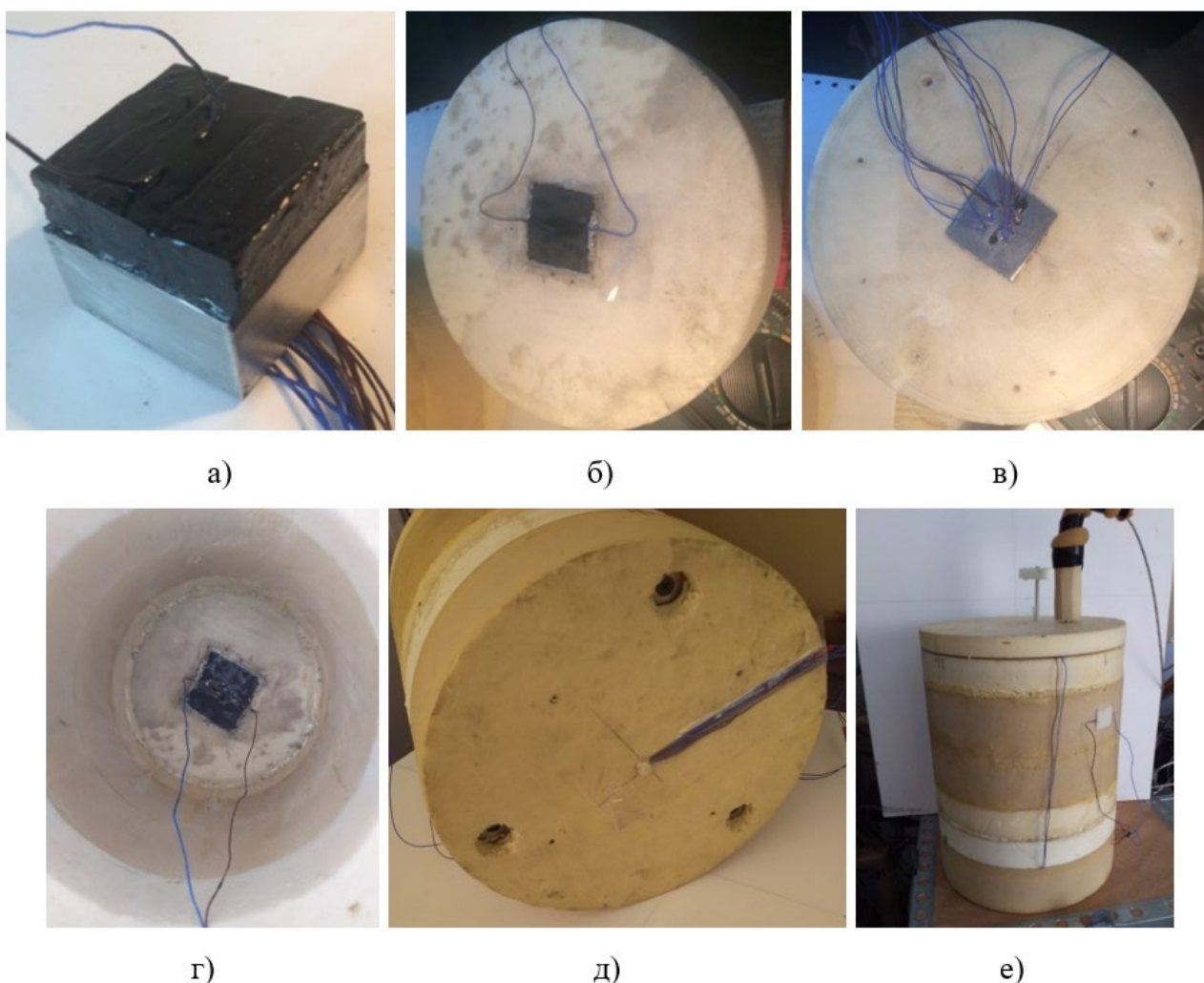


Рисунок 8 – Подготовка «ЭМ-К» к проведению эксперимента: а) измерительный узел с образцом; б) измерительный узел с образцом, установленный в днище (охлаждаемая поверхность); в) измерительный узел с образцом, установленный в днище (обратная поверхность) г) днище с измерительным узлом, установленным на обечайке (вид сверху); д) основание установлено на днище; е) модуль ЭМ-К, подготовленный к криогенным испытаниям образца

Методика подготовки и проведения криогенных испытаний, исследуемых образцов фрагмента обмотки катушки из ВТСП-ленты построена на основе общей методики тепловых испытаний на комплексе «ВТС-ОЗТ» при определении характеристик тепловых режимов экспериментальных образцов и теплофизических характеристик материалов. В начале испытания включается система измерения, и начинаются фиксироваться показания термопар, а затем приблизительно через 30 секунд (технологический участок, необходимый для выхода системы измерения на заданный режим) начинается заливка жидкого азота в рабочий объем экспериментального модуля. В процессе заливки происходит неуправляемое охлаждение образца через его охлаждаемую поверхность. Продолжительность участка охлаждения определяется по показаниям термопары T_4 , установленной на обратной стороне поверхности образца – окончанием участка охлаждения является момент времени τ в который достигается значение температуры $T_4(\tau) = -195,7^\circ\text{C}$. В момент окончания охлаждения жидкий азот быстро удаляется (выливается) из рабочего объема ЭМ-К и начинается более длительный участок нагрева образца на воздухе в естественных условиях. В испытаниях помимо целевых температурных измерений в соответствии с рассмотренной схемой измерений проводились дополнительные технологические измерения температур. В частности, температуры T_6 на внешней боковой поверхности теплоизолирующей обечайки экспериментального модуля ЭМ-К и температуры T_7 жидкого азота в рабочем объеме модуля «ЭМ-К».

Таким образом, программа испытаний включает в себя следующие основные операции:

- 1) включение системы измерений комплекса «ВТС-ОЗТ» и проведение тестирования измерительных линий и работы термопар;
- 2) включение записи показаний термопар;
- 3) открытие крышки модуля и заливка жидкого азота в рабочий внутренний объем экспериментального модуля «ЭМ-К»;
- 4) закрытие крышки модуля и введение термопары T_7 в жидкий азот;
- 5) запись показаний термопар на участке охлаждения;
- 6) открытие крышки модуля и извлечение термопары T_7 из жидкого азота;
- 7) слив жидкого азота из рабочего объема модуля;
- 8) нагрев поверхности образца в условиях естественной конвекции при комнатной температуре окружающей среды («ЭМ-К» в горизонтальном положении);
- 9) запись показаний термопар на участке нагрева;
- 10) выключение записи показаний термопар.

В рамках экспериментальных исследований фрагмента обмотки катушки на основе ВТСП-ленты было проведено пять испытаний: два испытания (№ 1 и № 2) для экспериментального образца № 1 и три испытания (№ 3, № 4 и № 5) для экспериментального образца № 2. Результаты температурных измерений представлены на рисунках 9-13 (показания термопар: T_1 – на охлаждаемой поверхности образца; T_2 , T_3 – внутри образца; T_4 – на обратной поверхности образца; T_5 – на обратной поверхности ДТП, T_6 – на внешней боковой

поверхности экспериментального модуля; T7 – внутри рабочего объёма экспериментального модуля).

Полученные в криогенных испытаниях результаты подтвердили существенные различия в характеристиках тепловых режимов исследуемых образцов № 1 и № 2, что свидетельствует о значительных различиях в теплофизических характеристиках образцов.

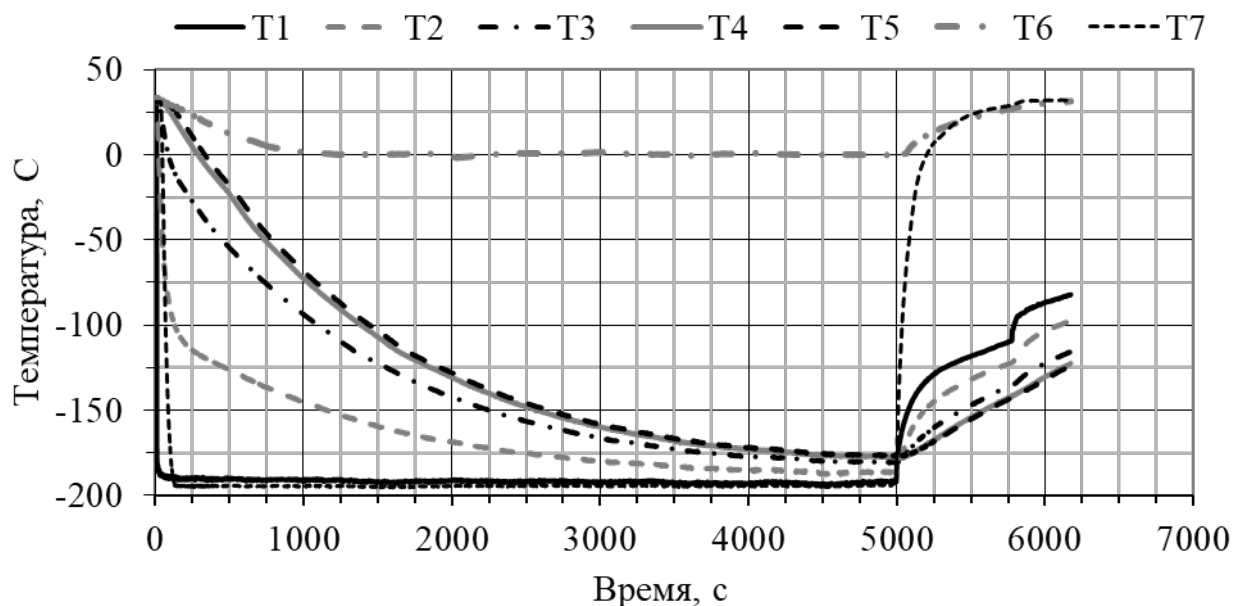


Рисунок 9 – Результаты испытания № 1 (образец № 1)

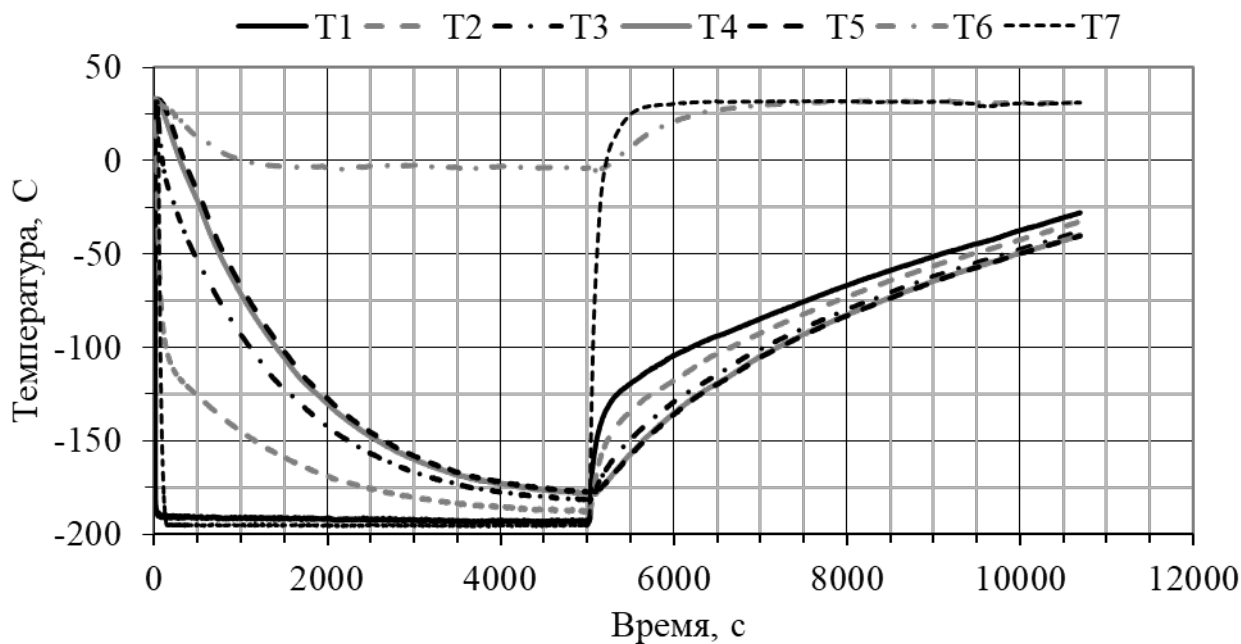


Рисунок 10 – Результаты испытания № 2 (образец № 1)

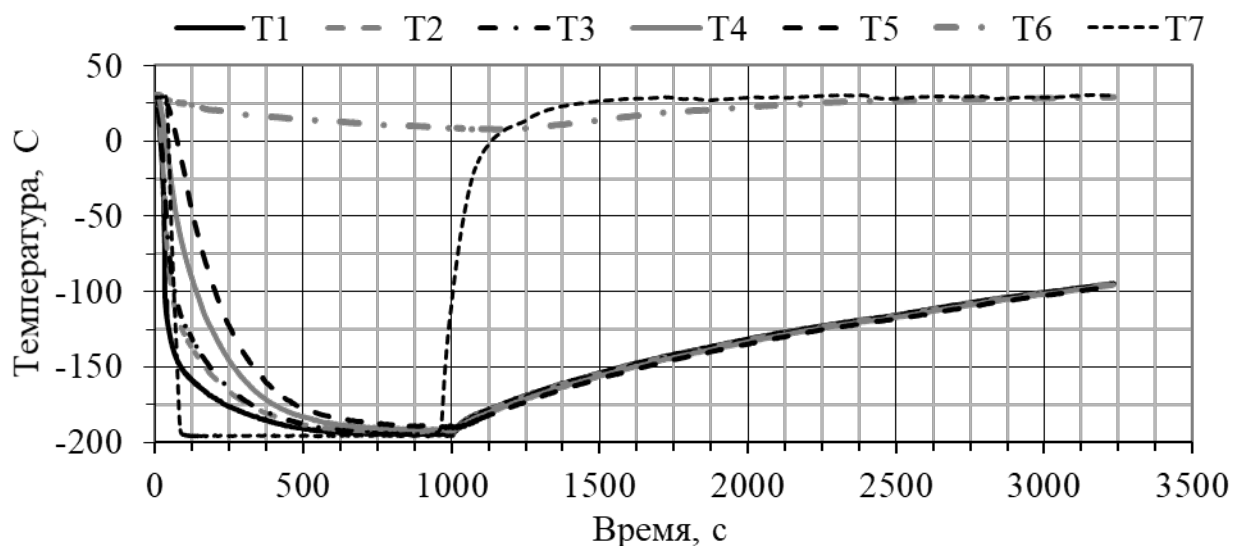


Рисунок 11 – Результаты испытания № 3 (образец № 2)

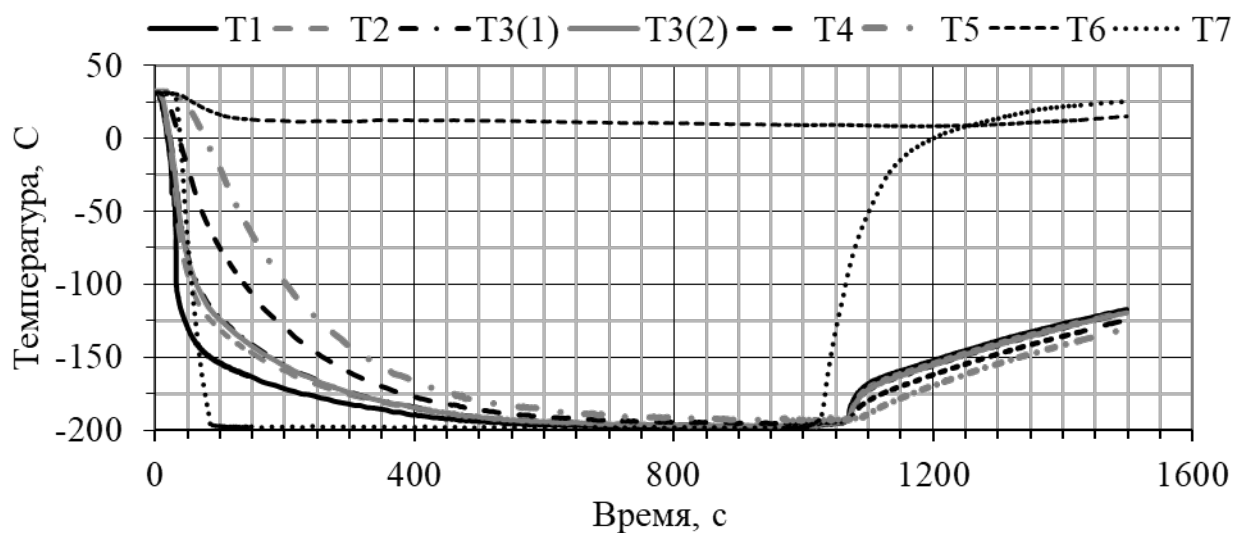


Рисунок 12 – Результаты испытания № 4 (образец № 2)

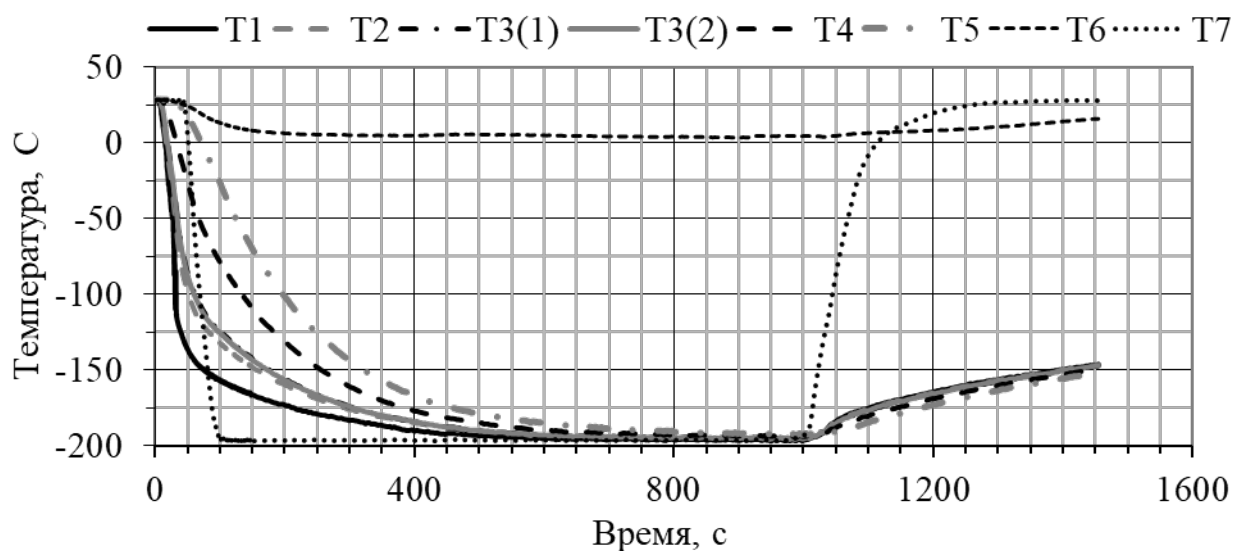


Рисунок 13 – Результаты испытания № 5 (образец № 2)

В четвёртой главе представлены результаты обработки полученной экспериментальной информации в соответствии с предложенной методикой. Были получены теплофизические свойства ВТСП-материала в зависимости от температуры. Наличие в эксперименте ДТП с достоверно известными свойствами в диапазоне изменения экспериментальных температур позволяет перейти от температуропроводности к определению отдельных характеристик – коэффициента теплопроводности и объёмной теплоёмкости. Графики зависимости этих характеристик от температуры в поперечном и продольном направлении представлены на рисунках 14-15 и 16-17 соответственно.

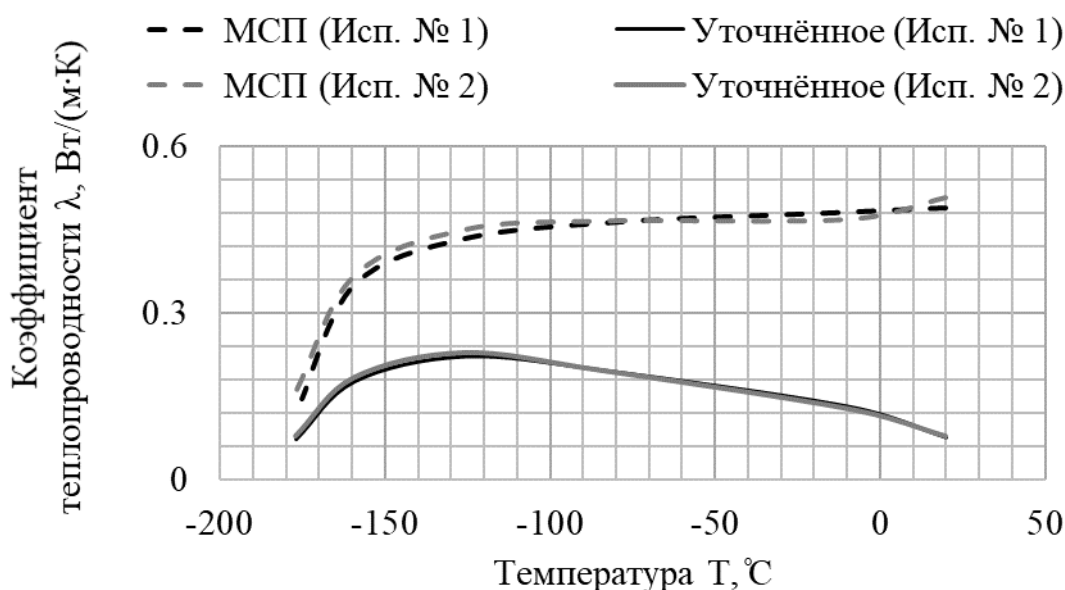


Рисунок 14 – Распределение коэффициента теплопроводности в поперечном направлении ВТСП-ленты (экспериментальный образец № 1)

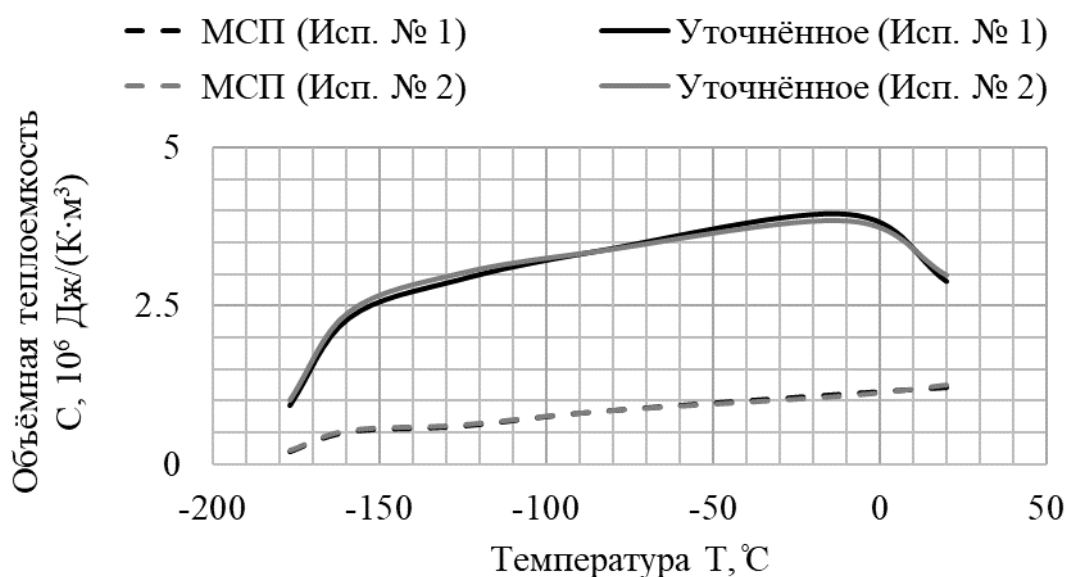


Рисунок 15 – Распределение объёмной теплоёмкости в поперечном направлении ВТСП-ленты (экспериментальный образец № 1)

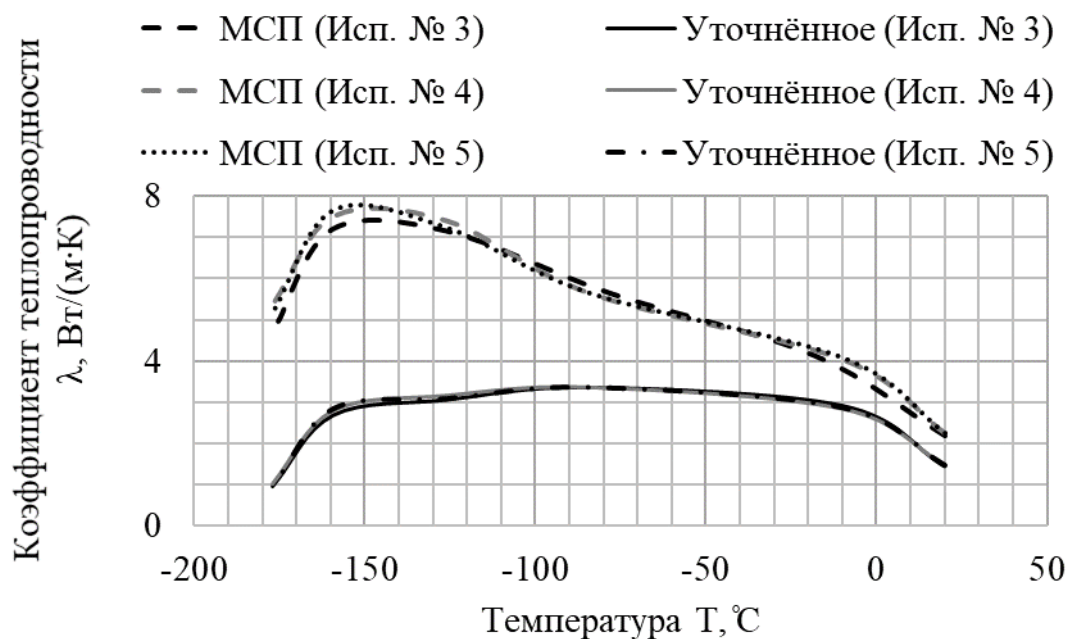


Рисунок 16 – Распределение коэффициента теплопроводности в продольном направлении ВТСП-ленты (экспериментальный образец № 2)

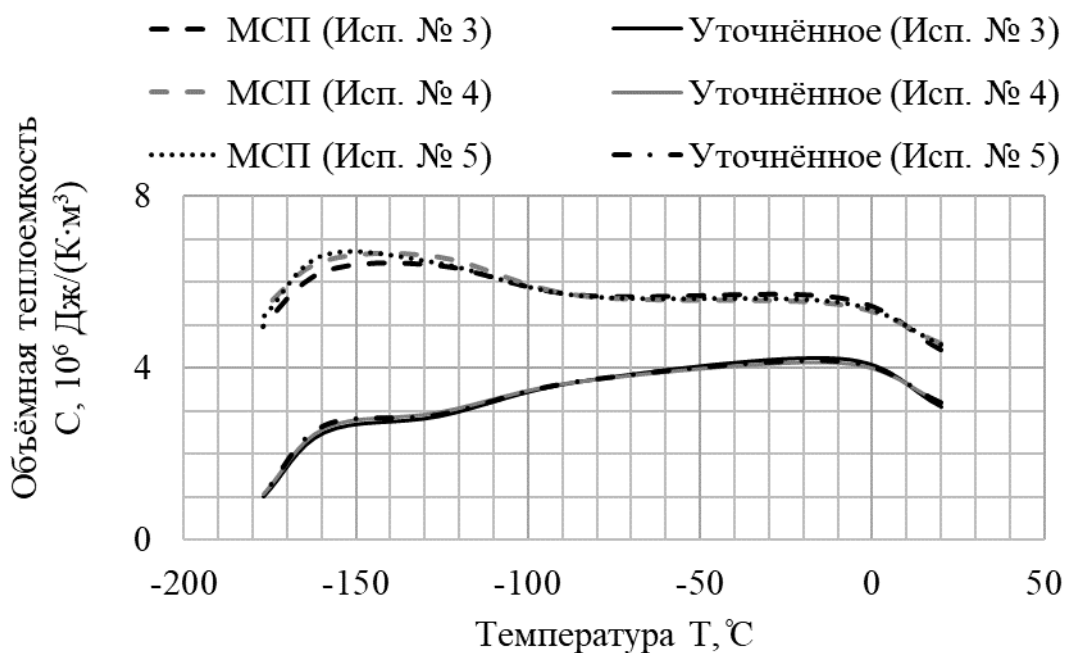


Рисунок 17 – Распределение объёмной теплоёмкости в продольном направлении ВТСП-ленты (экспериментальный образец № 2)

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что разные значения коэффициента теплопроводности для экспериментальных образцов № 1 и № 2 подтверждают сильную тепловую анизотропию ВТСП-ленты, вытекающую из её сложной композиционной структуры. Для поперечного направления характерны более низкие значения теплопроводности по сравнению с

продольным, что объясняется многослойной структурой ленты и высоким термическим сопротивлением между слоями. Вычисленные значения объёмной теплоёмкости, как и следовало ожидать, совпадают для обоих образцов в пределах допустимых погрешностей. Наблюдается рост удельной теплоёмкости с температурой, что типично для большинства материалов в криогенной области.

Адекватность полученных результатов оценивается путём сопоставления экспериментальных температурных полей во времени с полями, полученными по уточнённой имитационной модели. В таблице 1 приведены оценочные значения среднеквадратичного и максимального расхождения полученных температур от измеренных в экспериментах

Таблица 1 – Оценки среднеквадратичного и максимального расхождения экспериментальных и расчетных значений температур

Испытание	Среднеквадратичное расхождение температур, °C	Максимальное расхождение температур, °C
Испытание № 1, охлаждение (образец № 1)	1,43	5,44
Испытание № 1, нагрев (образец № 1)	1,21	4,75
Испытание № 2, охлаждение (образец № 1)	1,33	5,03
Испытание № 2, нагрев (образец № 1)	1,09	4,12
Испытание № 3, охлаждение (образец № 2)	1,64	5,38
Испытание № 3, нагрев (образец № 2)	1,06	3,42
Испытание № 4, охлаждение (образец № 2)	1,52	4,98
Испытание № 4, нагрев (образец № 2)	1,76	5,69
Испытание № 5, охлаждение (образец № 2)	1,42	4,47
Испытание № 5, нагрев (образец № 2)	1,92	5,81

Таким образом, разработанная математическая модель адекватна реальному процессу, что подтверждается малыми расхождениями между расчетными и экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Проведённый анализ текущего состояния проблемы показал активное развитие сверхпроводниковых энергоустановок и актуальность разработки комплексной методики на основе эффективных методов решения ОЗТ для определения теплофизических характеристик ВТСП-обмоток в криогенных средах.

2. Построены подробная и упрощённая промежуточная модели для катушки статора ВТСП-генератора для использования в опытной силовой криогенной энергосистеме. Разработаны алгоритмы идентификации математических моделей теплопереноса с различным числом пространственных измерений, выполнена верификация с помощью имитационного моделирования.

3. Проведены экспериментальные исследования двух образцов обмотки из ВТСП-материала, подтвердившие различия тепловых режимов в направлении оси перпендикулярной плоскости ленты и в направлении оси параллельной плоскости ленты и направленной поперек ее ширины.

4. В результате обработки экспериментальных данных получены значения коэффициента теплопроводности и объёмной теплоёмкости в зависимости от температуры для ВТСП-обмотки в поперечном и продольном направлении. Подтверждена значительная анизотропия теплофизических свойств.

В качестве **перспектив дальнейшей разработки** темы научных исследований по данной тематике может рассматриваться:

– применение разработанной методики для установления количественной взаимосвязи между электропроводностью и теплопроводностью ВТСП-материалов в широком температурном диапазоне;

– использование полученных теплофизических характеристик для комплексного электротеплового моделирования всей энергетической установки с целью оптимизации ее рабочих режимов и систем криостабилизации;

– изучении влияния технологических параметров производства ВТСП-лент (таких как тип и толщина стабилизирующих слоев) на их эффективные теплофизические свойства с использованием разработанной методики.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и публикации, приравненные к ним:

1. Алифанов О.М., Будник С.А., Викулов А.Г., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Моржухина А.В., Ильин В.В. Идентификация математических моделей теплопереноса ВТСП катушек. 1. Технические средства и методика проведения эксперимента // ИФЖ. 2023. Т. 96, № 5. С. 1381-1391.

Имеется перевод: Alifanov O.M., Budnik S.A., Vikulov A.G., Nenarokomov A.V., Titov D.M., Morzhukhina A.V., Il'in V.V. Identification of mathematical models of heat transfer of HTSC coils. 1. Technical tools and

experimental technique // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. V. 96. № 5. Pp. 1370-1381. DOI: 10.1007/s10891-023-02803-z.

2. Алифанов О.М., Будник С.А., Викулов А.Г., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Моржухина А.В., Ильин В.В. Идентификация математических моделей теплопереноса ВТСП катушек. 2. Алгоритм решения ОЗТ и результаты обработки экспериментальных данных // ИФЖ. 2023. Т. 96, № 6. С. 1405-1418.

Имеется перевод: Alifanov O.M., Budnik S.A., Vikulov A.G., Nenarokomov A.V., Titov D.M., Morzhukhina A.V., Il'in V.V. Identification of mathematical models of heat transfer of HTSC coils. 2. Algorithm for solving IHP and the results of experimental data processing // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2023. V. 96. № 6. Pp. 1393-1406. DOI: 10.1007/s10891-023-02807-9.

3. Ильин В. В., Моржухина А.В. Анализ текущего состояния проблемы исследования теплофизических свойств сверхпроводниковых материалов в составе электрических машин // Инженерная физика. 2025. № 5. С. 11-20.

Другие публикации:

4. Алифанов О.М., Викулов А.Г., Ненарокомов А.В., Моржухина А.В., Ильин В.В. Идентификация теплофизических свойств высокотемпературного керамического материала // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева, 24-28 мая 2021 года, Екатеринбург. – М.: Издательский дом МЭИ. 2021. С. 208-209.

5. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Vikulov A.G., Morzhukhina A.V., Budnik S.A., Ilyin V.V. Modeling and identification of mathematical model of high-temperature superconducting coil // Proceedings of CHT-21 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer. 2021. Pp. 293-304.

6. Алифанов О.М., Викулов А.Г., Ненарокомов А.В., Моржухина А.В., Ильин В.В., Будник С.А. Идентификация теплофизических свойств многослойных обмоток сверхпроводящих катушек // Сборник тезисов докладов всероссийской конференции «XXXVII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 14-16 сентября 2021 года. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН. С. 255.

7. Ильин В.В. Перспективы использования высокотемпературных сверхпроводниковых генераторов в составе энергоустановки космического аппарата. // Гагаринские чтения – 2023: Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции, Москва, 11-14 апреля 2023 года. – М: Изд-во «Перо». 2023. С. 366-367.

8. Ильин В.В., Моржухина А.В., Викулов А.Г., Двухмодельный метод решения обратных задач теплообмена для идентификации модели катушки из высокотемпературного сверхпроводника // Авиация и космонавтика: Тезисы 22-ой Международной конференции, Москва, 20-24 ноября 2023 года. – М: Изд-во «Перо». 2023. С. 211.

9. Ильин В.В., Моржухина А.В., Викулов А.Г. Идентификация теплофизических свойств сверхпроводниковой катушки статора генератора для силовой криогенной энергосистемы космических аппаратов // XLVIII Академические чтения по космонавтике: Сборник тезисов, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, Москва, 23-26 января 2024 года. – М.: Изд-во МГТУ. 2024. С. 378-380.

10. Будник С.А., Викулов А.Г., Ильин В.В., Моржухина А.В. Расчётно-экспериментальное определение теплофизических характеристик катушек из высокотемпературного сверхпроводящего материала // Материалы XVII Минского международного форума по тепло- и массообмену, 20-24 мая 2024 года. – Минск: Изд-во Института тепло- и массообмена НАН Беларуси. 2024. С.569-570.

11. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Vikulov A.G., Morzhukhina A.V., Budnik S.A., Ilyin V.V., Titov D.M. Identification of heat transfer mathematical model of high-temperature superconducting coil // Conference Proceedings: 11th International Conference on Inverse Problems in Engineering, Búzios, Rio de Janeiro, June 23-28, 2024. – Brazil: ABCM. 2024. 11 p.

12. Будник С.А., Викулов А.Г., Моржухина А.В., Ильин В.В. Методика определения теплофизических свойств катушки из высокотемпературного сверхпроводника, входящей в состав статора генератора для энергетической установки // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы IV международной конференции, Москва, 21-25 октября 2024 года. – М.: Изд-во МЭИ. 2024. С. 323-324.