

УДК 621.59

Токоввод, охлаждаемый парами азота

Саламахин В.И., Иванов В.И.

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Рассматривается конструкция токоввода для сверхпроводящего ограничителя аварийных токов. Применение высокотемпературных сверхпроводников позволяет использовать жидкий азот для охлаждения сверхпроводника и токовводов. Обоснован выбор алюминия в качестве материала токонесущего элемента токоввода. Найдены оптимальные соотношения площади поперечного сечения и длины токоввода, обеспечивающие минимальный теплоприток к криоагенту. Выполнен расчетный анализ тепловых процессов в токовводе. Показана высокая эффективность использования холода отходящих паров в рассматриваемой конструкции токоввода.

Ключевые слова: токоввод, сверхпроводник, теплоприток, криоагент, теплопроводность, электросопротивление.

Cooled by nitrogen vapors current lead

Salamakhin V.I., Ivanov V.I.

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The design of a current lead for the superconducting limiter of emergency currents is considered. Application of high-temperature superconductors allows using liquid nitrogen for cooling of a superconductor and current leads. The choice of aluminum as a material of a current-carrying element of a current lead is reasonable. The optimum ratio of cross sectional area to current lead length providing the minimum heat gain to the refrigerating medium are found. The settlement analysis of thermal processes in a current lead is made. High efficiency of using the departing vapors cold in the considered design of a current lead is shown.

Keywords: current lead, superconductor, heat gain, refrigerating medium, thermal conductivity, resistance.

Защита электрооборудования от токов короткого замыкания всегда являлась актуальной задачей. Именно поэтому на протяжении всей истории развития электроэнергетики предлагались различные решения этой задачи. В последние годы интенсивно ведутся работы по созданию и внедрению сверхпроводниковых ограничителей тока [1]. Как в любом электрооборудовании с использованием сверхпроводников, одной из проблем является разработка эффективных токовводов [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Эти устройства соединяют источник тока, находящийся при комнатной температуре, со сверхпроводящим элементом, который погружен в криостат с жидким гелием. Поскольку приток теплоты к криоагенту происходит в основном по токовводам, то их эффективность определяет расходы на эксплуатацию сверхпроводящего изделия, которые выражаются в стоимости жидкого гелия, либо в мощности рефрижераторной установки.

Главной задачей при разработке токовводов является снижение теплопритока к криоагенту при заданной величине силы тока. Тепловой поток по токовводам имеет две составляющие. Первая обусловлена теплопроводностью самих токовводов, а вторая омическим тепловыделением в них. Если

учесть, что сила тока в ограничителях может достигать нескольких тысяч ампер, то компенсация тепловыделения за счет испарения жидкого гелия делает систему весьма дорогостоящей, громоздкой и сложной в эксплуатации.

Открытие высокотемпературных сверхпроводников [8] коренным образом изменило положение. Вместо жидкого гелия для охлаждения можно использовать даже дешевый криоагент – жидкий азот, что существенно упрощает конструкцию ограничителя тока и уменьшает его габариты. Однако и в этом случае остается требование к тоководам: их теплопроводность и электросопротивление должны быть минимальными.

Между теплопроводностью λ и электросопротивлением ρ материалов согласно закону Видемана-Франца существует зависимость

$$\frac{\lambda\rho}{T} = L_0, \quad (1)$$

где $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом/К² – постоянная Лоренца; T – абсолютная температура, К.

Исходя из закона Видемана-Франца, следует, что материал тоководов не имеет существенного значения, а снижение теплопритока к криоагенту по тоководам может быть достигнуто лишь удачной конструкцией последних. Реально же для большинства технических металлов и сплавов наблюдается некоторое отклонение от закона Видемана-Франца. Например, при температуре $T = 200$ К медь М-3 и алюминий АД-1 имеют следующие характеристики [9]:

$$\begin{aligned} \text{Медь М-3:} \quad & \lambda = 405 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad \rho = 1,03 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad \frac{\lambda\rho}{T} = 2,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}^2}, \\ \text{Алюминий АД-1:} \quad & \lambda = 208 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad \rho = 1,69 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad \frac{\lambda\rho}{T} = 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}^2}. \end{aligned}$$

Поскольку алюминий в большей мере отклоняется от закона Видемана-Франца и имеет параметр $\lambda\rho/T$ меньше чем у меди, то он может оказаться более предпочтительным материалом для тоководов, обеспечивая меньший теплоприток по ним.

Как указывалось выше, теплота подводится к криоагенту из окружающей среды вследствие теплопроводности токовода Q_λ и омическая теплота Q_R генерируется в самом токовводе, поэтому

$$Q = Q_\lambda + Q_R = \lambda \frac{F}{L} (T_T - T_x) + I^2 \rho \frac{L}{F} \quad (2)$$

где λ – теплопроводность материала токовода; F и L – площадь поперечного сечения и длина токовода; T_T и T_x – температура на теплом и холодном конце токовода; I – сила тока; ρ – удельное сопротивление материала токовода.

В обе составляющие теплового потока Q входят величины F и L , причем они оказывают разнонаправленное влияние. Увеличение площади поперечного сечения токовода ведет к росту Q_λ и к снижению Q_R . Напротив, увеличение L ведет к снижению Q_λ и росту Q_R . Очевидно, суммарный тепловой поток Q будет минимальным, когда Q_λ и Q_R равны по величине. Это видно из рисунка 1, на котором показано влияние на поток тепла Q площади поперечного сечения токовода из алюминия при различных значениях его длины. Во всех случаях наблюдается одинаковое минимальное значение Q . Причем каждому минимуму соответствует такая комбинация F и L , при которой $Q_\lambda = Q_R$. Вычисления выполнялись для $I = 10000$ А, $T_T = 300$ К, $T_x = 80$ К. Теплопроводность λ и удельное сопротивление ρ

находились для средней температуры $T_{cp} = 190$ К и считались постоянными, что допустимо для предварительного расчета.

Очень важным при проектировании токовводов является более полное использование всего потенциала холода криоагента, т.е. всей разности энтальпий от состояния насыщенной жидкости до состояния газа при температуре окружающей среды. Поэтому токоввод должен представлять собой эффективный теплообменник, в котором выходящий поток пара снимает значительную долю теплового потока Q . Для азота эта доля может составлять примерно 50 %. Чтобы максимально приблизиться к теоретической эффективности теплосъема, необходимо обеспечить в токовводе хороший теплообмен между токнесущими элементами и отходящим паром азота. Достичь этого можно за счет развитой поверхности теплообмена и турбулизации потока пара.

Тепловой баланс рассматриваемой системы

$$\lambda \frac{F}{L} T_T - T_x + I^2 \rho \frac{L}{F} + Q_0 = m [r + c_p T_T' - T_x'] \quad (3)$$

позволяет определить интенсивность испарения жидкого азота

$$m = \frac{\lambda \frac{F}{L} T_T - T_x + I^2 \rho \frac{L}{F} + Q_0}{r + c_p T_T' - T_x'} \quad (4)$$

где Q_0 – теплоприток из окружающей среды по конструктивным элементам криостата; m – интенсивность испарения жидкого азота; c_p – теплоемкость газообразного азота; T_T' , T_x' – температура азота на входе и на выходе из токоввода; r – теплота испарения азота.

Как следует из рисунка 1, минимальный тепловой поток по токовводу из алюминия составляет $Q = 556,3$ Вт при площади поперечного сечения проводника $F = 24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и длине $L = 0,4$ м. Интенсивность испарения жидкого азота (уравнение 4) достигает $m = 0,00137$ кг/с.

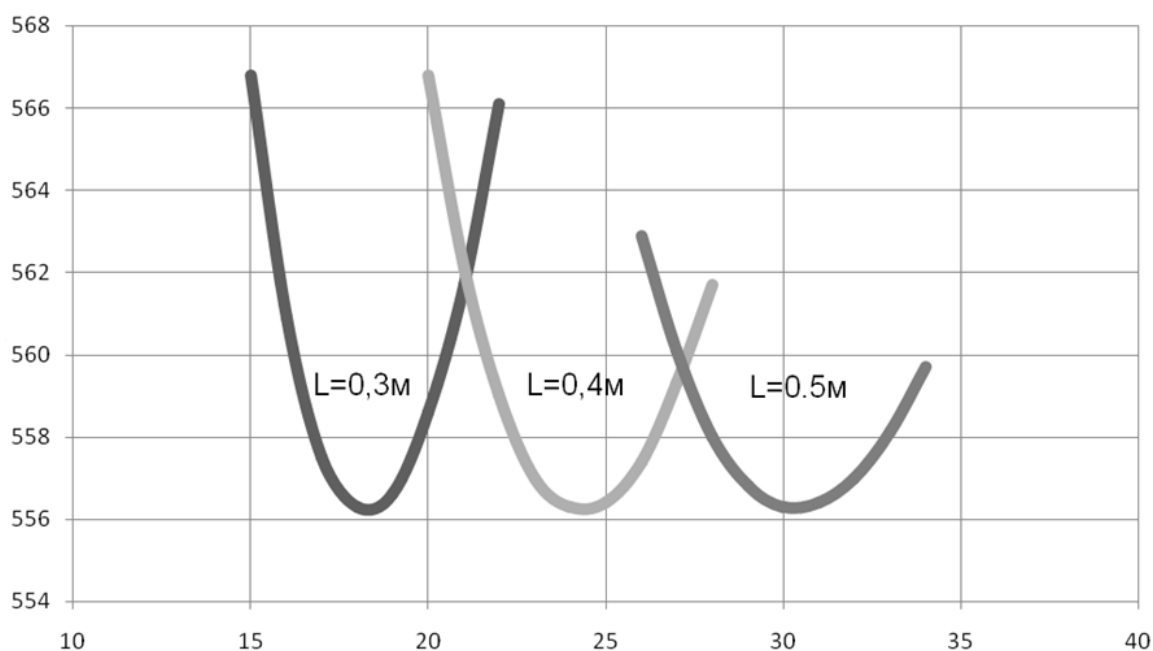


Рис.1. Зависимость теплового потока от площади поперечного сечения токоввода при различной его длине

Предлагается реализовать токоввод в виде плотного пучка, скрученных попарно алюминиевых проволок диаметром 1мм, помещенных в тонкостенную трубу из нержавеющей стали.

Пары азота выходят из криостата по множеству канальцев между скрутками проволок, воспринимая теплоту от них. Площадь поверхности теплосъема составляет $A = 3,84 \text{ м}^2$. Удельная площадь сечения свободного объема для такой конструкции, а общая площадь поперечного сечения токоввода

$$F_{\text{тв}} = \frac{F}{1 - f_{\text{уд}}} = 48,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (5)$$

Средняя площадь сечения свободного объема

$$F_{\text{св}} = F_{\text{тв}} - F = 24,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (6)$$

Скорость потока азота в каналах токоввода

$$w = \frac{m}{\rho \cdot F_{\text{св}}} = 0,245 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (7)$$

где ρ – плотность азота при средней температуре $T_{\text{ср}} = 150 \text{ К}$.

Эквивалентный диаметр каналов в токовводе определяется по формуле

$$d_3 = \frac{4F_{\text{св}}}{A_0} = 10,29 \cdot 10^{-4} \text{ м}, \quad (8)$$

где A_0 – площадь поверхности теплосъема на 1 м длины токоввода.

Критерий Рейнольдса для потока азота в каналах токоввода

$$\text{Re} = \frac{\rho w d_3}{\mu} = 100,4. \quad (9)$$

Поскольку режим течения азота – ламинарный, то критерий Нуссельта зависит от комплекса $\text{Re} \frac{d_3}{L}$ [9], который в данном случае равен 0,047.

Так как при $\text{Re} \frac{d_3}{L} \leq 12$ наступает тепловая стабилизация потока, и критерий Nu принимает постоянное значение 3,66, то коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = 3,66 \frac{\lambda}{d_3} = 52 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}. \quad (10)$$

При разности температур между поверхностью и потоком на входе в токоввод $\Delta T_x = 3 \text{ К}$, а на выходе $\Delta T_T = 10 \text{ К}$ получим среднюю разность температур $\Delta T_{\text{ср}} = 5,8 \text{ К}$. Достаточная площадь поверхности теплообмена

$$A'_0 = \frac{mc_p (T'_T - T'_X)}{\alpha \Delta T_{cp}} = 1,01 \text{ м}^2. \quad (11)$$

Реальная конструкция токоввода имеет площадь теплообмена $A = 3,84 \text{ м}^2$, что значительно превышает найденную выше достаточную площадь. Следовательно, средняя разность температур будет меньше 5,8 К и эффективность использования холода отходящего азота в действительности будет выше, чем указанная в расчете.

Выполненный расчетный анализ тепловых процессов в токовводе показал:

- предпочтительным материалом токонесущих элементов может быть алюминий, поскольку ему в большей мере свойственно отклонение от закона Видемана-Франца;
- минимальный тепловой поток по токовводу можно обеспечить при различном соотношении величин L и F ;
- выполнение токонесущего элемента в виде пучка попарно скрученных проволок обеспечивает развитую поверхность теплообмена и высокую эффективность использования холода отходящих паров криоагента.

Список литературы

1. *Елагин П.* Сверхпроводниковый токоограничитель – коммутационный аппарат будущего. Новости электротехники. № 3 (33), 2005.
2. *McFee R.* сверхпроводимость и ее применение в электротехнике. / Под ред. Б.К. Буль, Б.М. Тареева, Л.: Энергия, 1964. – С. 38–59.
3. *Глазков И.Н.* Исследование сверхпроводящих электротехнических устройств. – Новосибирск: ИТФ СО АН, 1980. – С. 22–29.
4. *Efferson K.R.* Helium vapor cooled current leads. Rev. sci. Instz. – 1967. V. 38. N. 12. P. 1776–1779.
5. *Барцевский Г.Г., Бургардт К.А., Барцевский Е.Г.* Криогенный токоввод. Патент РФ на изобретение № 2077081, Н01В17/26, 1997.
6. *Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н.* Сверхпроводящие магнитные системы. М.: Наука, 1967.
7. *Веников В.А., Зувев Э.Н., Околотин В.С.* Сверхпроводники в энергетике. М.: Энергия, 1972.
8. *Максимов Е.Г.* Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние. // Успехи физических наук. – 2000. Т. 170. № 10. С. 1033–1061.
9. *Справочник по физико-техническим основам криогеники.* Под ред. М.П. Малкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.