Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 538.953
DOI 10.17816/transsyst20239472-85

© И.К. Михайлова, И.В. Мартиросян, И.А. Руднев, С.В. Покровский
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Россия)

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО CORC-КАБЕЛЯ

Цель: разработка расчетной модели, расчет и анализ тепловых потерь сверхпроводящего CORC-кабеля на основе стандартных ВТСП-лент и облученных ВТСП-лент в режимах циклической нагрузки, характерных для индукционного накопителя энергии.

***Материалы и методы*:** в качестве образца рассматривается CORC-кабель на основе промышленных оригинальных ВТСП лент и ВТСП с дефектами от радиационного облучения, для описания электромагнитных и тепловых характеристик системы применяются методы макроэлектродинамики, основы прикладной сверхпроводимости, метод конечных элементов, расчет реализован в программе мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

***Результаты*:** разработана модель, определен оптимальный режим охлаждения в 5 циклах нагрузки, показано, что наличие искусственных центров пиннинга позволяет существенно улучшить тепловую стабилизацию системы и при рассмотренных схемах охлаждения приводит к снижению тепловых потерь.

Заключение: результаты могут быть использованы при разработке индукционного накопителя энергии на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов (ВТСП).

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, моделирование, H-формализм, CORC-кабель, сверхпроводящий кабель; ВТСП-ленты; пиннинг, индукционный накопитель.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

© I.K. Mikhailova, I.V. Martirosyan, I.A. Rudnev, S.V. Pokrovskii
National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow, Russia)

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RADIATION DEFECTS ON THE TRANSPORT CHARACTERISTICS OF A SUPERCONDUCTING CORC-CABLE

Received: 23.11.2023 **Revised: 31.11.2023** **Accepted: 25.12.2023**
Поступил: 23.11.2023 **Одобрена: 31.11.2023** **Принята: 25.12.2023**

Aim: development of a simultaneous model, calculation and analysis of heat losses of a superconducting CORC cable based on standard HTSC tapes and irradiated HTSC tapes in cyclic load modes for magnetic energy storage system.

Methods: the CORC cable based on industrial original HTSC tapes and HTS tape with defects from irradiation is considered; to describe the electromagnetic and thermal characteristics of the system are used following methods: the concepts of the macroelectrodynamics, the fundamentals of the applied superconductivity, the finite element method are used; the calculation is implemented in the COMSOL Multiphysics.

***Results*:** a model was developed, the optimal cooling mode was determined in 5 load cycles, it was shown that the presence of artificial pinning centers can significantly improve the thermal stabilization of the system and leads to a reduction in heat losses with the considered cooling schemes.

***Conclusion*:** the results can be used in the development of the magnetic energy storage system based on high-temperature superconducting composites (HTS).

Key words: high-temperature superconductor, simulation, H-formulation, CORC-cable, superconducting cable; HTS tapes; pinning, magnetic energy storage.

ВВЕДЕНИЕ

Открытия и исследования в области прикладной сверхпроводимости предлагают новые технологические решения в транспорте и энергетике. Применение сверхпроводников в транспортных и энергетических системах позволяют повышать мощность существующих устройств и снижают негативный экологический эффект. Примерами этих систем являются высоковольтные ЛЭП, магнито-левитационный транспорт, накопители энергии, высокопольные магниты, токамаки на основе сверхпроводников. Сверхпроводящие индукционные накопители энергии активно применяются в ресурсоемких установках и могут улучшить стабильность электроэнергетических систем. Такой накопитель обладает рядом преимуществ перед традиционными накопителями: возможность быстрого импульсного вывода энергии, высокая длительность жизненного цикла, высокие мощность и КПД [1–2]. Для создания катушки индуктивности в сверхпроводящем накопителе активно применяют кабели на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент, инженерная плотность тока которых достигает 10^{12} А/мм. Наиболее перспективными конструкциями ВТСП кабелей для применения в индукционных накопителях энергии являются CORC-кабель (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) и геликоидальный кабель [3–4]. Использование CORC-кабеля в накопителе обусловлено высокими рабочими токами, способностью выдерживать длительные циклические нагрузки, механической гибкостью и удобством реализации охлаждения через формер кабеля [5].

Для прогнозирования рабочих режимов работы накопителя и расчета характеристик всей системы необходимо выполнение анализа параметров

Received: 23.11.2023 **Revised: 31.11.2023** **Accepted: 25.12.2023**
Поступил: 23.11.2023 **Одобрена: 31.11.2023** **Принята: 25.12.2023**

ВТСП-кабеля: численный анализ потерь в различных режимах охлаждения и нагрузки, параметры разрушения сверхпроводящего состояния в критических режимах работы. Это необходимо для корректной проектировки и эксплуатации установки в целом, создания подходящих условий криогенного охлаждения. Поэтому при разработке индукционного накопителя моделирование работы ВТСП кабеля является важным этапом предварительного анализа.

Поскольку одним из основных требований к индукционным накопителям выступает высокая стабильность системы, то необходимо рассматривать способы повышения критических характеристик сверхпроводника. Одним из популярных направлений для ВТСП-лент, а, соответственно, и сверхпроводящих кабелей, является создание дополнительных искусственных центров пиннинга путем радиационного облучения [6].

В настоящей работе представлены результаты моделирования CORC-кабеля в условиях, соответствующих условиям работы индукционного накопителя. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для эксплуатации CORC-кабеля на основе ВТСП лент II поколения с искусственными центрами пиннинга, рассмотрены различные режимы охлаждения, рассчитана рассеянная мощность в кабеле в диапазоне нагрузочных токов свыше 1кА.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рис. 1. Архитектура ВТСП ленты

В рамках работы рассматривается CORC-кабель на основе промышленной композитной ВТСП-ленты компании ЗАО «СуперОкс». Архитектура ВТСП композита содержит слои подложки из сплава Хастеллой С276, ВТСП, серебра, меди и припоя в рамках модели (Рис. 1).

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

Поскольку слой подложки занимает более 60–70 % объема всей ленты, тепловые свойства подложки вносят основной вклад в тепловые характеристики ВТСП-ленты [7]. При проведении расчетов теплопроводность и теплоемкость всей ленты учитывались как теплопроводность и теплоемкость Хастеллоя С276. Плотности слоев ленты модели введены в виде констант d_{HTS}=6380 кг/м^3, $d_{Hastelloy}$=8890 кг/м^3, d_{Cu}=8900 кг/м^3, d_{Ag}=10500 кг/м^3, d_{solder}=8500 кг/м^3. Теплопроводность припоя ПОС-61 (61 % олова, 39 % свинца) равна 50 Вт/(м*К), теплоемкость припоя 250 Дж/(кг*К), теплоемкость подложки 19,5 Вт/(м*К).

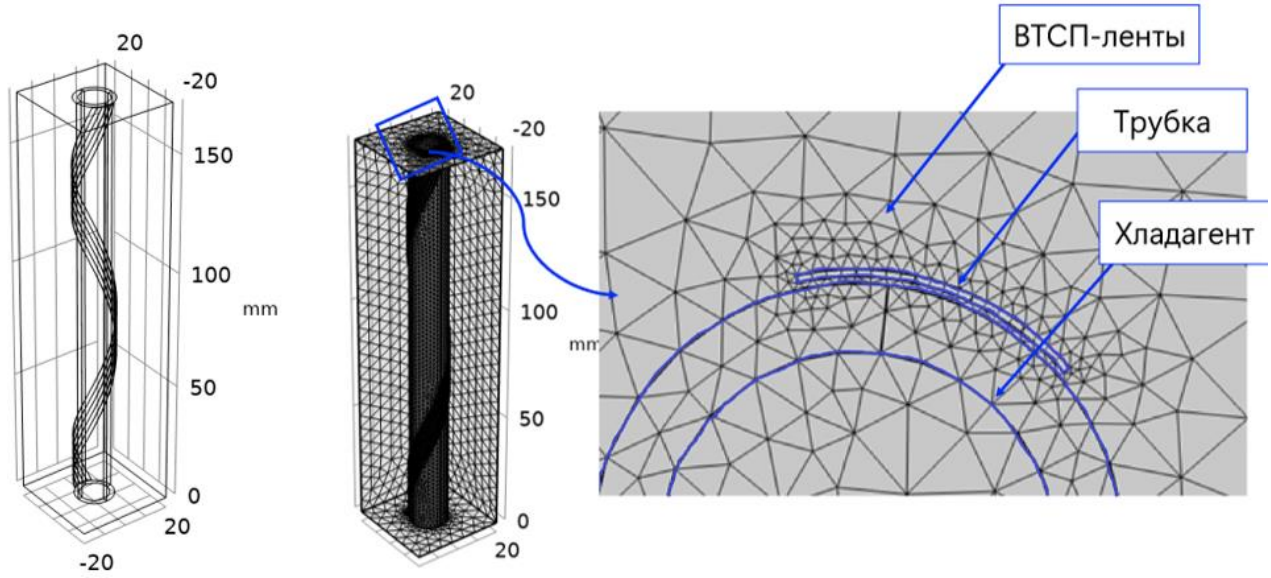

Рис. 2. Исследуемый образец:
слева – геометрия CORC-кабеля; справа – конечно-элементная сетка кабеля с использованием многомасштабного структурирования

Общий внешний вид геометрии CORC-кабеля представлен на Рис. 2. На мельхиоровую трубку внешним радиусом 8 мм и внутренним радиусом 6 мм (зона протекания хладагента) намотана ВТСП-лента сверхпроводящим слоем в сторону канала протекания хладагента. Угол намотки лент составляет 20 градусов, ленты уложены в 5 рядов по 2 слоя. Поскольку моделирование описанной системы выполняется методом конечных элементов (МКЭ), для удобства на Рис. 2 также представлена расчетная конечно-элементная сетка. Для корректного решения задачи используется многомасштабное структурирование сетки модели, при котором изменение размера конечно-элементной сетки контролируется пользователем и определяется геометрией расчетной области. Подробное описание расчетной модели приведено далее.

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД

Одним из наиболее точных методов численного МКЭ моделирования сверхпроводящих систем является H-формализм (в качестве зависимых переменных в задаче выступают компоненты напряженности магнитного поля **H**) [8]. Для решения задачи используется общая форма дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) среды инженерного моделирования COMSOL Multiphysics, которая задается как:

$$e_a \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \times \Gamma = F \quad (1)$$

где во всем пространстве в качестве зависимой переменной ***u*** при моделировании выбирается напряженность магнитного поля ***H(x,y,z)*** (H-формализм).

Параметры уравнения (1) подбираются таким образом, что уравнение (1) преобразуется в уравнение Фарадея:

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E + \frac{d(\mu_0 \mu_r H)}{dt} = 0 \quad (2)$$

где ***E*** – электрическое поле, ***B*** – индукция магнитного поля, ***H*** – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, μ_r – относительная магнитная проницаемость среды, которая принимается равной 1. Распределение токов J в сверхпроводнике определяется условиями внешней нагрузки и вычисляется при решении уравнений PDE.

Свойства сверхпроводника описываются с использованием нелинейной зависимости сопротивления от тока для вольтамперной характеристики:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c}\left(\frac{|J|}{J_c}\right)^{n-1} \quad (3)$$

где E_c – критическое электрическое поле, равное 1 мкВ/см, J_c – критический ток, компоненты тока J вычисляются на основе закона Ампера (*2*), n – показатель степени, который мы подробнее рассмотрим при обсуждении учета радиационного пиннинга. Начальное условие:

$$H|_{t=0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Магнитное поле вычисляется как суперпозиция внешних и внутренних вкладов. Внутренний вклад $\mathbf{H_s}=[H_{sx},H_{sy}, H_{sz}]$ вычисляется на основе закона Ампера. Тогда как внешний вклад можно записать как $\mathbf{H_e}=[H_{ex},H_{ey}, H_{ez}]$. Граничные условия принимают вид:

$$H|_{\partial\Omega} = \begin{bmatrix} H_{sx} + H_{ex} \\ H_{sy} + H_{ey} \\ H_{sz} + H_{ez} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Received: 23.11.2023 **Revised: 31.11.2023** **Accepted: 25.12.2023**
Поступил: 23.11.2023 **Одобрена: 31.11.2023** **Принята: 25.12.2023**

В основе описания физики тепловых процессов заложено выражение:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \times (-k \nabla T) = Q + \rho C_p w \nabla T \quad (5)$$

где C_p – теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность, k – коэффициент теплопроводности, w – поле скорости температур, Q – все источники тепла, включая термоэлектрические.

Тепловыделения в системе рассчитывается по формуле:

$$Q = E \times J \quad (6)$$

При расчете используется двухсторонняя связка электродинамических и тепловых процессов, учитывается зависимость критического тока от температуры.

Приложение токовой нагрузки реализуется на протяжении 5 циклов в течение 20 секунд в виде функции следующего вида (Рис. 3).

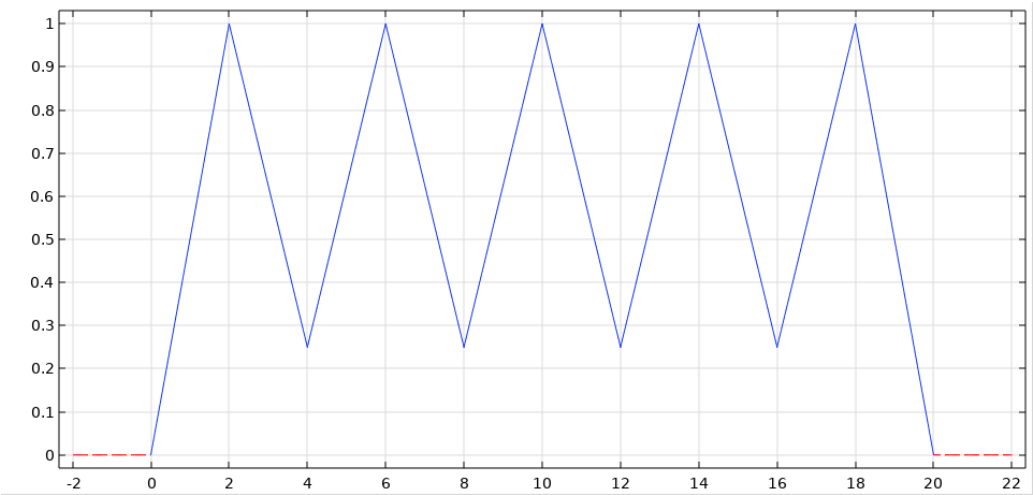

Рис 3. Временная зависимость для прикладываемой нагрузки в течение 5 циклов, общий вид приложенной функции в относительных единицах

Ранее [9, 10] было показано, что изменение параметров пиннинга, в том числе при радиационном облучении, можно представить в виде учета зависимости показателя степени вольт-амперной характеристики (n-value) в уравнении (3) как:

$$n \sim \frac{U_0}{kT} \quad (7)$$

U_0 – энергия пиннинга сверхпроводника при плотности тока J=0 [A], k – константа Больцмана, T – температура в модели (77,4 [K]).

На основе описанных подходов выполняется моделирование ВТСП CORC-кабеля при приложении токовой нагрузки с варьируемой максимальной амплитудой тока от 1 кА до 1,2 кА. Для реализации циклической нагрузки максимальная амплитуда тока умножается на функцию, представленную на Рис. 3. В качестве хладагента, протекающего

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

по мельхиоровой трубке, в рамках представленной работы рассматриваются жидкий азот и жидкий неон. Рассматриваются ВТСП кабели на основе оригинальных (необлученных) и облученных ВТСП лент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет для 5 циклов нагрузки проводился в двух температурных режимах: при охлаждении жидким азотом и жидким неоном. Первоначально был проведен расчет нагрева и потерь рассеянной мощности CORC кабеля при охлаждении жидким азотом в условиях отсутствия радиационного пиннинга лент при амплитуде тока 1 кА. В начальный момент времени кабель охлажден до температуры жидкого азота, а после начала пропускания тока осуществляется прокачка жидкого азота внутри мельхиоровой трубки с коэффициентом теплопередачи 50 [W/(m^2*K)]. Через 2 сек. (конец первого цикла нагрузки, когда приложенный ток равен нулю) максимальная температура системы составляет 83,3 К (Рис. 4а), что не превышает критическую температуру сверхпроводника, но приводит к снижению критического тока. Поэтому в последнем цикле нагрузки в момент времени t = 20 сек. максимальная температура составляет 93 К (Рис. 4б), что превышает критическую температуру ВТСП лент.

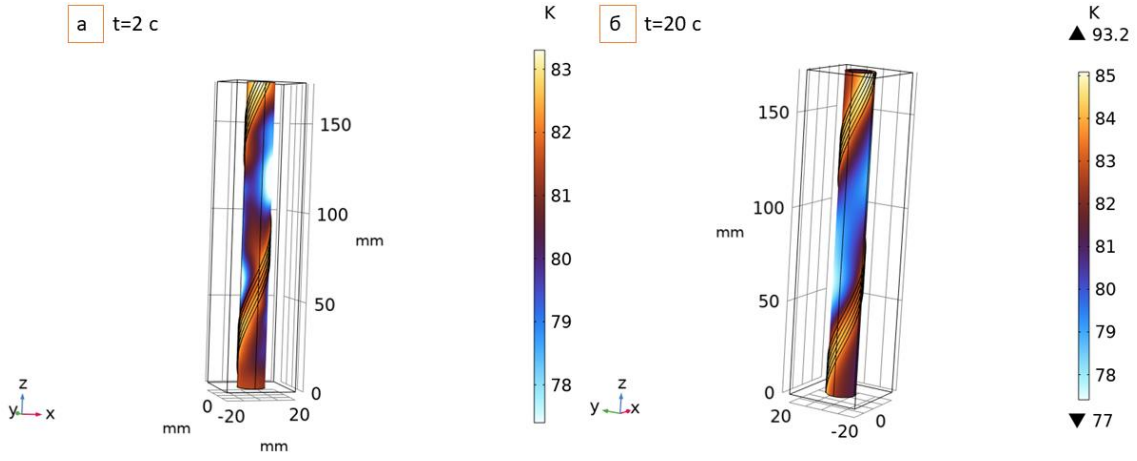

Рис. 4**.** Распределения температур в CORC кабеле при амплитуде нагрузки 1кА, хладагент-жидкий азот, а-время нагрузки 2 секунды, б-время нагрузки 20 секунд

Рассмотрим зависимости рассеянной мощности кабели при приложении токовой нагрузки в 5 циклах (Рис. 5). В момент времени, соответствующий максимальной амплитуде тока, тепловыделение также максимально. Поскольку нагрузка реализуется циклическим образом, необходимо рассмотреть отвод тепла во время снижения нагрузки. Охлаждающая система должна полностью стабилизировать кабель для

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

поддержания тех же нагрузочных характеристик в течение последующих циклов эксплуатации.

Стоит обратить внимание на две характерные особенности: в первом цикле после снижения нагрузки наблюдается локальное поддержание выделения мощности (обозначено цифрой 1). До тех пор, пока растет приложенная нагрузка, неизбежно продолжается и рост напряжения. За это время локальное тепловыделение в лентах (вплоть до надкритической температуры) приводит к локальному снижению критического тока лент.

При снижении токовой нагрузки всплески локального тепловыделения начинают распределяться по объему образца. Локальная температура начинает снижаться за счет охлаждения посредством теплопроводности твердого тела, при этом средняя температура образца снижается медленнее, поскольку, с одной стороны, осуществляется интенсивное охлаждение жидким хладагентом при снижающейся токовой нагрузке, а, с другой стороны, имеет место теплоприток от, так называемых, «горячих пятен». Перераспределение тепла внутри лент приводит к тому, что средний критический ток каждой ленты продолжает снижаться еще некоторое короткое время в процессе снятия нагрузки.

В первом цикле такая ситуация наблюдалась в момент полного выведения тока и тепло было практически полностью отведено криогенной системой до начала второго цикла. За последующие два цикла ВТСП нагревается до температуры, близкой к критической, поэтому критический ток всего проводника ниже, чем в начале первого цикла нагрузки. Во всем объеме образца происходит аккумуляция выделившегося тепла, поэтому напряжение на нем не может вернуться на первоначальный уровень до тех пор, пока тепло не будет отведено криогенной системой. Этим явлением обусловлен тот факт, что в момент времени t порядка 12 секунд (обозначено цифрой 2 на Рис. 5) несмотря на продолжающееся снижение транспортного тока, мощность, выделяемая на образце, перестает снижаться и выходит на планку. Проводник, таким образом, находится на пороге динамической тепловой нестабильности до тех пор, пока тепло, сгенерировавшееся за все циклы нагрузки, не будет отведено и критический ток не восстановится, а напряжение на образце с пониженным критическим током продолжает сохраняться.

Максимальная температура образца после 5 циклов токовой нагрузки составила 93,8 К, что превышает критическую температуру сверхпроводника – наблюдается локальный перегрев ВТСП лент.

Области на внешней поверхности мельхиоровой трубки, не находящиеся в прямом контакте с образцом, имеют температуру, равную температуре жидкого азота после проведения всех 5 циклов (Рис. 6 б), что свидетельствует об установлении теплового равновесия между хладагентом и трубкой.

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

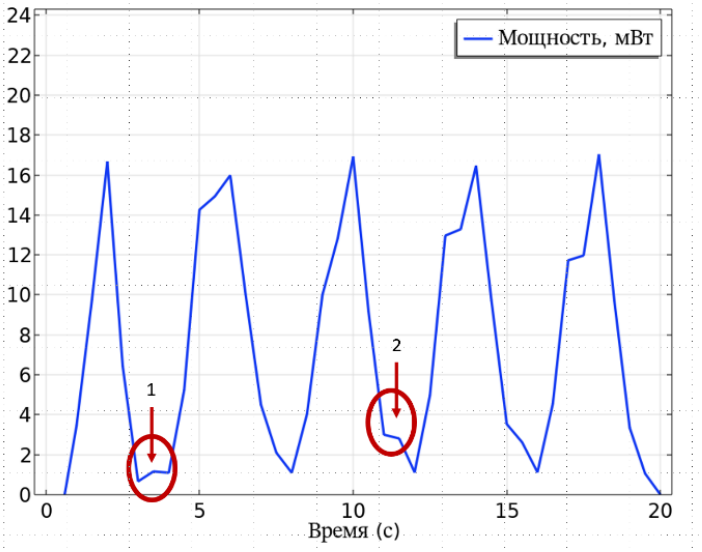

Рис. 5. Временная зависимость рассеянной мощности CORC-кабеле при охлаждении жидким азотом и максимальной амплитуде тока в 1кА для 5 циклов нагрузки

Это обозначает, что перегрев системы обусловлен именно аккумуляцией тепла в проводнике, а не изначальным отсутствием возможности охлаждения кабеля до температуры жидкого азота.

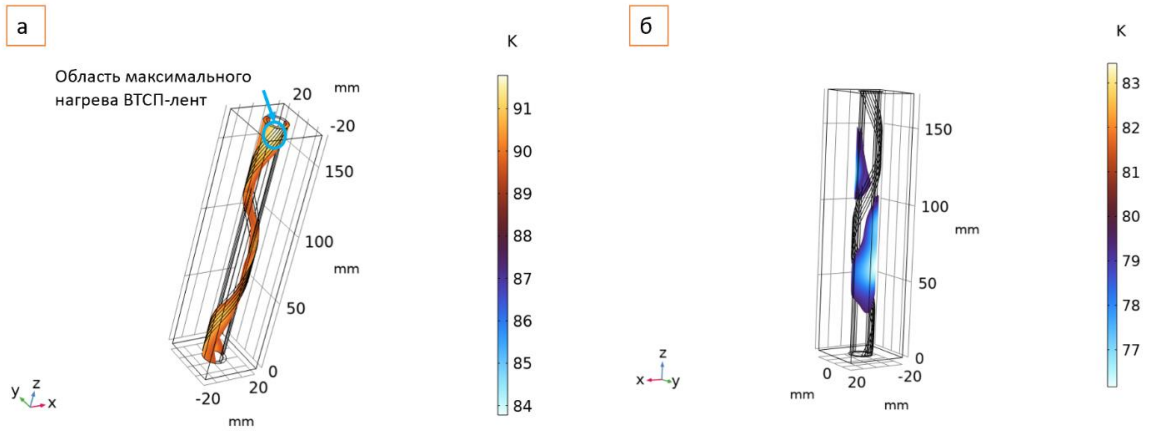

Рис. 6. Температурное распределение в CORC кабеле при амплитуде нагрузки 1кА, хладагент-жидкий азот, а-распределение температур в лентах, б-распределение наиболее «холодных» зон в мельхиоровой трубке

Полученные результаты показывают, что для стабилизации кабеля требуется изменение режимов нагрузки и/или охлаждения. В частности, необходимо либо понижать пропускаемый ток, либо использовать другой хладагент с более низкой температурой кипения, так как в рассмотренных условиях сверхпроводник находится в подкритическом режиме работы.

Другим вариантом повышения стабильности системы является использование ВТСП элементов с более высокими критическими характеристиками. Одним из способов повышения критических характеристик ВТСП является радиационное облучение. В этом случае за

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

счет формирования дополнительных искусственных центров пиннинга может наблюдаться повышение критического тока [11–15]. Ранее было продемонстрировано повышение критического тока облученных образцов в различных магнитных полях и проведено исследование значений энергии пиннинга. В собственном магнитном поле энергия пиннинга образцов, аналогичных представленным в настоящей работе, составляет U_0 = 8 мэВ [10]. Рассмотрим транспортные и тепловые характеристики ВТСП CORC-кабеля в собственном магнитном поле с учетом эффектов радиационного пиннинга. В качестве хладагента так же, как и в предыдущем случае, выступает жидкий азот, максимальная амплитуда тока варьируется от 1 кА до 1,2 кА. Зависимости выделившейся мощности от времени для граничных случаев приведены на Рис. 7. Наличие радиационных дефектов приводит к повышению критических характеристик ВТСП, что, в свою очередь, обеспечивает тепловую стабилизацию системы, выраженные области тепловой нестабильности и свидетельства перехода лент в подкритическое состояние отсутствуют. Стабильное улучшение тепловых, и как следствие, транспортных характеристик ВТСП кабеля сохраняется во всем рассмотренном диапазоне приложенных нагрузок. Таким образом, повышение критического тока образца, связанное с наличием радиационных дефектов, позволяет кабелю находиться в стабильном тепловом режиме при длительных циклических воздействиях.

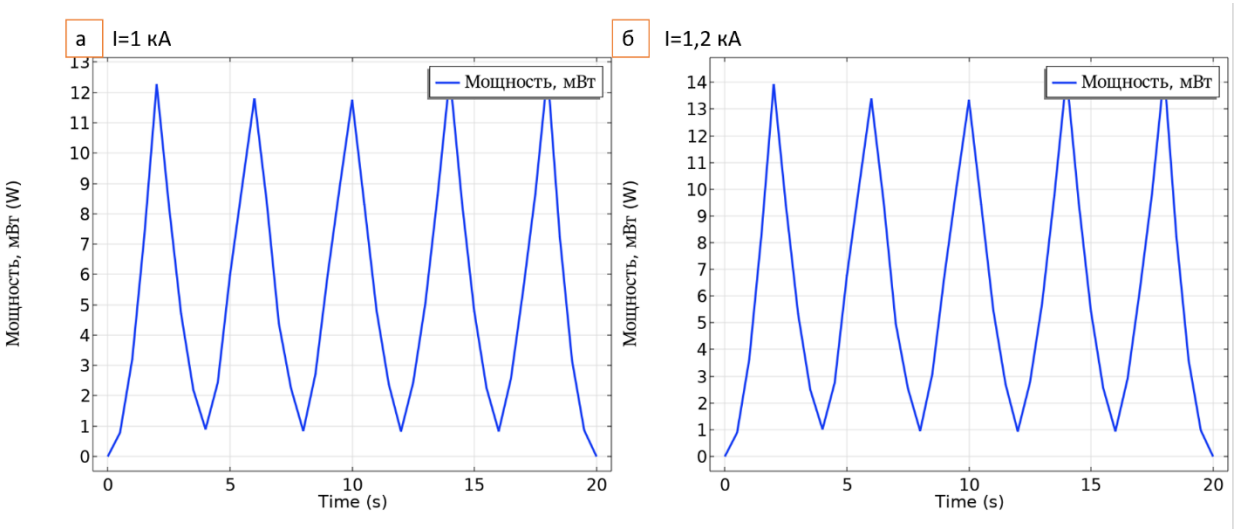

Рис. 7. Временные зависимости рассеянной мощности (мВт)
для облученного образца CORC-кабеля при охлаждении жидким азотом
(5 циклов токовой нагрузки амплитуды 1 кА(а) и 1,2 кА(б))

Наличие радиационных дефектов (Рис. 7 а) приводит к снижению рассеянной мощности в сравнении с необлученным образцом при эквивалентном режиме нагрузки на ~ 30 % (Рис. 5). Кроме того, при увеличении амплитуды транспортного тока на 20 % (Рис. 7 б) наблюдается снижение максимальной рассеянной мощности на ~ 20 % (Рис. 5) в

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

сравнении с необлученным образцом. Таким образом, показана возможность снижения потерь в ВТСП кабеле не только в аналогичных режимах работы, но и при увеличении токовой нагрузки.

При изменении схемы охлаждения с жидкого азота на жидкий неон наблюдается дополнительное подавление динамической тепловой нестабильности в системе (Рис. 8). При тех же параметрах энергии пиннинга и внешней нагрузки (амплитуда тока 1 кА) продемонстрировано более чем двукратное снижение мощности тепловыделения (Рис. 7а, 8б). Зависимости рассеянной мощности от времени для образцов стандартного и облученного ВТСП кабелей показывают улучшение токонесущей способности и тепловой стабильности ленты с радиационными дефектами. Повышение критических характеристик ВТСП путем радиационного облучения лент и использование оптимального режима охлаждения позволяет снизить потери образца более чем в 3,7 раза и достичь полного отсутствия локальных горячих зон (Рис. 6, 8а).

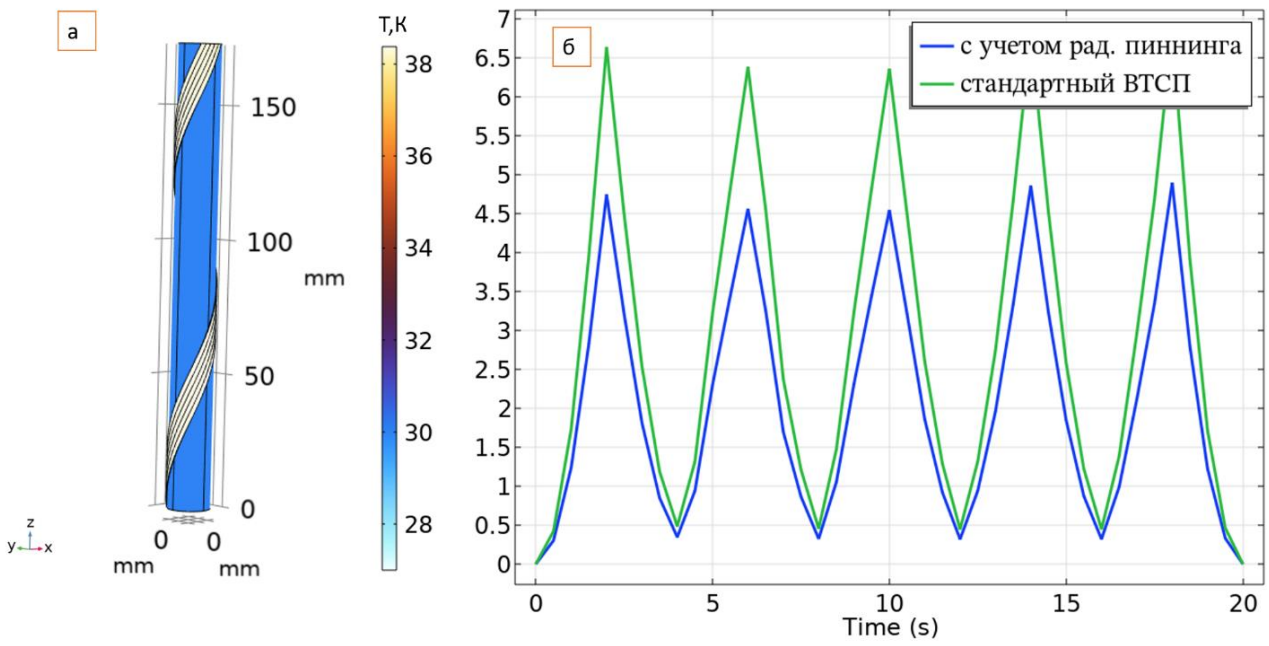

Рис. 8. Результаты моделирования ВТСП CORC-кабеля при охлаждении жидким неоном (5 циклов токовой нагрузки амплитуды 1кА): а – распределение температуры в облученном образце; б – временные зависимости рассеянной мощности (мВт) для стандартного и облученного образцов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В программном пакете COMSOL Multiphysics реализована мультифизическая модель CORC-кабеля на основе ВТСП лент 2-ого поколения. В модели учитывается слоистая структура ВТСП лент, рассмотрено влияние эффектов радиационного пиннинга на транспортные характеристики ВТСП кабеля. Охлаждение кабеля реализовано при двух

Received: 23.11.2023 Revised: 31.11.2023 Accepted: 25.12.2023
Поступил: 23.11.2023 Одобрена: 31.11.2023 Принята: 25.12.2023

хладагентах: жидкий азот и жидкий неон. Результаты моделирования транспортных характеристик CORC-кабеля на основе необлученных ВТСП лент при охлаждении жидким азотом показывают превышение критической температуры ВТСП элементов при пропускании циклической токовой нагрузки амплитуды 1 кА. Использование кабеля на основе ВТСП-лент с радиационными дефектами повышает тепловую стабильность системы при том же режиме охлаждения, что снижает рассеянную мощность более чем на 30 %. Смена схемы охлаждения кабеля на жидкий неон позволяет снизить рассеянную мощность более чем в два раза, а также позволяет пропускать на 20 % более высокий ток с более низкими потерями, чем для необлученного образца в том же режиме охлаждения.

Расчетная модель, учитывающая эффект радиационного пиннинга сверхпроводника, позволяет прогнозировать параметры, при которых CORC-кабель работает в стабильном тепловом режиме и ВТСП ленты не переходят в нормальное состояние.

БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка расчетной модели выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Расчеты влияния радиационных дефектов на транспортные характеристики сверхпроводящего CORC-кабеля выполнены при финансировании ОИЯИ по программе поддержки в рамках коллаборации «Ариадна».

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Mukherjee P, Poulomi, Rao VV. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications-A review. *Physica C: Superconductivity and its applications.* 2019;563:67-73. doi: 10.1016/j.physc.2019.05.001
2. Zhu J, Qiu M, Wei B, et al. Design, dynamic simulation and construction of a hybrid HTS SMES (high-temperature superconducting magnetic energy storage systems) for Chinese power grid. *Energy. 2013;*51:184-192. doi:10.1016/j.energy.2012.09.044
3. Uglietti D. A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors. *Superconductor Science and Technology.* 2019;32(5):053001. doi: 10.1088/1361-6668/ab06a2

Received: 23.11.2023 **Revised: 31.11.2023** **Accepted: 25.12.2023**
Поступил: 23.11.2023 **Одобрена: 31.11.2023** **Принята: 25.12.2023**

4. Wang X, Sheng J, Li XF, et al. Study on field-based superconducting cable for magnetic energy storage devices. *Journal of Energy Storage*. 2023;58:106386. doi: 10.1016/j.est.2022.106386
5. Van Der Laan DC, McRae DM, Weiss JD. Effect of transverse compressive monotonic and cyclic loading on the performance of superconducting CORC® cables and wires. *Superconductor Science and Technology*. *2018;32*(1):015002. doi: 10.1088/1361-6668/aae8bf
6. Liu L, Liu J, Zhai P, et al. The variation of pinning efficiency in YBCO films containing columnar defects. *Physica C: Superconductivity and its Applications.* 2022;592:1354000. doi: 10.1016/j.physc.2021.1354000
7. Lu J, Choi ES, Zhou HD. Physical properties of Hastelloy® C-276™ at cryogenic temperatures. *Journal of applied physics.* 2008;103:6. doi: 10.1063/1.2899058
8. Shen B, Grilli F, Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications. *IEEE access.* 2020;8:100403-100414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2996177
9. Chudy M, Zhong Z, Eisterer M, et al. n-Values of commercial YBCO tapes before and after irradiation by fast neutrons. *Superconductor Science and Technology*. 2015;28(3):035008. doi: 10.1088/0953-2048/28/3/035008
10. Attanasio C, Salvato M, Ciancio R, et al. Pinning energy and irreversibility line in superconducting GdSr2RuCu2O8. *Physica C: Superconductivity and its applications.* 2004;411(3-4):126-135. doi: 10.1016/j.physc.2004.07.004
11. Umezawa A, Crabtree GW, Liu JZ, et al. Anisotropy of the Lower Critical Field in YBa 2 Cu 3 O 7-δ. *High-T c Superconductors*. 1988;253-259. doi: 10.1007/978-1-4899-0846-9_33
12. Kirk M. Structure and flux pinning properties of irradiation defects in YBa2Cu3O7-x. *Cryogenics.* 1993;33(3):235-242. doi: 10.1016/0011-2275(93)90037-O
13. Crabtree GW, Kwok WK, Welp U, et al. Anisotropic twin boundary pinning in YBa2Cu3Ox. *Physica C: Superconductivity*. 1991;185:282-287. doi: 10.1016/0921-4534(91)91986-E
14. Hasan MK, Shobaki J, Al-Omari, et al. The rotational magnetic process and effects of-irradiation on vortex flux pinning in Tl-2223 at low temperatures. *Superconductor Science and Technology*. 1999;12(9):606. doi: 10.1088/0953-2048/12/9/306
15. Civale L, Marwick AD, Worthington TK, et al. Vortex confinement by columnar defects in YBa 2 Cu 3 O 7 crystals: Enhanced pinning at high fields and temperatures. *Physical Review Letters*. 1991;67(5):648. doi: 10.1103/PhysRevLett.67.648

Сведения об авторах:
Михайлова Ирина Константиновна, магистр, инженер-исследователь;
eLibrary SPIN: 2846-2594; ORCID: 0000-0002-3222-678X;
E-mail: ikmikhailova@mephi.ru
Мартиросян Ирина Валерьевна, кандидат физико-математических наук;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;;
E-mail: mephizic@gmail.com
Руднев Игорь Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru
Покровский Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук;
eLibrary SPIN:6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Received: 23.11.2023 **Revised: 31.11.2023** **Accepted: 25.12.2023**
Поступил: 23.11.2023 **Одобрена: 31.11.2023** **Принята: 25.12.2023**

Information about the authors:
Irina K. Mikhailova, Master's Student, Research Engineer;
eLibrary SPIN: 2846-2594; ORCID: 0000-0002-3222-678X;
E-mail: ikmikhailova@mephi.ru
Irina V. Martirosian, PhD in Physics and Mathematics, Research Engineer;
eLibrary SPIN: 3368-8809; ORCID: 0000-0003-2301-1768;
E-mail: mephizic@gmail.com
Igor A. Rudnev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 2070-5265; ORCID: 0000-0002-5438-2548;
E-mail: iarudnev@mephi.ru
Sergey V. Pokrovskii, PhD in Physics and Mathematics, Head of the Laboratory;
eLibrary SPIN: 6643-7817; ORCID: 0000-0002-3137-4289;
E-mail: sergeypokrovskii@gmail.com

Цитировать:
Михайлова И.К., Мартиросян И.В., Руднев И.А., и др. Численный анализ влияния радиационных дефектов на транспортные характеристики сверхпроводящего CORC-кабеля // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 72–85. doi: 10.17816/transsyst20239472-85

To cite this article:
Mikhailova IK, Martirosyan IV, Rudnev IA, et al. Numerical Analysis of the Influence of Radiation Defects on the Transport Characteristics of a Superconducting CORC-Cable. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(4):72-85. doi: 10.17816/transsyst20239472-85

Received: 23.11.2023 **Revised: 31.11.2023** **Accepted: 25.12.2023**
Поступил: 23.11.2023 **Одобрена: 31.11.2023** **Принята: 25.12.2023**