



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-19

P9-97-19

В.Д.Бартенев

**ПРАКТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ
И ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТОКОВВОДОВ**

Направлено в журнал «Cryogenics»

1997

ВВЕДЕНИЕ

Криогенные электротехнические устройства требуют подвода в холодную зону криостата электрического тока до нескольких тысяч ампер. В этом случае тепловые потери за счет тоководов становятся доминирующими. Необходимо нахождение оптимальной конструкции тоководов, обеспечивающих минимальный поток тепла в холодную зону. Теплоприток по тоководу обуславливается двумя причинами: теплопроводностью и выделением джоулева тепла. Для охлаждаемых тоководов первая составляющая в меньшей степени зависит от отношения длины токовода к его сечению, а в большей степени — от качества теплообменника токоведущей части токовода. Вторая составляющая также не прямо пропорциональна этому отношению, а более зависит от качества материала и теплообменника токопровода. Истинный теплоприток по тоководу можно определить только при циркуляционном режиме охлаждения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОКОВОДОВ

Практически конструирование токовода сводится к подбору и оптимизации его параметров. Базовой берется конструкция токовода, с токопроводом из сваренных между собой медных пластин и оплеток, описанного в [1]. Эффективный теплообменник токопровода, с удельной поверхностью $55 \text{ см}^2/\text{см}^3$ [2], допускает плотность тока $800 \pm 100 \text{ А/мм}^2$ в холодной зоне. Сечение токопровода в холодной зоне должно быть минимальным, т.к. это определяет теплоприток теплопроводностью при нулевом токе. На рис.1 представлена зависимость теплопритока теплопроводностью от сечения токопровода для данной конструкции теплообменника и длины токопроводов $600 \pm 800 \text{ мм}$ при циркуляционном режиме охлаждения.

Расход охлаждающего газа по тоководу при нулевом токе является стартовым и в дальнейшем увеличивается пропорционально величине электрического тока. Распределение температур по длине токовода приведено из [3]. Протекающий ток мало изменяет поле температур в холодной зоне токопровода (рис.2).

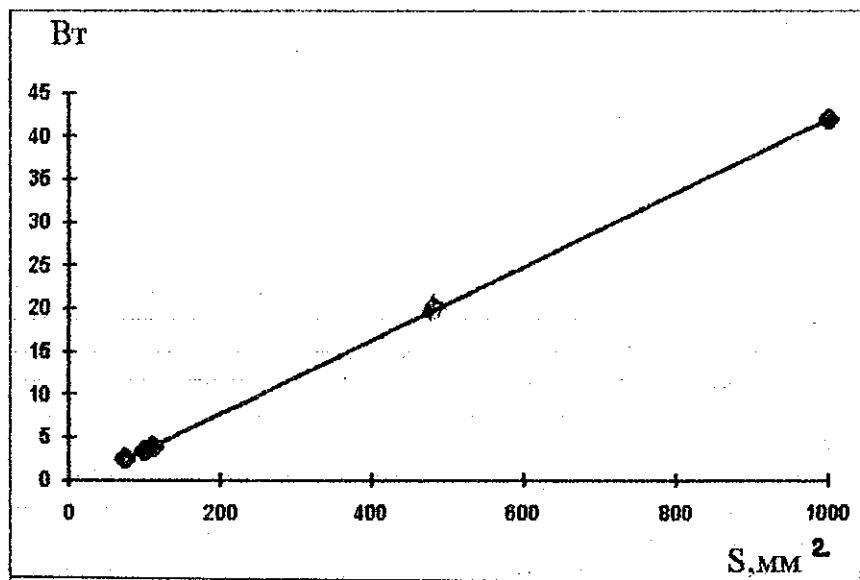


Рис.1. Зависимость теплопритока теплопроводностью от сечения токоввода для конструкции теплообменника [1] при циркуляционном режиме охлаждения

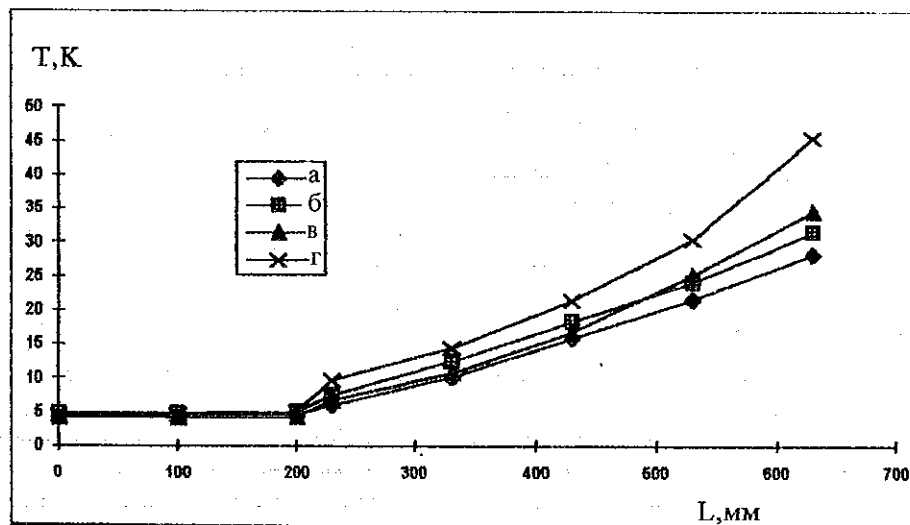


Рис.2. Распределение температуры по длине токоввода при различных режимах работы. 1. Циркуляционный режим охлаждения: а) температуры при нулевом токе, б) температуры при токе 5 кА. 2. Режим охлаждения парами гелия: в) температуры при нулевом токе, г) температуры при токе 5 кА

При циркуляционном режиме охлаждения токоввод стабильно работает на номинальном токе при расходе газа по токовводу из расчета удельного теплопритока 1 Вт/кА [1]. Длина токоввода мало влияет на общий теплоприток по токовводу, т.к. практически не изменяется поле температур в холодной зоне токоввода. В работающем в оптимальном режиме токовводе длина токоввода в большей степени определяет температуру теплового конца токоввода. Длину токоввода, для работы на постоянном токе, можно подобрать для условия:

$$T \text{ теплового конца} = T \text{ окр. среды.}$$

Увеличение длины токоввода практически пропорционально увеличивает стоимость токовводного криостата.

Медь токоввода может быть промышленной, обычной, с отношением остаточного электросопротивления (RRR) $30 \div 40$. Теплопроводность обычной меди и сверхчистой меди с $RRR = 1800 \div 2000$ в интервале температур $50 \div 295$ К практически одинакова. Удельное электрическое сопротивление обычной меди в интервале температур $5 \div 20$ К в 5—10 раз больше, чем удельное электрическое сопротивление сверхчистой меди. В этом интервале температур теплопроводность обычной меди в 5—10 раз меньше, чем у сверхчистой [4,5]. Применение сверхчистой меди ведет только к повышению цены токоввода.

По технологии [1] были изготовлены токовводы с малым статическим теплопритоком в криостат, рассчитанные на кратковременную работу до 8 кА, в качестве токовводов безопасности. Верхняя часть токоввода, находящаяся в зоне $300 \div 30$ К, изготовлена из меди, и ее сечение — 160 мм^2 . В нижней части, находящейся в зоне $30 \div 4,5$ К, медные полосы заменены на нержавеющую сталь и сечение меди составляет $40 \div 45 \text{ мм}^2$.

В режиме циркуляционного охлаждения статический теплоприток в криостат был 0,8 Вт на ввод, в режиме охлаждения парами гелия — 0,45 Вт на ввод. Ток до 8 кА вводился за 4—5 с и выводился за 1—2 с, поскольку в рабочих условиях ток из магнитной системы должен только выводиться за короткое время. Небольшой скачок температуры наблюдался примерно в середине вставки из материала с низкой теплопроводностью. Перед введением тока на токовводе устанавливался расход гелия, соответствующий статическому теплопритоку 0,8 Вт. Токовводы стабильно работали в режиме охлаждения парами гелия с удельным теплопритоком 0,8 Вт/кА при токе 2,4 кА, что соответствует количеству меди ($40 \div 45 \text{ мм}^2$) в нижней части токоввода.

В настоящее время магниты сверхпроводящих ускорителей [6] и больших магнитных систем [7] располагаются в вакууме и охлаждаются циркуляционным способом. Токовводы для таких систем желательно иметь также с

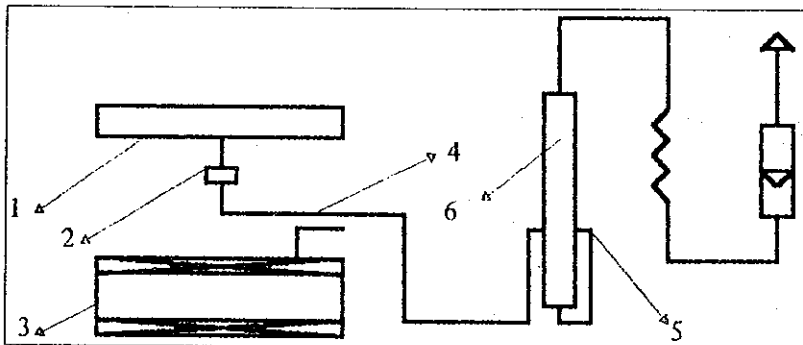


Рис.3. Схема электрической и гелиевой коммуникаций токоввода с магнитом. 1 — питающий коллектор, 2 — металлокерамическая электроизоляционная трубка, 3 — СП-магнит, 4 — спай СП-кабелей, 5 — спай СП-кабеля с токовводом, 6 — токоввод

циркуляционным режимом охлаждения, что существенно упрощает конструкцию магнитной системы в целом.

Работа токовводов с циркуляционным режимом охлаждения описана в [1]. Пространственное расположение токоввода (горизонтальное, вертикальное) с циркуляционным режимом охлаждения не оказывает влияния на общий теплоприток по токовводу. Жидкий гелий, попадающий в токоввод, сразу испаряется в нижней части токопровода. При охлаждении токоввода однофазным жидким гелием или чистым паром (4,2 К) общий теплоприток по токовводу в каждом случае отличается на величину теплоты испарения жидкого гелия.

При работе в погружном режиме, т.е. когда холодный конец токоввода находится в жидком гелии, возможна работа с меньшим потоком охлаждающего газа через токоввод. Уменьшение потока охлаждающего газа через токоввод довели до 50%, и токоввод устойчиво работал как бы «с удельным теплопритоком 0,53 Вт/кА при 6 кА». Другая часть общего теплопритока по токовводу снимается жидким гелием [3]. Реальный общий теплоприток по токовводу можно измерить только в режиме циркуляционного охлаждения.

Магнитная система состоит из сверхпроводящего (СП) магнита, токовводов и соединяющих их СП-кабелей. Схема электрической и гелиевой коммуникации токоввода с магнитом показана на рис.3.

Подробно схема электрических и гелиевых коммуникаций магнитно-криостатных блоков нуклотрона приведена в [6]. Конструктивно длина СП-кабеля, соединяющего магнит с токовводом в нуклотроне равна $1,8 \pm 2$ м. При такой схеме коммуникации длинный СП-кабель и два спаивают до-

полнительный теплоприток в токоввод. Этот теплоприток зависит от качества СП-кабеля, его пространственного расположения и крепления и качества спаивания. Схема раздельной электрической и гелиевой коммуникации токоввода с магнитом существенно усложняет конструкцию магнитной системы в целом. В магнитной системе наиболее слабым звеном является СП-кабель, соединяющий токоввод с магнитом. При переходе СП-кабеля в нормальное состояние ток должен быть выведен в кратчайшее время, например для нуклотрона за 50 мс, или соединяющий СП-кабель должен быть защищен от перегрева. Устойчивость токоввода на перегрев при условии потери охлаждения можно проверить только при наличии мощной шунтированной СП-кабелем медной перемычки между токовводами на холодном конце. Без перемычки соединяющий СП-кабель сгорает при потере охлаждения через токоввод при работе в погружном режиме [3,8] и тем более при работе при циркуляционном режиме охлаждения. В больших магнитных системах, с медленным выводом тока, холодные концы токовводов контактируют на шунтированный сверхпроводником коллектор [9].

Токоввод допускает перегрузку на $40 \pm 50\%$ при соответствующем добавлении расхода охлаждающего газа через него. Токовводы нуклотрона, рассчитанные на 6,2 кА постоянного тока, работали на стенде испытания магнитов при токах до 9,8 кА. Расход газа по ним устанавливался из расчета $1,6 \pm 1,8$ Вт/кА, т.к. токовводы работали на неоптимальных токах и чтобы токовводы не были причиной перехода магнита в нормальное состояние.

Пример выполнения всех названных выше условий можно увидеть на предполагаемом 100 кА токовводе. Такой токоввод должен иметь следующие параметры:

Режим охлаждения циркуляционный, токоввод медный сварной

Длина токопровода	1200 мм
Сечение токопровода в теплой зоне	3000 мм ²
Сечение токопровода в холодной зоне	1000 мм ²
Вес токопровода	35 кг
Массовый поток охлаждаемого газа	5 г/с
Удельный теплоприток	1 Вт/кА
Теплоприток без тока	42 Вт
Гидравлическое сопротивление	10 + 12 кПа
Температура теплового конца	250 К

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ТОКОВОДОВ

Токопроводы токовводов изготавливаются из оребренных стержней, лент, труб и проволоки небольшого диаметра, сплетенных в пучки. Токовводы с токопроводом из оребренных стержней описаны в [8,10,11]. Токопроводы из оребренных стержней имеют удельную поверхность теплообменника $1\text{--}2\text{ см}^3/\text{см}^2$. Увеличить эту величину практически нельзя, т.к. увеличение числа ребер ведет в резкому росту гидравлического сопротивления токоввода. Сечение токопровода такой конструкции токовводов достаточно велико для выбранных номинальных токов, и значит у них большой статический теплоприток.

Токовводы с токопроводом из перфорированных лент и небольшого диаметра проволоки описаны в [12—15]. Токопроводы таких конструкций могут иметь большую удельную поверхность теплообменника [2], но этого еще недостаточно. Ток проходит по параллельным лентам или проволокам, и необходимо обеспечить одинаковый отвод тепла с каждой из них.

При прохождении тока по параллельным проводникам возникают электродинамические силы, которые прижимают проводники друг к другу. Увеличенные каналы прохода охлаждающего газа значительно ухудшают качество теплообменника [16]. Сечение токоввода этой конструкции токовводов достаточно велико, и значит у них большой статический теплоприток. Качество токовводов с такой конструкцией токопровода со временем должно ухудшаться, т.к. происходит увеличение каналов прохода охлаждающего газа. Этот процесс имеет свой предел и зависит от жесткости лент и проволоки.

Описанная конструкция [1] токоввода лишена этих недостатков. Ток проходит по стенкам короба, а оплетки жестко закреплены и выполняют роль развитой поверхности теплообменника. Характеристика токовводов не изменится продолжительное время, более 10 лет.

В настоящее время много работ посвящено комбинированным токовводам, т.е. с вставками из высокотемпературного сверхпроводника [17,18,19]. Высокотемпературные сверхпроводники изготавливаются в виде пластин, трубок или стержней. Вставки из высокотемпературного сверхпроводника параллельны токопроводом из металла, меди или нержавеющей стали. Металлический токопровод обеспечивает механическую прочность вставок и защищает вставки при переходных в нормальное состояние. Конструкция токоввода достаточно сложна. Необходимо охлаждение нижней части токоввода гелием, при этом увеличивается плотность тока вставок.

Энергозатраты на компенсацию теплопритока по токовводу конструкции [1] и [18] в пересчете на 1 кА практически одинаковы. Комбинированные токовводы не допускают перегрузок и тем более такого условия, как потеря

охлаждения. Возможно разрушение токоввода. Подробно о преимуществах и недостатках таких токовводов написано в [19].

ВЫВОДЫ

Токовводы, изготовленные согласно [1], работают с удельным теплопритоком 1 Вт/кА при циркуляционном режиме охлаждения. Они компактны, надежны в работе. Истинный теплоприток по токовводу определяется только при циркуляционном режиме охлаждения. Пока токовводы с вставками из высокотемпературного сверхпроводника требуют охлаждения гелием, по энергозатратам на компенсацию теплопритоков по токовводам они не имеют преимущества перед токовводами из меди. Комбинированные токовводы сложны по конструкции, дороги, не обеспечивают временной стабилизации, не допускают перегрузок и тем более такого условия, как потеря охлаждения. В заключение автор выражает благодарность Ю.А.Шишову за полезные консультации и дискуссии по рассмотренным проблемам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bartenev V.D., Shishov Y.A. — *Cryogenics*, 1991, v.31, p.985.
2. Микулин Е.И., Шевич Ю.А. — Матричные теплообменные аппараты. М.: Машиностроение, 1983.
3. Bartenev V.D. — JINR Preprint E9-95-517, Dubna, 1995.
4. Малков М.П. — Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергостандарт, 1985.
5. Thermal Conductivity of Solid at Room Temperature and Below. A Review and Compilation of the Literature. (Ed. G.B.Childs, L.Y.Ericks, R.W.Powel) National Bureau of Standards, 1973.
6. Смирнов А.А., Ходжибагян Г.Г. — Препринт ОИЯИ 9-88-344, Дубна, 1988.
7. Desportes H., Lebars I., Mayaux G. — *Adv. Cryo. Eng.*, 1980, v.25, p.175.
8. Кейлин В.Е., Ковалев И.А. — ПТЭ, 1974, №6, с.178.
9. Heiberger M., Morris D.G., Tallorin D. — *Adv. Cryo. Eng.*, 1984, v.39, p.1967.
10. Katheder H., Shappals L. — *IEEE Transactions on magnetics*, 1981, V.MAG-17, №5, p.2071—2074.
11. Maehata K. et al. — *Cryogenics*, 1983, v.33, p.680.
12. Leroy D., Oberli D. — *Proc. Twelfth Int. Cryo. Eng. Conf.*, Southampton, UK, 1988, p.237.
13. Lue I.W. et al. — *Adv. Cryo. Eng.*, 1986, v.31, p.217.

14. Hagedorn D. et al. — Proc. Twelfth Int. Cryo. Eng. Conf., Southampton, UK, 1988, p.242.
15. Tada E. et al. — Proc. Eleventh Int. Cryo. Eng. Conf., Berlin-West, Germany, 1986, p.528.
16. Бартнев В.Д. — Препринт ОИЯИ 38-90-186, Дубна, 1990.
17. Niemann R.C. et al. — IEEE Trans, Appl. Supercond., 1995, v.5, p.789.
18. Heller R., Hull J.R. — IEEE Trans, Appl. Supercond., 1995, v.5, p.797.
19. Ballarino A., Ijspeert A. — Adv. Cryo. Eng., 1994, v.39, p.1959.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 января 1997 года.