

Оптимизация температурного режима составного токоввода на основе ВТСП-материалов для СП-магнитов ускорителей

В.И.Деев, А.Б.Круглов, К.В.Куценко, А.А.Лаврухин, И.Г.Меринов, В.С.Харитонов
*Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), Россия*
В.С. Круглов
Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва

Известно, что применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в конструкциях сильноточных токовводов для СП-магнитов позволяет сократить теплоприток к жидкому гелию, уменьшить его испарение и, как следствие, снизить энергозатраты на работу токоввода. В таких составных токовводах нижняя ВТСП часть работает в температурном интервале 77-4.2 К и находится в СП-состоянии. Поскольку критический ток сверхпроводников возрастает с понижением температуры, то можно дополнительно снизить теплоприток по составному токовводу, уменьшая сечение ВТСП части токоввода по длине.

В данном докладе представлены результаты вариантных расчетов температурных режимов составных токовводов на основе ВТСП лент, выполненных с целью определения условий, при которых теплоприток к жидкому гелию минимален. Также обсуждается проблема стабильности режимов теплоотдачи на поверхности ВТСП материалов.

1. Оптимизация сечения ВТСП части составного токоввода

В расчетах моделировалась только нижняя ВТСП часть составного токоввода на основе ВТСП лент с оболочкой из серебра и сплавов $Ag+1\%Au$, $Ag+11\%Au$. Поперечное сечение ленты составляло 0.15×3 мм², и коэффициент заполнения по ВТСП равнялся 0.5. Для моделирования использовалась разработанная ранее программа [1], позволяющая совместно решать уравнения теплопроводности для материалов токоввода и уравнения энергии для потоков хладагента. На нижнем и верхнем торцах токоввода задавались граничные условия первого рода: $T_H = 4.2$ К, $T_B = 77$ К. Значения теплофизических параметров серебра и его сплавов были взяты из работы [2].

Были рассмотрены четыре варианта конструкции токоввода. Во всех вариантах длина ВТСП части принималась равной 0.5 м.

В первом варианте конструкции низкотемпературная часть токоввода состоит из десяти ВТСП лент и имеет постоянное по длине поперечное сечение.

Во втором варианте конструкции токоввод также состоит из десяти ВТСП лент, но они имеют разную длину и спаяны между собой. Предполагалось, что толщина слоя припоя пренебрежимо мала. В этом варианте площадь поперечного сечения токоввода изменяется по длине ступенчато, уменьшаясь через каждые 5 см на 10%.

Третий вариант конструкции отличается от второго тем, что площадь поперечного сечения на нижнем участке токоввода в два раза больше, то есть равна удвоенному значению площади сечения ВТСП ленты.

В четвертом – оптимальном варианте конструкции – поперечное сечение по длине токоввода изменяется таким образом, что в каждом сечении плотность тока равна критической плотности тока при значении температуры в данном сечении.

Были выполнены две серии расчетов. В первой серии предполагалось, что теплообмен на поверхности токоввода отсутствует. Во второй рассматривался самоохлаждаемый токоввод, то есть охлаждаемый потоком пара гелия, испаряющегося вследствие теплопритока. Следует отметить, что в расчетах вариантов 2-4 не учитывалось дополнительное энерговыделение, обусловленное перетечками тока по сечению токоввода.

Результаты расчетов показаны на рис. 1-3. На рис.1 представлено изменение температуры по длине токоввода для различных вариантов его конструкции. На рис. 2 показан характер изменения площади сечения по длине токоввода для 4-го варианта конструкции. На рис. 3 приведено изменение по длине токоввода отношения значения критического тока в данном сечении к критическому току в сечении вблизи верхнего торца токоввода. Этот рисунок демонстрирует, как изменяется запас по токонесущей способности токоввода по его длине для различных вариантов конструкции.

Следует отметить, что вид кривых, приведенных на рис. 1-3, в значительной мере определяется температурными зависимостями коэффициента теплопроводности и удельного электросопротивления материалов оболочки и припоя, а также интенсивностью теплоотдачи на поверхности токоввода.

В табл. 1 представлены данные по теплопритоку к холодному концу токоввода.

Таблица 1

Теплоприток к холодному концу токоввода, Вт.

Вариант	Материал	Ag	Ag+1% Au	Ag+11% Au
1 (без охлаждения)		1.04	0.056	0.0074
2 (без охлаждения)		0.35	0.018	0.0023
3 (без охлаждения)		0.42	0.022	0.0029
4 (без охлаждения)		0.18	0.018	0.0024
4 (с охлаждением)				0.00016

2. Анализ устойчивости температурного режима ВТСП части токоввода

Оценки показывают, что при высоких значениях транспортных токов в месте контакта медной и ВТСП частей токоввода могут быть существенные тепловыделения. Так, при токе 10 кА и удельном сопротивлении контакта 10^{-7} Ом/см² плотность теплового потока на поверхности ВТСП вблизи контакта может составить около 10^5 Вт/м².

Чтобы определить условия поддержания рабочих температурных режимов ВТСП токовводов при таких тепловых нагрузках, были выполнены эксперименты по изучению характеристик теплообмена на поверхности модельных ВТСП токовводов цилиндрической формы, охлаждаемых жидким азотом [3]. В экспериментах было установлено, что существует интервал транспортных токов (границы которого зависят от вида температурной зависимости удельного электросопротивления ВТСП и интенсивности охлаждения), при которых наблюдаются периодические всплески температуры сверхпроводника. Как показал анализ экспериментальных данных, в этих условиях любая флуктуация температуры приводит к возрастанию температуры ВТСП вплоть до момента закипания жидкого азота.

При закипании происходит интенсификация теплоотдачи и температура ВТСП быстро уменьшается, что приводит к снижению удельного электросопротивления и джоулева тепловыделения до тех пор, пока новое температурное возмущение не вызовет повторения описанного процесса.

Отмеченные в экспериментах явления требуют дополнительного исследования на образцах ВТСП токовводов с целью выбора способа охлаждения места контакта медной и ВТСП частей токоввода и обеспечения устойчивых температурных режимов работы составных токовводов.

Литература

1. Меринов И.Г., Харитонов В.С., Зинченко С.И. Расчетное исследование характеристик силового токоввода сверхпроводящих магнитов УНК. Труды 14-го совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994, т.4, с. 282-285.
2. Fujishiro H., et al. Thermal and electrical properties of Ag-Au and Ag-Cu alloy tapes for metal stabilizers of oxide superconductors. Cryogenics, 1993, Vol. 33, No 11, pp. 1086-1090.
3. Deev V.I. et al. Heat transfer from a surface of a HTSC-sample in liquid nitrogen. Proc. 4th Word Conf. on Experimental Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics (ExHFT 4), Brussels, June 2-6 1997, Edizioni ETS, Vol. 1, 1997, pp. 1343-1347.

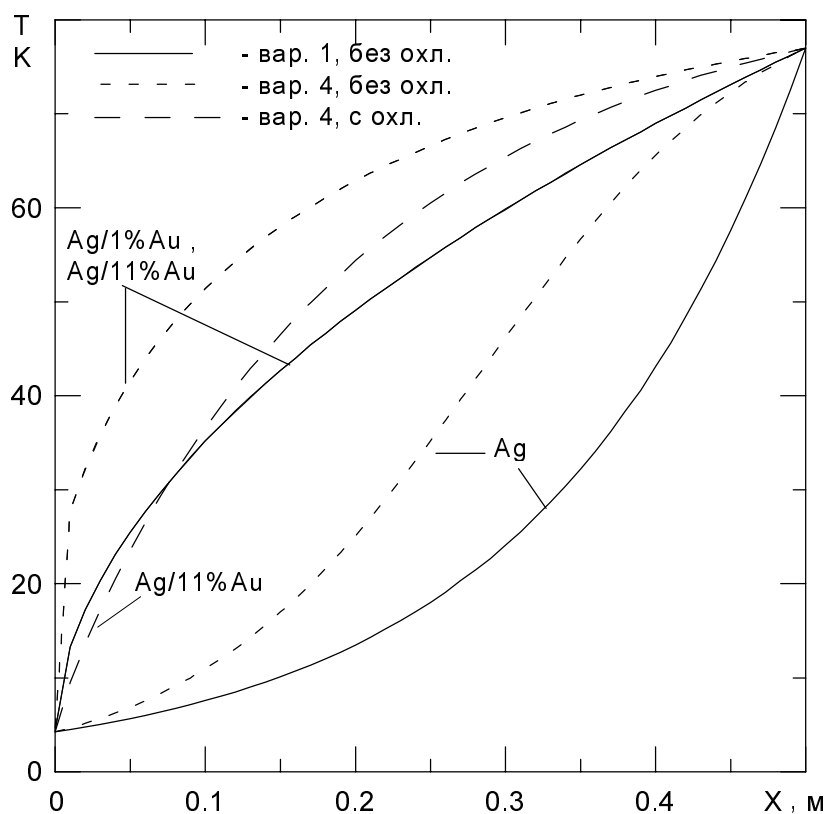


Рис.1. Изменение температуры по длине токоввода.

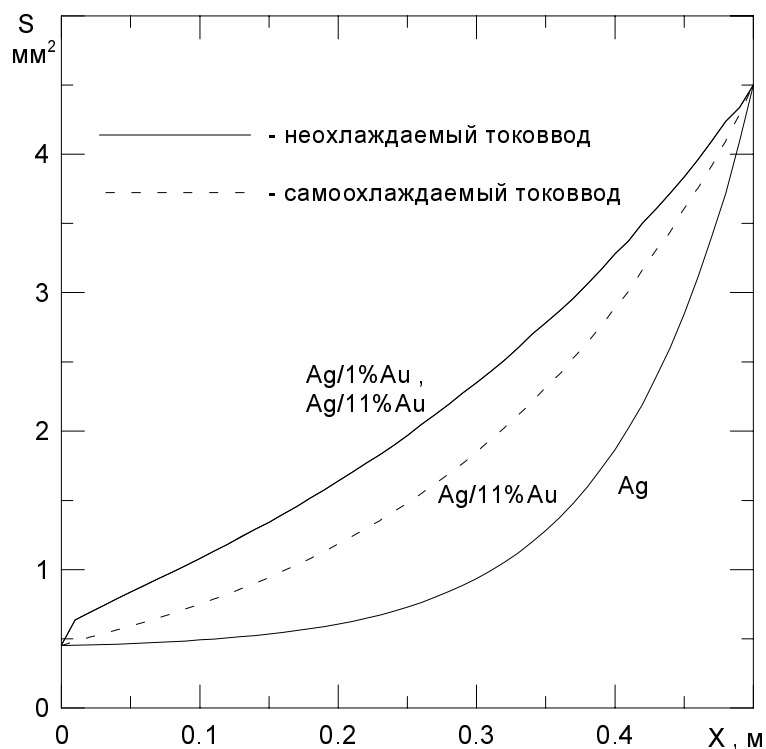


Рис.2. Изменение сечения по длине токоввода для 4-го варианта конструкции.

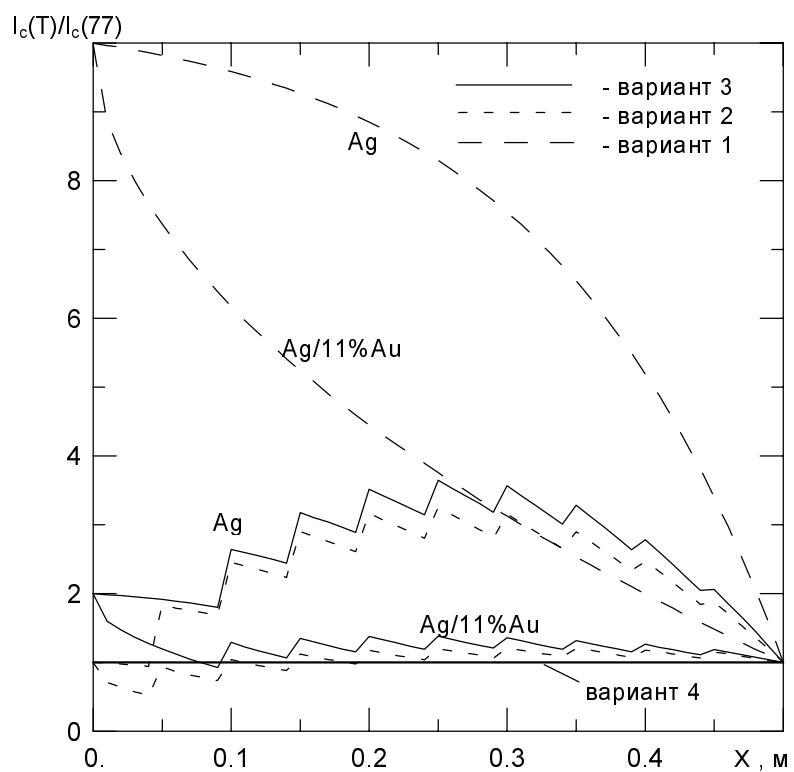


Рис.3. Изменение критического тока по длине токоввода для различных вариантов конструкции.