

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

4382/83

22/8-83

P8-83-373

В.Д.Бартенев, В.И.Дацков, Ю.А.Шишов

КРИОГЕННЫЕ ТОКОВОДЫ  
С ТЕПЛОБМЕННИКОМ ИЗ ОПЛЕТОК

Направлено в журнал  
"Приборы и техника эксперимента"

1983

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Охлаждаемые гелием токовводы сверхпроводящих устройств, используемые в килоамперной области, должны отвечать следующим основным требованиям:

1. Близость к теоретическому минимуму удельного теплопритока в жидкий гелий, который при температуре теплого конца 293 К равен  $0,9-1,0 \text{ Вт/кА/л}$ . Этот предел может быть достигнут при оптимальном для данного материала отношении длины к площади поперечного сечения токоведущего элемента /2/ и достаточно развитой поверхности теплообмена.

2. Способность достаточно продолжительное время выдерживать значительный перегрев - это позволит сохранить токоввод и вывести из магнита запасенную энергию при частичном или полном прекращении поступления охлаждающего газа.

3. Определенная величина гидравлического сопротивления токоввода. В устройстве с замкнутым рефрижераторным режимом при температуре гелия, например, 4,5 К /давление насыщенных паров  $1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ / на токовводе можно использовать значительную часть перепада давления между жидким гелием и теплым обратным потоком гелия /например,  $0,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ /3/. При криостатировании устройств путем их погружения в жидкий гелий с температурой около 4,2 К необходимы токовводы с минимальным гидравлическим сопротивлением.

4. Минимальные длина и сечение токоведущей части, чтобы токоввод не занимал много места на крышке криостата и в его полости. Это требование особенно существенно для высоковольтных многоамперных токовводов.

5. Достаточно развитая поверхность омываемой жидким гелием части токоввода. Благодаря этому передача тепла от токоввода в гелий происходит при небольшом перепаде температур. Иначе припаянный к токовводу сверхпроводник может преждевременно перейти в нормальное состояние. Особенно необходимо увеличивать поверхность теплообмена в токовводах, предназначенных для циркуляционного криостатирования сверхпроводящих магнитов /СМ/. В этом случае гелий дросселируется в полость токоввода в виде парожидкостной смеси. Холодный газ и капли жидкости могут заноситься в теплую часть токоввода, в результате чего возрастает теплоприток в жидкий гелий. Развитая поверхность теплообмена с жидким гелием позволяет также предотвратить немедленный переход в нормальное состояние погруженных в гелий СМ в случае частичного или полного прекращения поступления охлаждающего газа в токоввод.

6. Конструкция и технология изготовления токоввода должны быть предельно простыми.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗВЕСТНЫХ ТОКОВОДОВ

Токоведущие элементы можно классифицировать следующим образом: фольги, трубы, стержни, проволочки /разновидность - оплетки/. Трубы и стержни часто снабжают ребрами. Используют также пористые элементы. Очевидно, возможны комбинации элементов.

Известны токовводы /4/, отвечающие в достаточной степени перечисленным в предыдущем разделе требованиям. Рассмотрим некоторые примеры. Токовводы для дипольных СМ ускорителя ESCAR/5/ содержат пакет медных фольг /см. таблицу/. Токовводы компактны, эффективны и стабильны при 2 кА и расходе охлаждающего газа  $4,3 \cdot 10^{-5} \text{ г.с}^{-1} \cdot \text{А}^{-1}$ . Однако при уменьшении этого расхода всего на 10% токовводы за 20 мин достигают условий поломки. Следует заметить, что их теплообменная поверхность довольно мала /17  $\text{см}^2 \cdot \text{см}^{-3}$ /. Аналогичные фольговые токовводы, разработанные и испытанные в криогенном отделе Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, оказались менее эффективны:  $1,28 \text{ Вт.кА}^{-1}$  при  $1,58 \text{ кА/8}$ .

В Карлсруэ созданы токовводы на 10 кА /см. таблицу/ для тороидального СМ/3/. Токоведущий элемент представляет собой медный стержень с нарезанными на нем ребрами. Концы токовводов не погружены в жидкий гелий, а соединены со сверхпроводящей трубкой, по которой течет двухфазный гелий. Минимальный уровень стабильности достигается при 6-6,5 кА и расходе газа  $4 \cdot 10^{-5} \text{ г.с}^{-1} \cdot \text{А}^{-1}$ . Нижняя часть токовводов дополнительно охлаждается потоком гелия  $0,05 \text{ г.с}^{-1}$ . К недостаткам токоввода можно отнести большие длину и гидравлическое сопротивление. Мала плотность тока и, соответственно, велика масса токоведущего элемента. Однако это позволяет без поломок выводить запасенную в магните энергию при полном прекращении подачи газа в токовводы. Например, температура токоввода в такой ситуации существенно не повысилась при падении тока с 10 кА до нуля за 5 мин.

Первые токовводы из оплеток разработаны Эфферсоном/6/ /см. таблицу/. Они обладают развитой поверхностью теплообмена благодаря использованию 80 оплеток /для номинала 1,3 кА/ из тонких медных проволок. В результате удельный теплоприток в жидкий гелий довольно мал и равен  $0,985 \text{ Вт.кА}^{-1}$ . Однако последующие токовводы этого типа не имели такой эффективности. Например, токовводы/7/ на 2 кА дают теплоприток  $1,5 \text{ Вт.кА}^{-1}$ . Токовводы, сведения о которых приведены в/5/, имеют  $q = 1,12 \text{ Вт.кА}^{-1}$ . Такое ухудшение эффективности может объясняться следующими причинами. Во-первых, используют оплетки из более толстых, чем у токовводов Эфферсона, проволок. Во-вторых, слишком велики проходы для газа в случае применения круглых оплеток большого диаметра. И, в-третьих, токовводы не оптимизированы. Необходимо обратить внимание

Таблица

Параметры токовводов

Наименование и размерность параметра	Шины с теплообменником из оплеток	Оплетка/6/	Стержень/3/ с ребрами	Фольга/5/	Фольга/3/
Номинальный ток $I$ , кА	1,6	3,0	0,0	1,3	2,0
Длина токоведущего элемента $L$ , мм	450	750	100	600	630
Сечение стенок корпуса, низ $S$ , $\text{мм}^2$	32	65	160		860
Сечение токоведущего элемента $S$ , $\text{мм}^2$			40	707	70
Параметр $S^2$ , $\text{кА.мм.мм}^{-2}$	22,5	34,6	38	19,5	37
Номинальная плотность тока в проводнике, $A \cdot \text{мм}^{-2}$	50	46	50	32,5	28,6-54,1
Сечение токоввода, верх $S_1$ , $\text{мм}^2$	20x8,5	22x22	7x27	Ø 19	Ø 65-68
Сечение токоввода, низ $S_2$ , $\text{мм}^2$	18x7	20x11			25,4x26,5
Количество оплеток	2	4	4	80	12x6,5
Количество фольг	2	2	3		7+2
Диаметр проволок, мм	0,2	0,3	0,2	0,1	
Толщина фольги, мм	0,5	1,0	0,5		0,32/0,13
Удельная поверхность теплообмена, $\text{см}^2/\text{см}^3$	53	56	55	56	17
Количество проволок в оплетке	240	256	240	64	
Удельный теплоприток в жидкий гелий в условном автономном режиме, $\text{Вт.кА}^{-1}$	0,95	1,1	не измерено	0,985	1,28
Удельный теплоприток в автономном режиме, $\text{Вт.кА}^{-1}$					0,86
Минимальный расход газа по токовводу без нарушения стабильности, $\text{г.с}^{-1}$	0,038	не измерено			
Теплоприток без тока, Вт	1,0	2,5	не измерено	0,73	
Падение напряжения, мВ	~ 60	~ 150	не измерено		35
Гидравлическое сопротивление, Па	$5 \cdot 10^3$	$(7-10) \cdot 10^3$	не измерено		$17 \cdot 10^3$
					$(2,6-5,3) \cdot 10^3$

на следующее обстоятельство. Развитие поверхности теплообмена с помощью оплеток приводит к тому, что одновременно увеличивается путь тока, который идет по зигзагообразной проволоке, и, соответственно, растут джоулевы потери, то есть токоввод с оптимальным отношением длины к суммарному сечению проволок в действительности неоптимален. Фактическая длина токоведущего элемента в 2-4 раза больше и равна развернутой длине любой из проволок в оплетке.

### 3. ТОКОВВОДЫ С ТЕПЛОБМЕННИКОМ ИЗ ОПЛЕТОК

Таким образом, некоторые недостатки известных токовводов связаны с тем, что оплетки выполняют одновременно функции токоведущего элемента и теплообменника. В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ разработаны, созданы и успешно работают в течение нескольких лет на различных установках токовводы с оплетками, лишённые перечисленных недостатков. Для уменьшения джоулевых потерь используются токоведущие пластины из меди, соединенные по всей длине со сплюснутыми оплетками. Электрическое сопротивление пластин значительно меньше сопротивления пакета оплеток, и большая часть тока протекает по этим пластинам. Следовательно, оплетки выполняют в основном функцию эффективного теплообменника.

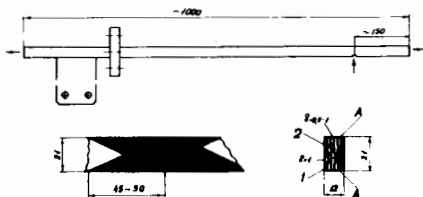


Рис.1. Токоввод на 3 кА: 1 - пластина, 2 - оплетка, А - место сварки.

Конструкция токоввода на 3 кА показана на рис.1, основные технические характеристики даны в таблице. Токоведущая часть состоит из двух медных пластин 1 и четырех оплеток 2, торцы которых сварены /поверхность А/. В результате образуется короб. В холодной зоне, выше расчетного уровня гелия, в стенке короба сделан паз для входа газа. В теплой части приварены две медные пластины для механической прочности и медная пластина для крепления подводных токовых кабелей, а также припаян фланец из нержавеющей стали. Таким образом, конструкция и технология изготовления токоввода предельно просты.

Созданы токовводы на 8 кА, которые использованы при испытании СМ с прокачкой газообразного гелия через полый проводник /см. таблицу/.

Измерения удельного теплопритока в жидкий гелий по токовводу на 3 кА показали, что выбрано недостаточно близкое к оптимальному соотношение длины и площади сечения токонесущего элемента. Поэтому для испытаний в транспортном дьюаре с горловиной диа-

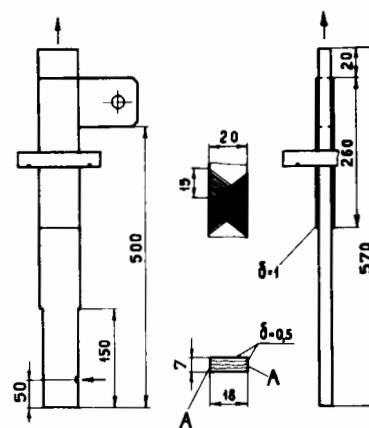


Рис.2. Токоввод на 1,6 кА, А - место сварки.

метром 45 мм изготовлены токовводы на 1,6 кА /см. таблицу и рис.2/. Отличие этого токоввода от предыдущих состоит, кроме различия в размерах, в том, что в каждую сплюснутую оплетку вставляются по торцам две медные проволоки. Это дает возможность подбирать зазор между оплетками, обеспечивающий необходимое гидравлическое сопротивление токоввода. Кроме того, удобнее вести сварку токоввода.

### 4. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Для точных измерений теплопритока в жидкий гелий по токовводам необходимо отделить его от теплопритоков к криостату. Количество газообразного гелия, выходящего из криостата, непостоянно и зависит от уровня жидкого гелия, времени, прошедшего после его подливки, и изменения давления в обратном потоке. Рационально не учитывать величину испаряемости криостата в измерениях, для чего приняты следующие меры. В криостат 1 /рис.3/ с внутренним диаметром 500 мм вставлен герметичный сосуд 2, в который через уплотнения, одновременно обеспечивающие электрическую изоляцию, вставлены токовводы 3, в данном случае с номиналом 3 кА. Расход газа измеряется с помощью ротаметров. Для заполнения сосуда гелием используется вентиль 4. Сосуд погружен в жидкий гелий, что обеспечивает его тепловую изоляцию при условии совпадения температуры жидкого гелия в криостате и сосуде. Для этого в течение эксперимента необходимо поддерживать в обеих полостях одинаковое давление путем регулирования сопротивления в обратном потоке из криостата. Точное измерение разности этих давлений ведется с помощью водяного дифференциального манометра 5. Контроль уровней осуществляется сверхпроводящими уровнемерами 6. С помощью двух манометров измеряется гидравлическое сопротивление токовводов.

Температуру верхней части токовводов поддерживают постоянной с помощью воды, пропускаемой через припаянные к подводным шинам змеевики. Стабилизация падения напряжения по всей длине токоввода служит основным признаком достижения установившегося режима. Контролируется температура токоввода непосредственно под крышкой криостата.

Схема установки для исследования работы токовводов на 1,6 кА показана на рис.4. Токовводы 1 вставлены в трубу 2 с крышкой 3.

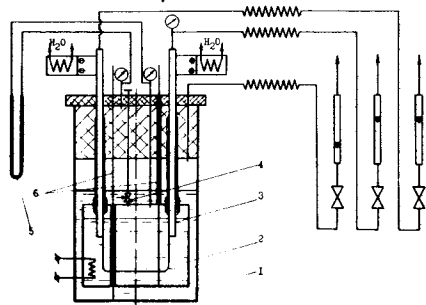


Рис.3. Схема установки для питания токовыводов на 3 кА.

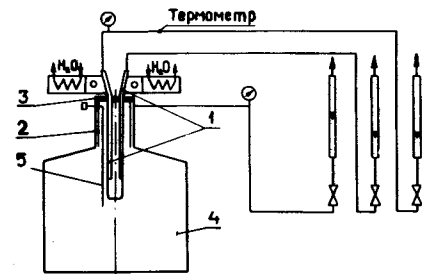


Рис.4. Схема установки для исследований токовыводов на 1,6 кА.

Вся эта сборка размещена в дьюаре 4, испаряемость которого пренебрежимо мала. Уровень жидкого гелия контролируется сверхпроводящим уровнемером 5. Расход газа измеряется ротаметрами с погрешностью не более 3%.

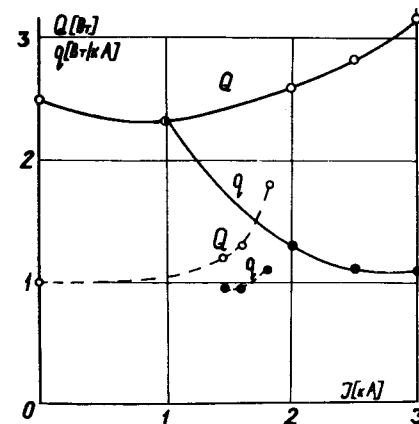
## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Токовыводы номиналом 3 кА испытаны токами до 3,5 кА. Максимальный уровень стабильной работы достигался при 3 кА, при 3,5 кА токовывод быстро нагревался. Разность потенциалов увеличивалась за 10 мин с 45 мВ до 300 мВ. Результаты измерений в стабильной области условно автономного режима<sup>х</sup> представлены на рис.5 и в таблице. Минимальный удельный теплоприток в жидкий гелий, равный 1,1 Вт·кА<sup>-1</sup> на токовывод, достигался при 3 кА. Время выдержки при данном токе равно 2 часам.

Размеры токовывода на 1,6 кА оптимизированы путем последовательного укорачивания токоведущей части и увеличения площади сечения токовывода вверху, проводились промежуточные испытания. Результаты окончательных испытаний в условно автономном режиме даны на рис.5 и в таблице. Исследована также работа при сниженных по сравнению с автономным режимом потоках газа, проходящих через токовывод. При токе 1,6 кА и потоке газа 1 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup> токовывод работал стабильно более 2 ч. При том же токе и потоке газа 0,8 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup> токовывод работал 1 ч, в этом случае он медленно на-

<sup>х</sup> Под условно автономным режимом понимается работа с охлаждением токовывода тем количеством газа, который испарился в результате теплопритока от токовывода в жидкий гелий, за вычетом газа, идущего на замещение испаренного токовыводом жидкого гелия /~1/7 часть/. Теплоприток в гелий в этом случае несколько больше, чем в автономном режиме.

Рис.5. Экспериментальные зависимости теплопритока  $Q$  и удельного теплопритока  $q$  в жидкий гелий от тока  $J$ , измеренные для токовыводов на 3 кА /сплошные линии/ и на 1,6 кА /пунктирная линия/.



гревался. Разность потенциалов увеличилась в два раза: с 72 до 130 мВ. Режим с полным прекращением подачи газа в токовыводы нами не исследован. Однако можно сказать, что токовыводы будут нагреваться быстрее, чем токовыводы на 10 кА/3/, за счет более высокой плотности тока /50 А·мм<sup>-2</sup> в нашем случае, 14 А·мм<sup>-2</sup> в/3//.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания показали, что токовыводы с теплообменником из оплеток надежны в работе и в достаточной степени отвечают рассмотренным выше требованиям. На основе данной конструкции и технологии можно создавать компактные токовыводы на десятки килоампер.

Авторы выражают благодарность за участие в изготовлении токовыводов сотрудникам криогенного отдела ЛВЭ ОИЯИ А.А.Демину, Б.З.Житникову, В.П.Мокринову, Г.Г.Хореву, И.С.Юдину.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каганер М.Г. Теплообмен в низкотемпературных теплоизоляционных конструкциях. "Энергия", М., 1979, с.184.
2. Nigohossian G. Rapport CEA-R3167, Saclay, 1967.
3. Katheder H., Schappals L. IEEE Trans. on Magnetics, 1981, vol.MAG-17, No.5, pp.2071-2074.
4. Буянов Ю.Л., Фрадков А.Б., Шебалин И.Ю. ПТЭ, 1974, № 4, с.5-14.
5. Warren R.P. Cryogenics, 1979, No.9, pp.563-566.
6. Efferson K.R. Rev.Sci.Instr., 1967, 38, No.12, p.1776.

7. Katheder H., Lehmann W., Spath F. KfK Nachrichten, DDR, 1975, No.1, p.40-41.  
8. Dorst D., Schischow J.A. Elektrie, DDR, 1975, 29, No.5, p.252-255.

Бартенев В.Д., Дацков В.И., Шишов Ю.А. P8-83-373  
Криогенные токовводы с теплообменником из оплеток

Созданы многоамперные /до 8 кА/ криогенные токовводы с теплообменником из оплеток. Модуль токоведущей шины состоит из двух медных полос и расположенных между ними сплюснутых медных оплеток. Торцы полос и оплеток сварены между собой, в результате чего образован короб, через который проходит газ, отводящий тепло от развитой поверхности оплеток. Описаны установки для испытаний токовводов. Исследована работа оптимизированного токоввода на 1,6 кА. Удельный теплоприток в жидкий гелий составляет 0,95 Вт/кА.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Bartenev V.D., Datskov V.I., Shishov Yu.A. P8-83-373  
Cryogenic Current Leads with a Heat Exchange from  
the Woven Copper Shields

High-rate (up to 8 kA) cryogenic current leads with a heat exchange from the woven copper shields have been created. The module of the current carrying elements are two copper strips and the flattened copper shields between them. The butt ends of the strips and shields are welded together making a box, through which the cooling gas passes, taking away the heat from the developed surface of the shields. The arrangements for testing the current leads are described. The optimized current lead for 1.6 kA is tested. Specific heat influx at this current is 0.95 W/kA.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 июня 1983 года.