

Влияние способов охлаждения токовводов с высокотемпературными сверхпроводниками на их тепловое состояние

БУЯНОВ Ю.Л.

Рассмотрена практически важная задача теоретического моделирования токовводов, содержащих высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП токовводы), с целью определения теплового состояния токовводов при изменении различных рабочих параметров. Методика моделирования основана на разделении токовводов на отдельные участки, отличающиеся характером электрического сопротивления (проводник, сверхпроводник, контактное соединение проводника со сверхпроводником) и условиями охлаждения, определяемыми агрегатным состоянием охлаждающей среды (криоагент находится в жидком, газообразном состоянии) или когда участки теплоизолированы. На базе выбранного принципа выделения участков токовводов получены и представлены в систематической форме аналитические уравнения, описывающие распределение температуры и теплового потока на отдельных участках, имеющих разные тепловые и электрические характеристики. Граничные условия и условия теплового сопряжения выбираемых участков обеспечивают получение целостной математической модели токоввода. На основе предлагаемой методики для примера представлен сравнительный анализ характера изменения температуры и теплового потока в токовводах с одинарным и двухступенчатым охлаждением при изменении расхода охлаждающих газов (гелия и азота).

Ключевые слова: сверхпроводниковые установки, ВТСП токовводы, расчёт криогенных токовводов, оптимизация ВТСП токовводов

Тепловая нагрузка на систему криогенного обеспечения сверхпроводникового устройства в значительной степени определяется выделением и распространением тепла в токовводах — основного источника тепла, поступающего из окружающей среды в низкотемпературную зону. Вместе с первыми ординарными конструкциями криотоковводов сверхпроводниковых устройств появились предложения о возможном уменьшении потока тепла в низкотемпературную зону путём усиления теплообмена в токовводах, использования дополнительных криоагентов или шунтирования низкотемпературным сверхпроводником нижней медной части токовводов, проходящих в ванну с жидким гелием (например, [1,2]). Возможность использования в настоящее время в конструкциях токовводов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) позволяет значительно уменьшить приток тепла к источнику охлаждения сверхпроводникового устройства.

Различные условия функционирования разнообразных сверхпроводниковых устройств определяют конструктивные схемы токовводов и способы их основного и дополнительного охлаждения. Вдоль длины комбинированных токовводов, содержащих сверхпроводники, можно выделить три ос-

новных участка: резистивный, где токоввод выполнен из проводникового металла; контактный, где проводниковый металл соединён со сверхпроводником, и сверхпроводниковый участок, соединённый с питаемым токовводом устройством. В зависимости от условий работы сверхпроводникового устройства поверхность этих участков может охлаждаться криогенными жидкостями, холодными газами или не иметь поверхностного охлаждения.

В данной работе получены в систематизированной форме аналитические уравнения, устанавливающие распределение температуры и теплового потока в указанных участках.

Это позволит путём их соединения составить математическую модель токоввода определённой конструкции и решать задачи, связанные с теоретическим исследованием теплового состояния токоввода при изменении различных рабочих параметров.

Распределение температуры и теплового потока на различных участках ВТСП токовводов. На рис. 1 показаны охлаждаемые различными способами обособленные участки токоввода (резистивный, контактный и сверхпроводниковый), которые при их соединении составляют ту или иную конструктивную схему. Выделяя на каждом из рассматри-

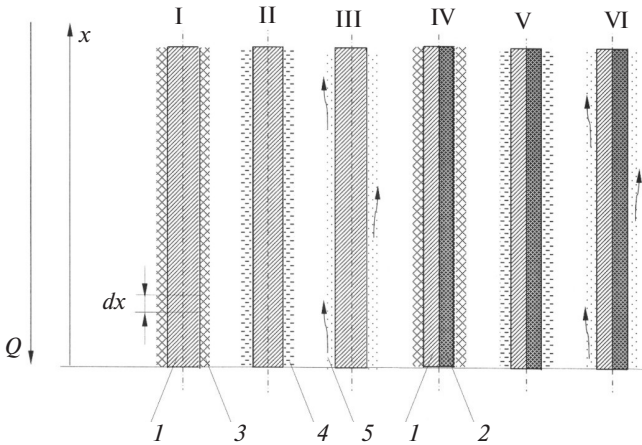


Рис. 1. Схематическое изображение участков криотоковвода при различных условиях охлаждения. Резистивный (или сверхпроводящий) участок: I – с неохлаждаемой поверхностью; II – омываемый криожидкостью (криоагентом); III – охлаждаемый холодным газом. Контактный участок: IV – неохлаждаемый; V – охлаждаемый жидким криоагентом; VI – охлаждаемый паром или газом; 1– резистивный металл; 2– сверхпроводник; 3 – тепловой изолятор; 4 – криожидкость; 5 – охлаждающий газ; x – осевая координата; Q – тепловой поток вдоль участка

ваемых участков элементарный участок длиной dx , можно с учётом показанного на рис. 1 направления осевой координаты x и теплового потока Q получить соответствующие одномерные дифференциальные уравнения теплового баланса: $dQ_1 + dQ_2 + dQ_3 = dQ_4$, где dQ_1 – тепло, поступающее на элементарный участок теплопроводностью; dQ_2 – джоулево тепло, выделяющееся на участке dx ; dQ_3 – тепло, выделяющееся на участке dx при переходе тока из нормального проводника в сверхпроводник (если участок представляет собой их соединение); dQ_4 – тепло, отводимое источником холода.

Вид уравнений зависит от принятых допущений, касающихся членов уравнений, зависящих от температуры, и методов определения качества теплообмена между охлаждающей средой и телом токоввода. Далее последовательно приведены уравнения, описывающие изменение температуры и теплового потока на выделенных участках токоввода, показанных на рис. 1.

Участок I. Представляет часть токоввода, на которой поверхностное охлаждение отсутствует. Такое состояние возможно при использовании криогенных газовых машин (криокулеров), с помощью которых охлаждение происходит теплопроводностью, а также в некоторых конструкциях токовводов. После решения дифференциального уравнения теплового баланса для элементарного участка dx (при постоянных усреднённых значениях коэффициента теплопроводности λ и сопротивления ρ) получим, рассматривая одномерную задачу, следующие уравнения, определяющие распределение

температуры $T(x)$ и теплового потока $Q(x)$ вдоль координаты x :

$$T(x) = C_1 + C_2 x - j_0^2 \frac{\rho}{2\lambda} x^2; \quad (1)$$

$$Q(x) = \lambda S (C_2 - j_0^2 \frac{\rho}{\lambda} x), \quad (2)$$

где j_0 – плотность тока в токовводе; S – площадь поперечного сечения токоввода (или отдельного токоведущего элемента токоввода, состоящего из параллельно соединённого пучка имеющих одинаковое охлаждение элементов); C_1, C_2 – постоянные интегрирования, которые определяются после принятия граничных условий. В случае, когда участок I находится в сверхпроводящем состоянии,

$$T(x) = C_1 + C_2 x; \quad (3)$$

$$Q(x) = \lambda S C_2. \quad (4)$$

Участок II. При охлаждении резистивного участка жидким криоагентом, интенсивность теплообмена в котором определяется коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{ж}$, распределения температуры и теплового потока определяются выражениями:

$$T(x) = T_0 + C_1 \exp\left(\sqrt{\frac{\alpha_{ж} P}{\lambda S}} x\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha_{ж} P}{\lambda S}} x\right) + j_0^2 \frac{\rho S}{\alpha_{ж} P}; \quad (5)$$

$$Q(x) = \sqrt{\alpha_{ж} P \lambda S} \left[C_1 \exp\left(\sqrt{\frac{\alpha_{ж} P}{\lambda S}} x\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha_{ж} P}{\lambda S}} x\right) \right], \quad (6)$$

где T_0 – температура криоагента; P – смачиваемый периметр токоввода. В случае, когда участок находится в сверхпроводящем состоянии, $\rho = 0$.

Участок III. Если резистивный участок охлаждается холодным газом, теплоёмкость которого c_p , массовый расход m , а коэффициент теплоотдачи $\alpha_{г}$, то осевое изменение температуры и теплового потока на этом участке [3]:

$$T(x) = C_1 \frac{\exp(K_1 x)}{K_1} + C_2 \frac{\exp(K_2 x)}{K_2} + j_0^2 \frac{\rho S}{c_p m} \left(\frac{\lambda S}{c_p m} + x \right); \quad (7)$$

$$Q(x) = \lambda S \left[C_1 \exp(K_1 x) + C_2 \exp(K_2 x) + j_0^2 \frac{\rho S}{c_p m} \right], \quad (8)$$

где $K_1 = -\frac{\alpha_{г} P}{2 c_p m} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{г} P}{2 c_p m}\right)^2 + \frac{\alpha_{г} P}{\lambda S}}$;

$$K_2 = -\frac{\alpha_{\Gamma} P}{2c_p m} - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\Gamma} P}{2c_p m}\right)^2 + \frac{\alpha_{\Gamma} P}{\lambda S}}$$

Изменение температуры охлаждающего газа вдоль токоввода:

$$\theta(x) = T(x) - \frac{\lambda S}{\alpha_{\Gamma} P} [C_1 K_1 \exp(K_1 x) + C_2 K_2 \exp(K_2 x)] - j_0^2 \frac{\rho S}{\alpha_{\Gamma} P}$$

При допущении идеального теплообмена, когда $\frac{dT}{dx} = \frac{d\theta}{dx}$, функции распределения температуры и теплового потока вдоль оси x определяются выражениями:

$$T(x) = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{c_p m}{\lambda S} x\right) + j_0^2 \frac{\rho S}{c_p m} \left(x + \frac{\lambda S}{c_p m}\right); \quad (9)$$

$$Q(x) = c_p m C_2 \exp\left(\frac{c_p m}{\lambda S} x\right) + j_0^2 \frac{\lambda \rho}{c_p m} S^2. \quad (10)$$

Участок IV. Этот участок представляет собой неохлаждаемое контактное соединение между резистивной частью токоввода и сверхпроводником. В контакте надо учитывать дополнительное тепло, которое выделяется при переходе тока из резистивного проводника в сверхпроводник. Контактное поверхностное сопротивление можно представить в виде суммы сопротивлений припоя (если контакт паяный) и сопротивления, обусловленного наличием непроводящих ток пятен. Изменение температуры и теплового потока в неохлаждаемом контакте может быть вычислено с использованием [4]:

$$T(x) = C_1 + C_2 x - j_0^2 \frac{\rho \operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x)}{4\lambda \psi \operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} L_K)}; \quad (11)$$

$$Q(x) = \lambda S \left[C_2 - j_0^2 \frac{\rho \operatorname{sh}(2\sqrt{\psi} x)}{2\lambda \sqrt{\psi} \operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} L_K)} \right], \quad (12)$$

где $\psi = (R/R_K)L_K^2$; R – сопротивление нормального металла в контактном соединении «нормальный металл–сверхпроводник»; R_K – контактное (поверхностное) сопротивление; L_K – длина контакта.

Участок V. В случае, когда контакт охлаждается жидким криоагентом, изменение температуры и теплового потока в контакте описываются уравнениями:

$$T(x) = T_0 + C_1 \exp\left(\sqrt{\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S}} x\right) + C_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S}} x\right) +$$

$$+ j_0^2 \frac{2\rho}{\lambda} \frac{\operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x)}{\left(\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S} - 4\psi\right) [\operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} L_K) - 1]}; \quad (13)$$

$$Q(x) = \lambda S \left[C_1 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S}} \exp\left(\sqrt{\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S}} x\right) - C_2 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S}} \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S}} x\right) + j_0^2 \frac{4\rho \sqrt{\psi}}{\lambda} \frac{\operatorname{sh}(2\sqrt{\psi} x)}{\left(\frac{\alpha_{\text{ж}} P}{\lambda S} - 4\psi\right) [\operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} L_K) - 1]} \right]. \quad (14)$$

Участок VI. В контакте, охлаждаемом газообразным криоагентом, когда известно значение коэффициента теплоотдачи α_{Γ} , температура и тепловой поток в любой точке x определяются формулами:

$$T(x) = C_1 \frac{\exp(K_1 x)}{K_1} + C_2 \frac{\exp(K_2 x)}{K_2} + C_3 + \frac{K_3}{K_1 K_2} (K_1^{-1} + K_2^{-1} + x), \quad (15)$$

$$\text{где } K_3 = -j_0^2 \frac{\rho (\alpha_{\Gamma} P / c_p m) \operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x) + 2\sqrt{\psi} \operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x)}{\operatorname{sh}^2(\sqrt{\psi} L_K)};$$

$$Q(x) = \lambda S \left[C_1 \exp(K_1 x) + C_2 \exp(K_2 x) + \frac{K_3}{K_1 K_2} \right]. \quad (16)$$

При допущении идеального теплообмена уравнения (15) и (16) имеют вид:

$$T(x) = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{c_p m}{\lambda S} x\right) + j_0^2 \frac{\rho}{\lambda} \frac{2\sqrt{\psi} \operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x) + \frac{c_p m}{\lambda S} \operatorname{sh}(2\sqrt{\psi} x)}{\sqrt{\psi} [\operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} L_K) - 1] \left[\left(\frac{c_p m}{\lambda S}\right)^2 - 4\psi \right]}; \quad (17)$$

$$Q(x) = \lambda S \left[\frac{c_p m}{\lambda S} C_2 \exp\left(\frac{c_p m}{\lambda S} x\right) +$$

$$+ j_0^2 \frac{2\rho}{\lambda} \frac{2\psi \operatorname{sh}(2\sqrt{\psi} x) + \frac{c_p m}{\lambda S} \sqrt{\psi} \operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} x)}{\sqrt{\psi} [\operatorname{ch}(2\sqrt{\psi} L_K) - 1] \left[\left(\frac{c_p m}{\lambda S}\right)^2 - 4\psi \right]} \right]. \quad (18)$$

Влияние месторасположения ВТСП сверхпроводника на тепловой режим токоввода. На рис. 2 схематично показаны некоторые существующие типы ВТСП токовводов, различающиеся конструктивными особенностями. В токовводе (рис. 2,а), проходящем в ванну криостата, где находится сверхпроводниковое устройство, участок соединения сверхпроводника с резистивным участком, как и сам сверхпроводник, полностью погружены в криогенную жидкость. При плотности теплового потока, не превышающей критического значения, температуры контакта и сверхпроводника близки к температуре криогенной жидкости T_0 . Тепловой поток, который поступает к криожидкости, определяется тепловым состоянием резистивного участка, омываемого испаряющейся жидкостью. Анализ теплового состояния токоввода может быть выполнен с использованием уравнений, которые соответствуют участкам: III (резистивная часть токоввода охлаждается холодным газом); V (контактное соединение «нормальный металл – сверхпроводник» погружено в криожидкость); II (сверхпроводник в жидкости). Участки токоввода связаны между собой граничными условиями.

Для уменьшения тепла, поступающего на самый нижний температурный уровень, часть резистивного участка на более высоком температурном уровне заменяется сверхпроводником (как показано на рис. 2,б), так как его коэффициент теплопроводности меньше, чем у проводника. Вместе со сверхпроводником может в низкотемпературную зону проходить обесточенная медная часть токоввода, служащая шунтом, или шунт, выполненный из другого материала, или только сверхпроводник с

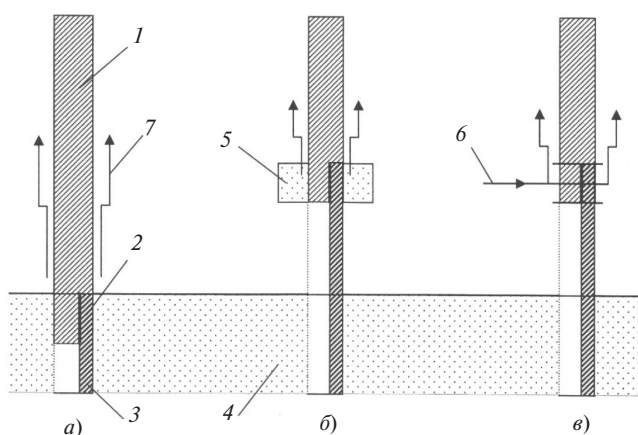


Рис. 2. Схемы ВТСП токовводов: а – токоввод без дополнительного охлаждения; б – токоввод с охлаждением дополнительным жидким криоагентом; в – токоввод с дополнительным охлаждением холодным газом; 1 – резистивный участок; 2 – контактный участок; 3 – сверхпроводниковый участок; 4 – жидкий криоагент, охлаждающий сверхпроводниковое устройство; 5 – ванна с дополнительным жидким криоагентом; 6 – трубопровод с холодным газом; 7 – испарившийся криоагент или холодный газ от внешнего источника холода

малотеплопроводным стабилизатором, предназначенный для изготовления токовводов. Тепловой режим токоввода должен быть тщательно проанализирован с использованием приведенных выше уравнений, которые соответствуют участкам, составляющим конкретный токоввод, так как задача обеспечения минимального подвода тепла к криогенной жидкости не может быть решена в отрыве от другой задачи – обеспечения надёжной работы токоввода.

Например, при замещении в токовводе (рис. 2,а) части проводника сверхпроводником с выводом его частично из жидкости в зону газового охлаждения может оказаться, что уменьшение теплового потока к криоагенту и, следовательно, уменьшение скорости его испарения приведёт к увеличению средней температуры токоввода. Возможны также случаи нештатного понижения уровня криоагента, когда оголяется контактный участок, а изменение фазового состояния охлаждающей среды при большом контактом сопротивлении может привести к переходу сверхпроводника в нормальное состояние. Поэтому необходимо выявить потенциально опасные режимы работы. Условная конструкция токоввода, можно дополнительно охладить контактный участок в ванне с дополнительным жидким криоагентом (например, в ванне с жидким азотом, если сверхпроводниковое устройство охлаждается жидким гелием, рис. 2,б) или прокачивать через контактный участок холодный газ (рис. 2,в).

Следует отметить, что в общей схеме охлаждения сверхпроводникового устройства могут быть, кроме испаряющегося криоагента, дополнительные источники холода, которые можно направить на охлаждение. В отличие от дьюарного охлаждения так называемых самоохлаждающихся токовводов, при котором основное количество холодного газа образуется в результате притока тепла к криоагенту непосредственно по самим токовводам, возможно охлаждение их независимым потоком подаваемого извне холодного газа, подготовленного в холодильнике или в холодильных газовых машинах.

Изменение теплового состояния токоввода при разных условиях охлаждения. Применяя уравнения, полученные для участков I–VI, можно выявить тепловое состояние токоввода определённой конструкции. Меняя плотность тока и изменяя параметры, входящие в соответствующие уравнения, можно определить вид функций $T(x)$, $Q(x)$ или $q(x)=Q(x)/I_0$ и, следовательно, установить экономичность и надёжность работы токоввода. В качестве примера рассмотрим изменение температуры и теплового потока в токоведущем элементе токоввода, схема которого показана на рис. 3.

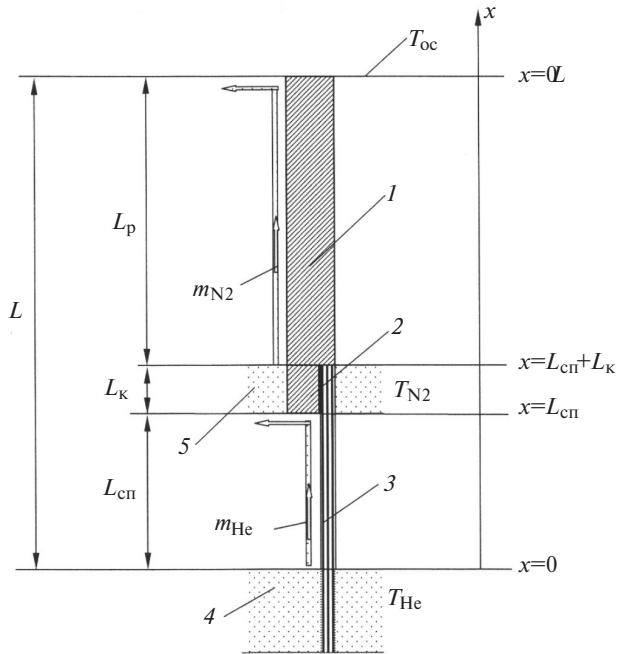


Рис. 3. Схема токоведущего элемента токоввода с двухуровневым охлаждением: 1 – резистивная секция; 2 – контактный участок; 3 – сверхпроводниковый участок; 4 – ванна с жидким гелием; 5 – ванна с жидким азотом. Температура: T_{oc} – окружающей среды; T_{N_2} – жидкого азота; T_{He} – жидкого гелия. Расход: m_{N_2} – газообразного азота; m_{He} – газообразного гелия. Длина: L – расчётная токоввода; L_k – контактного участка; L_p – резистивной секции; $L_{сп}$ – сверхпроводникового участка; x – осевая координата

Для расчёта токоввода такой конфигурации используются следующие дифференциальные уравнения: (9), (10) на участке $[L, L_{сп} + L_k]$; (13) и (14) на участке $[L_{сп} + L_k, L_{сп}]$ и упрощённые уравнения (9) и (10) (при $\rho=0$) на участке $[L_{сп}, 0]$. Уравнения связаны условиями:

$$\begin{aligned} (T_1)_{z=L} &= T_{oc}; (T_1)_{x=L_k+L_{сп}} = (T_2)_{x=L_k+L_{сп}}; \\ (Q_1)_{x=L_k+L_{сп}} &= (Q_2)_{x=L_k+L_{сп}}; \\ (T_2)_{x=L_{сп}} &= (T_3)_{x=L_{сп}}; (Q_2)_{x=L_{сп}} = (Q_3)_{x=L_{сп}}; \\ (T_3)_{x=0} &= T_0. \end{aligned}$$

Следует заметить, что в связи с тем, что значение текущей координаты x в начале контактного участка токоввода, показанного на рис. 3, равно не нулю, как на участке V, а принимает значение $x=L_{сп}$, то уравнение, определяющее изменение плотности тока в контакте, будет иметь вид $j = j_0 \frac{\text{sh}[\sqrt{\psi}(L_{сп} - x)]}{\text{sh}(\sqrt{\psi}L_k)}$, а не $j = j_0 \frac{\text{sh}(\sqrt{\psi}x)}{\text{sh}(\sqrt{\psi}L_k)}$. Поэтому

в данном конкретном случае члены уравнений (13) и (14) $\text{ch}(2\sqrt{\psi}x)$ и $\text{sh}(2\sqrt{\psi}x)$ следует записывать в виде: $\text{ch}[2(\sqrt{\psi}(L_{сп} - x))]$ и $\text{sh}[2(\sqrt{\psi}(L_{сп} - x))]$.

Предположим, что токоввод соединяет источник питания, находящийся при комнатной температуре $T_{x=L} = 300$ К, со сверхпроводниковым устройством, размещённым в ванне с жидким гелием

$T_{x=0} = 4,2$ К. Токоввод составлен из пучка одинаково охлаждаемых токоведущих элементов. Установим, что расчётная длина токоведущего элемента токоввода $L=1$ м. К его резистивной части из меди М1 с площадью поперечного сечения 5×1 мм² припаян на длине $L_k=50$ мм высокотемпературный сверхпроводник $4 \times 0,1$ мм². На основе данных, приведённых в [5] (в интервале температур 4,2–40 К и при 77,4 К), среднеинтегральный коэффициент теплопроводности высокотемпературного сверхпроводника в интервале между температурами кипения жидкого азота и гелия оценен в 312 Вт/(м·К) (для ВТСП ленты производства SP со стабилизатором из меди с остаточным сопротивлением $RRR = 42$). Контактный участок полностью погружен в жидкий азот.

В расчёте также принято, что в соединении «нормальный металл–сверхпроводник» значения сопротивления нормального металла и контактного сопротивления равны. Резистивная часть охлаждается газообразным азотом, поток которого m_{N_2} регулируется. Полагаем, что на длине $L_{сп}$ сверхпроводник, проходящий в гелиевую ванну без шунта, охлаждается испарившимся гелием, расход которого m_{He} также можно регулировать. Установив определённое значение плотности тока (например, $j_0=10$ А/мм²), рассмотрим изменение температурного профиля (рис. 4) и теплового потока (рис. 5) при изменении условий охлаждения.

Представим, что нижняя часть токоввода, длина которого $L_{сп}=0,3$ м, не охлаждается газообразным гелием, а верхняя резистивная часть $L_p=0,65$ м идеально охлаждается газообразным азотом, расчётное значение которого при условии самоохлаждения составляет $m_{N_2} = m_{N_2}^* = 6,75$ мг/с (поз. 1, рис. 4 и 5). При $j_0=10$ А/мм² профиль теплового потока $Q(x)$ примерно отвечает случаю, когда на верхнем конце токоввода $Q_{x=L}=0$ (это значение теплового потока достигается в данном конкретном токовводе при $j_0=9,2$ А/мм²). При уменьшении расхода холодного газообразного азота m_{N_2} , например в соотношении $m_{N_2}/m_{N_2}^*=0,5$ или 0,1 (поз. 2, 3), температура резистивной секции токоввода возрастает; тепловой поток также меняется, но в зоне $0 \leq x \leq L_{сп}$ профиль температуры и плотность теплового потока практически не изменяются до тех пор, пока (при увеличении тока) тепловой поток на единицу площади теплообменной поверхности в зоне $L_{сп} \leq x \leq L_{сп} + L_k$ остаётся меньше критической плотности теплового потока при кипении жидкого азота. Показанные на рис. 4 и 5 кривые $T(x)$, $Q(x)$ (поз. 4) соответствуют условиям полного прекращения охлаждения газообразным

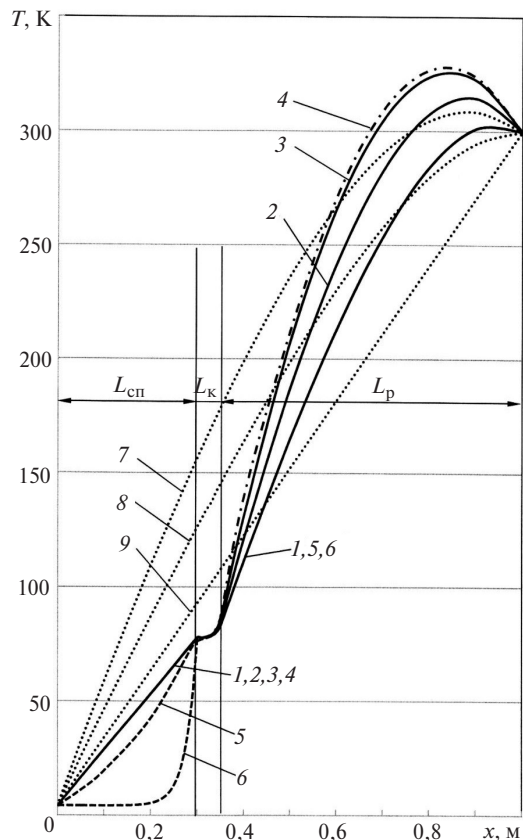


Рис. 4. Изменение температуры вдоль координаты в токоведущих элементах тоководов, показанных на рис. 2,б (1–6) и на рис. 2,а (7–10). Расчётная схема токоведущего элемента токовода рис. 2,б представлена на рис. 5. Плотность тока $j_0 = 10 \text{ А/мм}^2$. Геометрические размеры обозначены в тексте. Расход охлаждающего газа: 1 – $m_{\text{N}_2}^* = 6,75 \text{ мг/с}$; $m_{\text{He}} = 0$; 2 – $m_{\text{N}_2}^* / 2$, $m_{\text{He}} = 0$; 3 – $m_{\text{N}_2}^* / 10$, $m_{\text{He}} = 0$; 4 – $m_{\text{N}_2}^* = 0$, $m_{\text{He}} = 0$; 5 – $m_{\text{N}_2}^* = 6,75 \text{ мг/с}$, $m_{\text{He}} = 0,1 \text{ мг/с}$; 6 – $m_{\text{N}_2}^* = 6,75 \text{ мг/с}$, $m_{\text{He}} = 1 \text{ мг/с}$; 7 – $m_{\text{He}} = 1 \text{ мг/с}$; 8 – $m_{\text{He}} = 1,6 \text{ мг/с}$; 9 – $m_{\text{He}} = 2,5 \text{ мг/с}$

азотом резистивной секции ($m_{\text{N}_2} = 0$) и отсутствия охлаждения газообразным гелием нижней части токовода ($m_{\text{He}} = 0$).

При омывании холодного участка испарившимся гелием на участке $0 \leq x \leq L_{\text{сп}}$ происходит деформация линейных графиков зависимости $T(x)$ и $Q(x)$, отвечающих условию $m_{\text{He}} = 0$ (поз. 1–4, рис. 4 и 5). На графиках (поз. 5, б) показаны изменения температуры и теплового потока при разных значениях расхода газообразного гелия m_{He} (от 0,1 до 1 мг/с). С увеличением расхода m_{He} происходит уменьшение значения $(dT/dx)_{x=0}$ и, следовательно, уменьшение удельного теплового потока на единицу силы тока.

На рис. 4 и 5 для сравнения точечным пунктиром нанесены графики распределения температуры и теплового потока вдоль охлаждаемого газообразным гелием токовода, показанного на рис. 2,а, у которого отсутствуют сверхпроводник выше уровня жидкого гелия и дополнительное охлаждение. С увеличением расхода газообразного гелия

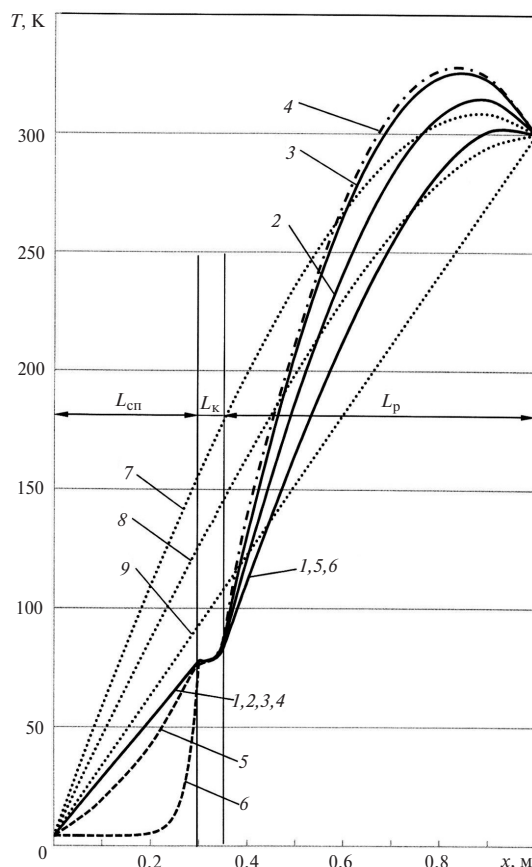


Рис. 5. Изменение теплового потока вдоль координаты в токоведущих элементах тоководов, показанных на рис. 2,б (1–6) и на рис. 2,а (7–10); $j_0 = 10 \text{ А/мм}^2$. Расход охлаждающих газов для позиций 1–9 указан на рис. 4

(поз. 7, 8, 9) увеличивается зона, в которой выше уровня гелия ($x > 0$) возможно размещение высокотемпературного сверхпроводника ($T_{\text{He}} < T < T_{\text{кр}}$), но сравнение теплопритоков, поступающих к жидкому гелию ($x=0$) при одном и том же расходе газообразного гелия для тоководов типа рис. 2,а и б, показывает, что токовод типа 2,а менее экономичен, чем токовод типа 2,б (если, конечно, не принимать во внимание более сложную конструкцию токовода типа 2,б и наличие дополнительного криоагента). Кривые 6 и 7 на рис. 4 и 5 соответствуют одинаковому расходу $m_{\text{He}} = 1 \text{ мг/с}$. Кривые 8 на тех же рисунках соответствуют ситуации, когда существующий расход охлаждающего газа определяет такое распределение температуры вдоль оси x , при котором $Q_{x=L} = 0$, а кривые 9 соответствуют случаю, когда тепловой поток вдоль токовода постоянен, т.е. приток и отвод тепла вдоль токовода равны. При дальнейшем увеличении расхода охлаждающего газа приток тепла $Q_{x=0}$ уменьшается, но остаётся выше, чем у токовода типа 2,а, т.е. токовод 2,а менее экономичен.

Расчёт токоведущих элементов тоководов, участки которых имеют различное охлаждение, показал, что с помощью полученных аналитических

уравнений (1)–(18), классифицированных по типу участка (резистивный, контактный или сверхпроводниковый), а также способу отвода тепла (криогенная жидкость, газ или адиабатная теплоизоляция), можно, задав граничные условия и условия сопряжения температуры и теплового потока при соединении отдельных частей токовыводящего элемента, определить в нём распределение температуры и теплового потока. Использование предложенной методики расчёта позволяет оценить при заданных геометрических параметрах работоспособность токовывода при изменении плотности тока или определить необходимые геометрические параметры, отвечающие заданному току.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matthews P.W., Khoo T.L., Neufeld P.D. A study of heat leaks into cryostats due to electrical leads. – *Cryogenics*, 1965, vol. 5, No. 4, pp. 213–215.
2. Keilin V.E., Klimenko E.Y. Investigation into high current leads in liquid helium applications. – *Cryogenics*, 1966, vol. 6, No. 4, pp. 222–228.

Elektrichestvo, 2019, No. 1, pp. 30–36

3. Буянов Ю.Л. Энергетические затраты на охлаждение содержащих высокотемпературные сверхпроводники токовыводов в различных криогенных средах. – *Изв. РАН. Энергетика*, 2017, №2, с. 101–116.

4. Буянов Ю.Л. Тепловые потоки в токовыводах, содержащих высокотемпературные сверхпроводники. – *Электричество*, 2015, № 11, с. 41–49.

5. Bonura M., Senatore C. High-field transport properties of REBCO coated conductors. – *Superconductors Science and Technology*, 2015, vol. 28, No. 2, pp. 1–16.

6. Бурштейн А.И. Исследование стационарного теплового потока, протекающего сквозь проводник с током. – *Журнал технической физики*, 1957, т. XXVII, № 7, с. 1510–1520.

[03.05.2018]

Автор: Буянов Юрий Леонидович окончил Московский энергетический институт в 1966 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование теплового режима и токонесящей способности криогенных токовыводов в сверхпроводящие магнитные устройства». Ведущий инженер Объединённого института высоких температур РАН.

DOI:10.24160/0013-5380-2019-1-30-36

The Effect the Cooling Methods of Current Leads with High-Temperature Superconductors Have on Their Thermal State

BUYANOV Yury L. (*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*) – *Lead engineer, Cand. Sci. (Eng.)*

The article considers the practically important issue of the modeling of current leads containing high-temperature superconductors (HTSC current leads) with a view to determine the lead thermal state in response to changes of different operating parameters. The modeling procedure is based on subdividing the current inlets into individual segments differing from each other in the nature of their electrical resistance (conductor, superconductor, and contact connection of the conductor and superconductor) and in their cooling conditions, which are determined by the cooling medium aggregative state (whether the cryoagent is in liquid or gaseous state), or when the segments are thermally insulated. The chosen principle for subdividing the current lead into segments was used as a basis to obtain and present in systematic form the analytic equations describing the distribution of temperature and heat flux in individual segments having different thermal and electrical characteristics. The boundary conditions and the thermal matching conditions of the selected segments make it possible to obtain an integer current lead mathematical model. The use of the proposed procedure is illustrated on the example of carrying out a comparative analysis of the temperature and heat fluxes variation patterns in current leads fitted with single- and two-stage cooling in changing the cooling gases (helium and nitrogen) flowrate.

Key words: *superconducting installations, HTSC current leads, calculation of cryogenic current leads, optimization of HTSC current leads*

REFERENCES

1. Matthews P.W., Khoo T.L., Neufeld P.D. A study of heat leaks into cryostats due to electrical leads. – *Cryogenics*, 1965, vol. 5, No. 4, pp. 213–215.
2. Keilin V.E., Klimenko E.Y. Investigation into high current leads in liquid helium applications. – *Cryogenics*, 1966, vol. 6, No. 4, pp. 222–228.
3. Buyanov Yu.L. *Izv. RAN. Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2017, No. 2, pp. 101–116.

4. Buyanov Yu.L. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 11, pp. 41–49.

5. Bonura M., Senatore C. High-field transport properties of REBCO coated conductors. – *Superconductors Science and Technology*, 2015, vol. 28, No. 2, pp. 1–16.

6. Burshtein A.I. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – in Russ. (Technical Physics Journal)*, 1957, vol. XXVII, No. 7, pp. 1510–1520.

[03.05.2018]