



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВЫХ ВВОДОВ ИЗ СУБМИКРОННЫХ ПОРОШКОВ СПЛАВОВ ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА ДЛЯ ВТСП-ЛЭП*

С.Нестеров, д.т.н., В.Романько, к.т.н., А.Холопкин, к.ф.-м.н. /holopkinai@mail.ru

К числу перспективных применений высокотемпературных сверхпроводящих проводников (ВТСП) относится их использование в линиях передачи электроэнергии (ЛЭП). За последние годы выполнен ряд исследований по оценке возможности создания ВТСП-ЛЭП на переменном токе [1, 2]. Основной недостаток таких ЛЭП – потери электроэнергии, связанные с перемагничиванием материала переменным током. ВТСП-ЛЭП на постоянном токе не имеют этого недостатка, но требуют электрических инверторов, преобразующих переменный ток в постоянный и наоборот. Показано, что при длине линии более 50 км эффективность ЛЭП на постоянном токе превосходит этот показатель для ЛЭП на переменном токе [3, 4]. Кроме того, ЛЭП на постоянном токе имеют меньшую стоимость, большую стойкость к току короткого замыкания, способность работать при сверхбольших напряжениях (до 800 кВ).

Одним из перспективных направлений электроэнергетики является создание работающих при температуре жидкого азота ВТСП-ЛЭП на постоянном токе. Для снижения утечек тепла и расхода жидкого азота через металлические проводники, находящиеся при комнатной температуре, для таких ВТСП предложено применять вводы из термоэлектрических (ТЭ) материалов [5]. Вставки из них работают как тепловые затворы, в которых используется эффект Пельтье, причем снижение утечек тепла через вакуумные контакты с применением ТЭ-вводов может достигать 20% [6].

Цель настоящей работы – расчет оптимальной конструкции ТЭ-вводов для обеспечения минимальной утечки тепла через вакуумные контакты

при работе ЛЭП на постоянном токе, в том числе таких вводов из субмикронных и нанопорошков сплавов теллурида висмута с повышенной добротностью.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТЭ-ВВОДОВ

ТЭ-ввод состоит из последовательно подсоединенных к находящемуся в жидком азоте при $T_0 = 77\text{K}$ ВТСП-кабелю медного проводника и ТЭ-элемента, внешняя сторона которого находится при температуре окружающей среды $T_h = 300\text{K}$. Для снижения потока тепла к такому кабелю через боковые поверхности медного проводника и ТЭ-элемента они помещаются в вакуум.

На рис.1 схематически представлена конструкция ТЭ-ввода в ВТСП-кабель.

*ФГУП "НИИВТ им. С.А.Векшинского" (Москва).



На рис.2 дана схема расчета распределения температуры вдоль ТЭ-ввода и типичное ее распределение вдоль проводников тока. Медный провод имеет длину L_1 и площадь сечения S_1 , а ТЭ-элемент – длину L_2 , площадь сечения S_2 и температуру T_x на границе раздела медный проводник-ТЭ-элемент. Нижняя кривая распределения температуры (см. рис.2б) относится к электрическому вводу с ТЭ-элементом, а верхняя – к распределению температуры без него. Уменьшение

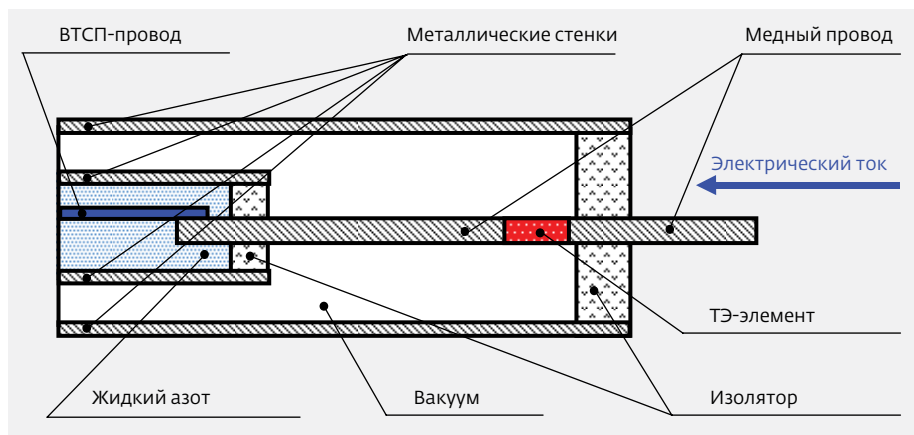


Рис.1. Схема токового ТЭ-ввода в ВТСП электрический кабель

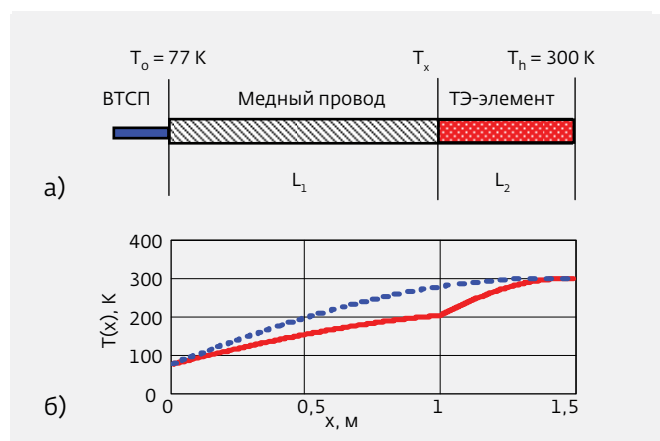


Рис.2. Схема расчета распределения температуры вдоль ТЭ-ввода (а); распределение температуры вдоль проводников электрического тока: нижняя кривая для ТЭ-ввода, верхняя кривая для медного провода без него (б)

T_x и потока тепла связано с его поглощением за счет эффекта Пельтье при прохождении электрического тока через стык медный проводник-ТЭ-элемент.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Поскольку боковые стороны проводников теплоизолированы, для нахождения распределения температуры и потока тепла по длине проводников можно использовать одномерную модель ТЭ-контакта. Тогда для расчетов применима система из двух уравнений диффузии (1), где $T_1(x)$ и $T_2(x)$ – распределение температуры в медном проводнике и ТЭ-элементе, соответственно. $T_1(x)$ определена на отрезке $0 < x < L_1$, а $T_2(x)$ – на отрезке $0 < x < L_2$.

$$S_1 \frac{d}{dx} \left(k_1 \frac{d}{dx} T_1(x) \right) + i^2 \frac{\rho_1}{S_1} = 0; S_2 \frac{d}{dx} \left(k_2 \frac{d}{dx} T_2(x) \right) + i^2 \frac{\rho_2}{S_2} = 0, \quad (1)$$

где k_1, ρ_1, k_2, ρ_2 – теплопроводность и удельное сопротивление медного проводника и материала ТЭ-элемента, соответственно. Материал ТЭ-элемента характеризуется также коэффициентом Зеебека α_2 .

Вышеперечисленные характеристики материалов являются функциями температуры. Поскольку теплопроводность изменяется в небольших пределах, ее можно считать постоянной и равной в рассматриваемом диапазоне температур средней величине, а удельное сопротивление и коэффициент Зеебека можно представить линейными функциями:

$$\rho_1(T) = \rho_{01} \left(\frac{T}{T_{p1}} - 1 \right); \rho_2(T) = \rho_{02} \left(\frac{T}{T_{p2}} - 1 \right) \alpha_2(T) = \alpha_{02} \left(1 + \frac{T}{T_{\alpha 2}} \right), \quad (2)$$

где $\rho_{01}, T_{p1}, \rho_{02}, T_{p2}, \alpha_{02}$ и $T_{\alpha 2}$ – константы для меди и сплавов теллурида висмута, соответственно [7, 8].

Потоки тепла в медном проводнике и ТЭ-элементе определяются формулами:

$$g_1(x) = -k_1 S_1 \frac{d}{dx} T_1(x); g_2(x) = -k_2 S_2 \frac{d}{dx} T_2(x). \quad (3)$$

Граничные условия для температуры описываются выражениями:

$$T_1(0) = T_0; T_2(L_2) = T_h; T_1(L_1) = T_2(0) = T_x; \quad (4)$$

$$g_1(L_1) - g_2(0) = i \alpha_0 / 1 + \frac{T_x}{T_a}, \quad (5)$$

где i – электрический ток, протекающий через ТЭ-контакт.

Условие (5) отражает тот факт, что разность потоков тепла через контакт медный проводник-ТЭ-элемент равна тепловой энергии, поглощаемой в области контакта за счет эффекта Пельтье.



При указанных предположениях можно найти точное аналитическое решение уравнения (1) для распределения температуры вдоль проводников в виде $T_1(x)$ и $T_2(x)$ [9].

Задачей расчетов является оптимизация размеров медного проводника и ТЭ-элемента для получения минимального теплового потока к ВТСП-проводнику $q_1(0)$ в точке $x = 0$.

Для электрического ввода из медного проводника без ТЭ-элемента распределение $T_{Cu}(x)$ может быть получено из решения уравнения (1) при граничных условиях $T_{Cu}(0) = T_0$ и $T_{Cu}(L_1) = T_h$, а также найдены оптимальные значения длины и поперечного сечения медного проводника, при которых поток тепла минимален q_{Cu_min} [9].

Для оценки преимущества ТЭ-ввода по сравнению с медным вводом можно ввести величину эффективности ТЭ-ввода η , определяющую относительное уменьшение потока тепла при наличии ТЭ-элемента по сравнению с потоком тепла для чисто медного ввода при заданной величине электрического тока:

$$\eta = \frac{g_{Cu_min} - g_1(0)}{g_{Cu_min}}. \quad (6)$$

Анализ (6) показывает, что η зависит от электрического тока и геометрических размеров элементов ТЭ-ввода и выражается через безразмерные параметры p_1 и p_2 , входящие в качестве аргументов функций \sin и \cos :

$$p_{1opt} = \frac{iL_1}{S_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{k_1 T_{p1}}}; \quad p_{2opt} = \frac{iL_2}{S_2} \sqrt{\frac{\rho_{n2}}{k_{n2} T_{pn2}}}. \quad (7) \quad (7)$$

Значения p_{1opt} и p_{2opt} , при которых достигается максимальная эффективность контакта, могут быть найдены графическими или численными методами [9].

Для оптимизации геометрических размеров медного проводника и традиционного ТЭ-элемента

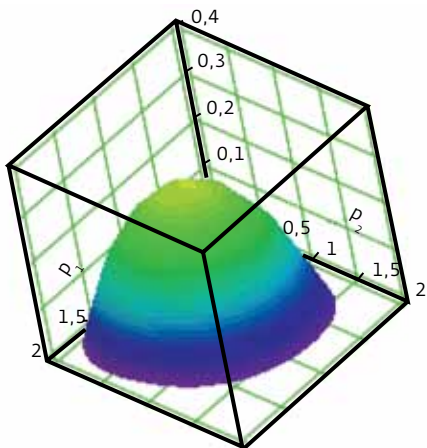


Рис.3. Зависимость эффективности ТЭ-вводов $\eta(p_1, p_2)$ от безразмерных параметров p_1 и p_2

использовались следующие данные: $\kappa_1 = 500$ Вт/м·К, $\rho_{01} = 0,345 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $T_{p1} = 50,1$ К [7], $\kappa_2 = 1,45$ Вт/м·К, $\rho_{02} = 0,224 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $T_{p2} = 55$ К, $\alpha_0 = 96,3 \cdot 10^{-6}$ В/К и $T_{\alpha 2} = 254$ К [8].

На рис.3 приведена зависимость эффективности ТЭ-вводов $\eta(p_1, p_2)$ от безразмерных параметров p_1 и p_2 . Из расчетов следует, что максимальное значение этой эффективности не зависит от электрического тока и достигает $\eta_{max}(p_{1opt}, p_{2opt}) = 0,305$ при оптимальных значениях $p_{1opt} = 1,05$ и $p_{2opt} = 0,87$.

Оптимальные значения длины медного проводника L_1 и ТЭ-элемента L_2 в зависимости от используемых материалов и площади поперечного сечения проводников S_1 и S_2 определяются формулами:

$$L_{1opt} = p_{1opt} \frac{S_1}{i} \sqrt{\frac{k_1 T_{p1}}{\rho}}, \quad L_{2opt} = p_{2opt} \frac{S_2}{i} \sqrt{\frac{k_2 T_{p2}}{\rho_{02}}}. \quad (8) \quad (8)$$

Площади поперечного сечения выбираются из условия, чтобы плотность электрического тока в них не превышала критических значений, а также ряда других требований к материалам и конструкции ТЭ-ввода. Так, например, для тока $i = 2500$ А могут быть выбраны площади поперечного сечения проводников: $S_1 = 4 \cdot 10^{-4}$ м², $S_2 = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м². В этом случае длины проводников $L_1 = 0,453$ м и $L_2 = 6,4$ мм. Минимальная тепловая мощность, подводимая к ВТСП-проводнику равна $q_{1min}(0) = 81,4$ Вт, а эффективность токового ввода $\eta_{max}(p_{1opt}, p_{2opt}) = 0,305$.

Для сравнения оптимизированный ввод из медного проводника без ТЭ-элемента для $i = 2500$ А имеет сечение $S_1 = 4 \cdot 10^{-4}$ м², длину $L_{Cu_opt} = 0,63$ м и $q_{Cu_min} = 115,2$ Вт.

На рис.4 представлено рассчитанное распределение температуры вдоль ТЭ-ввода (нижняя кривая) и электрического ввода без него (верхняя кривая) для оптимизированных размеров проводников при токе 2500 А.

Применение ТЭ-элементов из нано- и субмикронных порошков позволяет увеличить эффективность

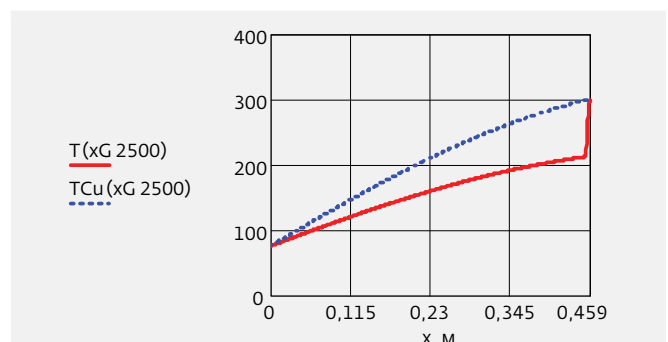


Рис.4. Распределение температуры вдоль ТЭ-ввода (нижняя кривая) и электрического ввода без ТЭ-элементов (верхняя кривая) для оптимизированных размеров проводников



Характеристики оптимизированных вакуумных вводов без ТЭ-элементов и с ними

Параметр	Медный ввод	Термоэлектрический ввод		
		Параметр	ТЭ-материал из нанопорошков	
		п- и р-типы	п-тип	р-тип
Коэффициент Зеебека, В/К	–	2,1·10 ⁻⁴	2,1·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻⁴
Удельное сопротивление, Ом·м	0,35·10 ⁻⁸	1·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁵	1,4·10 ⁻⁵
Теплопроводность, Вт/(м·К)	500	1,45	1,2	1,2
P_{1opt}, P_{2opt}	–	1,05; 0,87	0,98; 0,95	1,02; 0,94
Тепловой поток для $i = 2500$ А, Вт	115,2	80,1	73,9	73,2
Максимальная эффективность $\eta_{max}, \%$	–	30,5	35,9	36,4

ТЭ-вводов. В таблице приведены рассчитанные характеристики оптимизированных вакуумных токовых вводов без и с ТЭ-элементами, изготовленными по традиционной и новой технологиям (с применением нано- и субмикронных порошков сплавов теллурида висмута). В расчетах использовались характеристики материалов, представленные в работе [10].

Расчеты показывают, что при оптимизированных размерах проводников минимальный приток тепла в токовом вводе с ТЭ-элементами, изготовленными по традиционной технологии, на 30,5% меньше минимального притока тепла в чисто медном вводе. Применение элементов из нанопорошков сплавов теллурида висмута позволяет снизить приток тепла на 35,9 и 36,4% для ТЭ-элементов п- и р-типов проводимости, соответственно.

В настоящей работе получены аналитические выражения для распределения температуры вдоль проводников ТЭ токового ввода с учетом температурных зависимостей удельного электрического сопротивления и коэффициента Зеебека исходных материалов. Эти выражения позволяют рассчитывать и оптимизировать основные характеристики токовых вводов в ВТСП-проводник.

Показано, что максимальная эффективность ТЭ токовых вводов не зависит от величины тока. При оптимизированных размерах проводников минимальный приток тепла в токовом вводе с ТЭ-элементом, изготовленным по традиционной технологии, на 30,5% ниже минимального притока тепла при использовании чисто медного электрического ввода. Применение ТЭ-элементов из нанопорошков сплавов теллурида висмута позволяет снизить приток тепла на 35,9 и 36,4% для ТЭ-элементов п- и р-типов проводимости, соответственно. Максимальная эффективность ТЭ-вводов может превышать 30%, что на 10% выше величины, экспериментально достигнутой в работе [6].

Литература

1. **U.Sinha, R.L.Hughey et al.** Design and construction of Ln2-cooled prototype superconducting transmission cable. – IEEE Trans. Applied Supercond., 1997, v.7, p.351-354.
2. **A.Kimura and K.Yasuda** R&D of superconductive cable in Japan. – IEEE Trans. Applied Superconductivity, June 2005, v.15, №2, p.188-1822.
3. **R.Arnold.** Solutions to the power quality problem. – Power Engineering Journal, April 2001, p.65-73.
4. **Xiao-Ping Zhang.** Multiterminal voltage-sourced converter-based HVDC models for power flow analysis. – IEEE Trans. Power System., 2004, v.19, p.1877-1884.
5. **S.Yamoguchi, T.Yamoguchi, K.Nakamura, Y.Hasegava, H.Okumura, K.Sato.** Peltier current lead experiment and their applications for superconducting magnets. – Rev. Sci. Instrum., 2004, v.75, p.207-212.
6. **S.Yamaguchi, M.Hamabe, A.Sasaki et al.** A Proposal for DC Superconducting Power Transmission Line, 1LB07. [http://www.w2agz.com, Library/Superconductivity/Cable](http://www.w2agz.com/Library/Superconductivity/Cable)
7. Физика низких температур: dic.academic.ru/dic.nsf/enc_colier/6603/ФИЗИКА
8. **R.J.Buist.** Utilizing Qs and Qc model TE materials for predicting temperature dependence, Seventeenth International Conference on Thermoelectrics, Proceedings ICT 98, May 24028, 1998, p.69-75.
9. **Абрютин В.Н., Нестеров С.Б., Романько В.А.** Термоэлектрические токовые вводы для сверхпроводящих линий передачи электроэнергии на постоянном токе. Материалы XIX научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника". / Под ред. д.т.н., проф. Д.В.Быкова. – М.: МИЭМ, 2012, с.287-291.
10. **Абрютин В.Н., Нестеров С.Б., Романько В.А.** Перспективы создания высокоэффективных термоэлектрических материалов из нанопорошков. – М.: НОБЕЛЛА, 2010.



THE EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC CURRENT INPUTS FROM SUBMICRON POWDERS OF BISMUTH TELLURIDE ALLOYS FOR HTS- PTL*

S.Nesterov, DS, V.Romanko, PhD, A.Holopkin, PhD / holopkinai@mail.ru

Promising application of the high-temperature superconducting conductors (HTS) is their use in the power transmission lines (PTL). Over the last ten years a number of investigations were carried out to assess the feasibility of creating HTS-PTL power lines on AC [1, 2]. The main drawback of such power lines is power losses connected with the reversal of the material with AC. HTS – PTL on DC do not have this drawback, but they require electrical inverters which convert AC to DC and vice versa. It is shown that at the length more than 50 km the efficiency of PTL on DC exceeds this figure for PTL on AC [3, 4]. In addition, PTL on DC have a lower cost, greater resistance to short-circuit, the ability to operate at very large voltages (up to 800 kV).

One of the promising areas of the electrical energy industry is creation of HTS-PTL working on liquid nitrogen and DC. To reduce heat losses and consumption of liquid nitrogen through the metal conductors at room temperature, it is proposed to apply for such HTS inputs from thermoelectric (TE) materials [5]. The insert made from them work as thermal valves that use the Peltier effect, and here reducing heat losses through the vacuum contacts using TE-inputs can achieve 20% [6].

The purpose of this paper is to calculate the optimal design of the TE-inputs to insure minimum heat loss through the vacuum contacts when working with PTL on DC, including such inputs from submicron of bismuth telluride alloys and nanoalloys with a high quality factor. [9].

MODEL FOR CALCULATING THE TE-INPUTS OPTIMAL DESIGN

The TE-input consists of a sequentially connected HTS-copper conductor cable and FC-element which are in liquid nitrogen at $T_0 = 77\text{K}$. The outer side of the TE-element is at ambient temperature of $T_h = 300\text{K}$. In order to reduce the flow of heat to this cable through the side surfaces of the copper conductor and TE-element they are vacuum-enclosed.

Fig.1 schematically shows the structure of the TE-input and the HTS.

HTS-wire Metal walls Copper wire
Electric current
TE-element
Liquid nitrogen Vacuum Insulator

Fig.1. Current input TE diagram in HTS power cable.

Fig.2 is a diagram of the calculation of temperature distribution along the TE-input and its typical distribution along the current-carrying conductors. The copper wire has a length L_1 and cross-section of S_1 . The TE - element has length L_2 , cross-sectional area S_2 and temperature T_x at the interface between the copper conductor - TE-element. The lower curve of the temperature distribution (fig.2b) relates to an electrical input with TE - element, and the top one - to the distribution of temperature without it. The decrease of T_x and of the flow of heat is connected with its absorption by the Peltier effect during the current passage through the joint of the copper wire - TE -element.

Fig.2. Diagram for calculating the temperature distribution along the TE-input - (a), the temperature distribution along the conductors of electric current: the lower curve is for the TE-input, the upper curve is for the copper wire without it - (b)

HTS Copper wire TE-element

CALCULATION RESULTS

Since the lateral sides of the conductors are insulated from heat, to detect temperature distribution and the heat flux along the

length of the conductors one can use a one-dimensional model of the TE-contact. Then for calculations one can use the system of the two diffusion equations (1), where $T_{1(x)}$ and $T_{2(x)}$ are the temperature distribution in copper conductor and TE-cell, respectively. $T_{1(x)}$ is determined on the line $0 < x < L_1$, and $T_{2(x)}$ on the line $0 < x < L_2$.

$$S_1 \frac{d}{dx} \left(\kappa_1 \frac{d}{dx} T_1(x) \right) + i^2 \frac{\rho_1}{S_1} = 0; S_2 \frac{d}{dx} \left(\kappa_2 \frac{d}{dx} T_2(x) \right) + i^2 \frac{\rho_2}{S_2} = 0, \quad (1)$$

where κ_1 , ρ_1 and κ_2 , ρ_2 are thermal conductivity and electric resistivity of the copper wire and the TE-material element, respectively. The TE - element material is also characterized by Seebeck coefficient α_2 .

The above characteristics of the materials are temperature functions. Since the thermal conductivity varies within small limits, it can be considered constant and equal to the average value in this temperature range, and specific resistance and Seebeck coefficient can be represented by linear functions:

$$\rho_1(T) = \rho_{01} \left(\frac{T}{T_{p1}} - 1 \right); \rho_2(T) = \rho_{02} \left(\frac{T}{T_{p2}} - 1 \right); \alpha_2(T) = \alpha_{02} \left(1 + \frac{T}{T_{a2}} \right), \quad (2)$$

where ρ_{01} , T_{p1} , ρ_{02} , T_{p2} , α_{02} and T_{a2} are constants for copper and alloys of bismuth telluride, respectively [7, 8].

The heat fluxes in the copper conductor and in the TE - element are determined by:

$$g_1(x) = -\kappa_1 S_1 \frac{d}{dx} T_1(x); g_2(x) = -\kappa_2 S_2 \frac{d}{dx} T_2(x). \quad (3)$$

The boundary conditions for the temperature are described by:

$$T_1(0) = T_0; T_2(L_2) = T_h; T_1(L_1) = T_2(0) = T_x; \quad (4)$$

$$g_1(L_1) - g_2(0) = i \alpha_0 / 1 + \frac{T_x}{T_a}, \quad (5)$$

where i - is an electric current flowing through the TE-contact.

Condition (5) reflects the fact that the difference in the heat flux through the contact copper conductor - TE - element is equal to the heat energy absorbed in the contact area due to the Peltier effect.

Under these assumptions it is possible to find an exact analytical solution of equation (1) for the temperature distribution along conductors in the form of $T_{1(x)}$ and $T_{2(x)}$ [9]. The purpose of the calculations is to optimize the sizes of the copper conductor and TE - element to obtain the minimum heat flux to the HTS conductor $q_1(0)$ at $x = 0$.

For the electrical input from copper conductor without TE-element the distribution of $T_{cu}(x)$ can be obtained from the solution of equation (1) under the boundary conditions $T_{cu}(0) = T_0$ and $T_{cu}(L_1) = T_h$, and as well as the optimal values of the length and the cross- section of the copper wire, at which the heat flow is minimum q_{cu_min} . [9]

*FSUE S.Vekshinsky Research Institute (Moscow).



The features of the optimized vacuum inputs without TE-elements and with these elements

Parameter	Copper input	Thermo-electrical input		
		Traditional TE - material	TE-material made of the nanopowders	
		n- and p-types	n-type	p-type
Seebeck coefficient, B/K	–	2,1·10 ⁻⁴	2,1·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻⁴
Specific resistance, Ohm·m	0,35·10 ⁻⁸	1·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁵	1,4·10 ⁻⁵
Thermal conductivity, W/m·K	500	1,45	1,2	1,2
P _{1opt} , P _{2opt}	–	1,05; 0,87	0,98; 0,95	1,02; 0,94
Heat flow for i = 2500 A, W	115,2	80,1	73,9	73,2
Maximum efficiency η _{max} , %	–	30,5	35,9	36,4

To assess the advantages of the TE - inputs as compared with the copper input it can help to enter the value of the TE-input η efficiency, which determines the relative decrease of the heat flux in the presence of the TE - element as compared to the heat flux for the pure copper input at the preset value of the electric current:

$$\eta = \frac{g_{Cu_min} - g_1(0)}{g_{Cu_min}} \quad (6).$$

Analysis of (6) shows that η depends on the electric current and the geometric dimensions of the elements of the TE - input and is expressed through the dimensionless parameters p₁ and p₂ as arguments of the functions sin and cos:

$$p_{1opt} = \frac{iL_1}{S_1} \sqrt{\frac{\rho_1}{k_1 T_{p1}}}; p_{2opt} = \frac{iL_2}{S_2} \sqrt{\frac{\rho_{n2}}{k_{n2} T_{pn2}}} \quad (7).$$

The values p_{1opt} and p_{2opt} at which it is possible to obtain the maximum efficiency of the contact can be found by graphic or numerical methods only [9]. To optimize the geometrical dimensions of the copper conductor and the traditional TE-element the following data can be used: κ₁ = 500W/mK, ρ₀₁ = 0.345·10⁻⁸ Ohm m, T_{p1} = 50.1 K [7], κ₂ = 1.45 W/mK, ρ₀₂ = 0.224 10⁻⁵ ohm m, T_{p2} = 55 K, α₀ = 96.3 10⁻⁶V/K and T₀₂ = 254 K [8].

Fig.3. Dependency of the efficiency of the TE-inputs η (p₁, p₂) on the dimensionless parameters p₁ and p₂.

Fig.3 shows the dependence of the efficiency of TE-inputs η (p₁, p₂) on the dimensionless parameters p₁ and p₂. From the calculations it follows that the maximum value of this efficiency does not depend on the electric current and reaches η_{max} (p_{1opt}, p_{2opt}) = 0.305 at the optimum values of p_{1opt} = 1.05 and p_{2opt} = 0.87. Depending on the materials to be used and the cross sectional area of the conductors S₁ and S₂ the optimum values for the length of the copper conductor L₁ and TE - element L₂ are determined by

$$L_{1opt} = p_{1opt} \frac{S_1}{i} \sqrt{\frac{k_1 T_{p1}}{\rho_1}}; L_{2opt} = p_{2opt} \frac{S_2}{i} \sqrt{\frac{k_2 T_{p2}}{\rho_{02}}} \quad (8).$$

The cross-sectional areas are selected under the condition that the current density in them does not exceed the critical values, as well as other requirements to the materials and design of the TE-input. So, for example, for the current i = 2500 A it can be the cross-sectional areas of the conductors: S₁ = 4 10⁻⁴ m², S₂ = 2.8 10⁻³ m². In this case the lengths of the conductors L₁ = 0.453 m and L₂ = 6.4 mm. The minimum thermal power supplied to the HTS conductor is q_{lmin} (0) = 81.4 W, and the effectiveness of the current input η_{max} (p_{1opt}, p_{2opt}) = 0.305.

For comparison, the optimized input from the copper conductor without TE-element for i = 2500 A has the section S₁ = 4 10⁻⁴ m², length L_{Cu_opt} = 0.63 m and q_{Cu_min} = 115.2 W.

Fig.4 shows the calculated temperature distribution along the TE-input (lower curve) and of the electrical input without it (upper curve) for the optimized sizes of conductors at a current of 2500 A.

Fig.4. Temperature distribution along the TE-input (lower curve) and electrical input without TE - elements (upper curve) for the optimized sizes of the conductors.

The use of the TE - elements from nanopowders and submicron powders makes it possible to increase the efficiency of the TE-inputs. The table shows the calculated characteristics of the optimized vacuum current inputs with and without TE-elements optimized vacuum current inputs with and without TE-elements made with traditional and new technologies (using nanopowders and submicron powders of bismuth telluride alloys). In the calculations characteristics of the materials presented in [10] were used.

The calculations show that at the optimal sizes of the conductors the minimum heat inflow in the current input from the TE-elements made by the traditional technology is 30.5% less than the minimum heat inflow in the pure copper input. The use of elements of nanopowders of bismuth telluride nanoalloys can reduce the heat inflow by 35.9% and 36.4% for TE-element of n- and p-type conductivity, respectively.

This paper presents the analytical expressions for the temperature distribution along the conductors of the TE - current input taking into account the temperature dependences of the electrical resistivity and Seebeck coefficient of the initial materials. These expressions will allow to calculate and optimize the key characteristics of the current inputs into the HTS-conductor.

It is shown that the maximum efficiency of TE-current inputs is independent of the current level. At the sizes the conductors optimized the minimum heat inflow in the current input with a TE-element made by the traditional technology is 30.5% below the minimum heat inflow when using the pure copper electrical input. The use of the TE-elements made of nanopowders of bismuth telluride alloys can reduce the heat inflow by 35.9% and 36.4% for TE-elements and n- and p-type of conductivity, respectively. The maximum efficiency of TE-inputs can not exceed 30% which is 10% higher than the value achieved in the experiments [6].

Literature