

# Токовводы на основе высокотемпературного сверхпроводника Bi-2223 для сверхпроводящих магнитов\*

И.В. Богданов, Л.М. Васильев, В.В. Зубко, С.С. Козуб, К.П. Мызников,  
П.И. Слабодчиков, Е.Б. Суслов, В.В. Сытник, П.А. Щербаков

*Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

И.И. Акимов, А.К. Шиков

*Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов  
им. Бочвара, Москва, Россия*

В работе обобщается опыт ИФВЭ в области разработки и изготовления токовводов, предназначенных для сверхпроводящих магнитов ускорителей частиц. Дается краткое описание токовводов на 600 А, изготовленных на основе ленточного композитного проводника с Bi-2223 нитями в матрице из сплавов Ag+1ат.% Au и Ag+10ат.% Au. Приводятся результаты исследований электрических и тепловых характеристик токовводов. Токовводы показали высокую стабильность в работе и надежность при кратковременных перегрузках по току.

## Введение

В системе электропитания сверхпроводящих ускорителей требуется применение значительного количества токовводов для подвода тока к СП магнитам от источников питания, находящихся при комнатной температуре. За счет передачи тепла в низкотемпературную область по токовводам существенно увеличивается тепловая нагрузка на криогенную систему. Уменьшение общей тепловой нагрузки на уровне температур жидкого гелия позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы. В ЦЕРНе принято решение использовать для питания 8000 сверхпроводящих магнитов Большого Адронного Коллайдера (ЛНС) токовводы на основе ВТСП. Для этого будет необходимо изготовить 3380 токовводов с рабочими токами от 600 до 13000 А. В настоящее время ведутся интенсивные исследования опытных образцов токовводов [1-3] и в ближайшее время планируется разместить заказы на их изготовление в промышленности. Идет проработка проекта во ФНАЛ о замене на ТЕВАТРОНЕ медных токовводов на более эффективные токовводы из ВТСП. По этой программе также уже изготовлены и испытаны опытные образцы токовводов на 5000 А [4].

В ИФВЭ изготовлены и испытаны в соответствии с требованиями спецификации ЦЕРН [5] токовводы с номинальным током 600 А для питания корректирующих магнитов ЛНС. В качестве токонесущего элемента используется композитный ленточный ВТСП состава Bi2223 в матрице из сплава Ag+Au.

## 1. Свойства ВТСП ленты

Композитная сверхпроводящая лента представляет собой нити из керамики Bi2223, заключенные в матрицу из сплава серебра и золота. Она изготовлена методом "порошок в трубе" на основе прекурсора  $\text{Bi}^{1.8}\text{Pb}^{0.4}\text{Sr}^{2.0}\text{Ca}^{2.2}\text{Cu}^{3.0}\text{O}_x$ . Данный метод включает заполнение металлических труб порошком-прекурсором, волочение, плоскую прокатку с промежуточными деформациями между циклами отжига. Конечный размер ленты 4.6·0.25 и 4.3·0.25 мм<sup>2</sup>. Содержание золота в матрице составляет 1 и 10 атомных процентов соответственно, количество ВТСП нитей – 61 и 37 [6,7]. Коэффициент заполнения провода по сверхпроводящей керамике составляет 30%.

Критический ток данных лент определялся из вольт-амперных характеристик на уровне  $E = 1$  мкВ/см. Температурная зависимость критического тока приведена на рис.1. Критический ток сильно зависит от магнитного поля. С точки зрения разработки токовводов наибольший интерес представляет область малых полей. Так в магнитном поле 0.05 Тл в интервале температур 65–77 К критический ток у этих лент уменьшается на 25–35 процентов. Удельное сопротивление сплава Ag+1 ат.% Au равно  $2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при комнатной температуре и практически линейно уменьшается до  $0.6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при  $T = 50$  К. Для сплава Ag+10 ат.% Au –  $3.9 \cdot 10^{-8}$  и  $2.6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м соответственно. На рис. 2 представлена зависимость теплопроводности от температуры. В интервале температур 4.2–50 К теплопроводность ВТСП ленты с матрицей из сплава Ag +1ат.% Au приблизительно в 5 раз выше, чем у ленты с матрицей Ag+10 ат.% Au.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ЦЕРН.

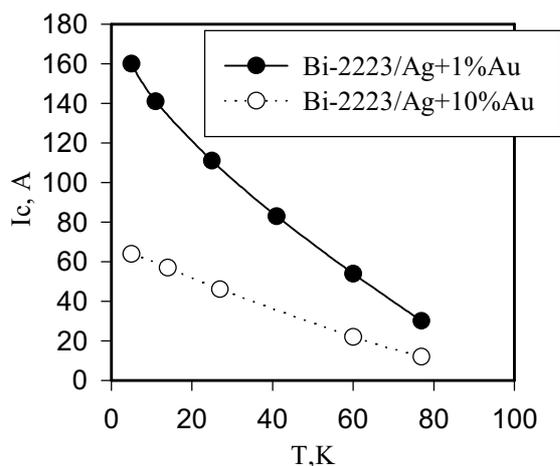


Рис. 1. Температурная зависимость критического тока ВТСП лент.

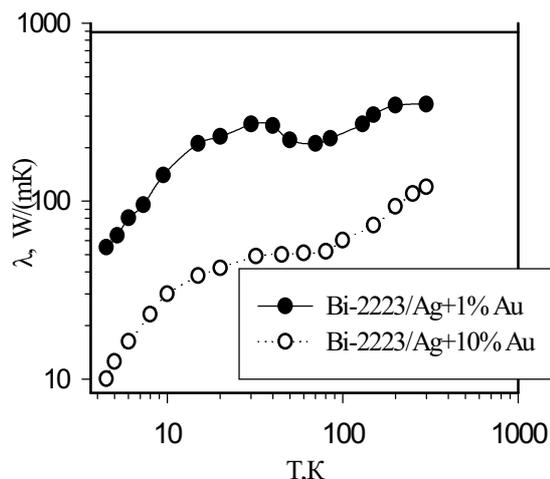


Рис. 2. Зависимость теплопроводности ВТСП лент от температуры.

## 2. Конструкция токовводов

В токовводе #1 использован проводник Bi2223/Ag+10ат.%Au. Его конструкция [8,9] схематично представлена на рис. 3. Токовводы #2, #3 и #4 с ВТСП лентами из Bi2223/Ag+1ат. % Au принципиальных конструктивных отличий не имеют. Особенности конструкции токовводов отражены в табл. 1.

Верхняя часть токовводов оснащена наконечником для подвода электрического тока и штуцером для отвода гелия охлаждающего резистивную часть. Электрическая развязка токоведущих частей от криостата и газовых коммуникаций выполнена с помощью керамических изоляторов.

Резистивная часть всех токовводов одинакова и состоит из 2300 медных проволок диаметром 0.13 мм. Они заключены в трубку из нержавеющей стали длиной 500 мм. Для токоввода #1 на основе Bi2223/Ag+10 ат.% Au была использована трубка из нержавеющей стали внутренним диаметром 12 мм, что соответствует плотности упаковки 29%. Для остальных токовводов была использована трубка внутренним диаметром 11 мм. Плотность упаковки составляет 35%. Заключенный в трубку пучок медных проволок охлаждается газообразным гелием с температурой 20 К и давлением на входе 0.13 МПа.

Таблица 1. Конструктивные особенности токовводов.

|                                     | #1          | #2         | #3          | #4          |
|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| <b>ВТСП проводник:</b>              |             |            |             |             |
| Количество ВТСП нитей               | 37          | 61         | 61          | 61          |
| Материал матрицы                    | Ag+10ат.%Au | Ag+1ат.%Au | Ag+1ат.%Au  | Ag+1ат.%Au  |
| Сечение проводника, мм <sup>2</sup> | 4.3*0.25    | 4.6*0.25   | 4.6*0.25    | 4.6*0.25    |
| Коэффициент заполнения по ВТСП      | 30          | 30         | 30          | 30          |
| <b>Резистивная часть:</b>           |             |            |             |             |
| Количество Cu проволок              | 2300        | 2300       | 2300        | 2300        |
| Диаметр Cu проволок                 | 0.13        | 0.13       | 0.13        | 0.13        |
| Внутренний диаметр трубки, мм       | 12          | 11         | 11          | 11          |
| Плотность упаковки, %               | 29          | 35         | 35          | 35          |
| <b>ВТСП часть:</b>                  |             |            |             |             |
| Общее количество ВТСП лент          | линейная    | линейная   | ступенчатая | ступенчатая |
| Длина ВТСП лент в слоях:            | 33          | 16         | 16          | 14          |
| 1 слой                              | 350         | 400        | 400         | 400         |
| 2 слой                              | 350         | 400        | 400         | 240         |
| 3 слой                              | 350         | —          | 100         | —           |
| Количество NbTi проволок            | 1           | 2          | 2           | 2           |

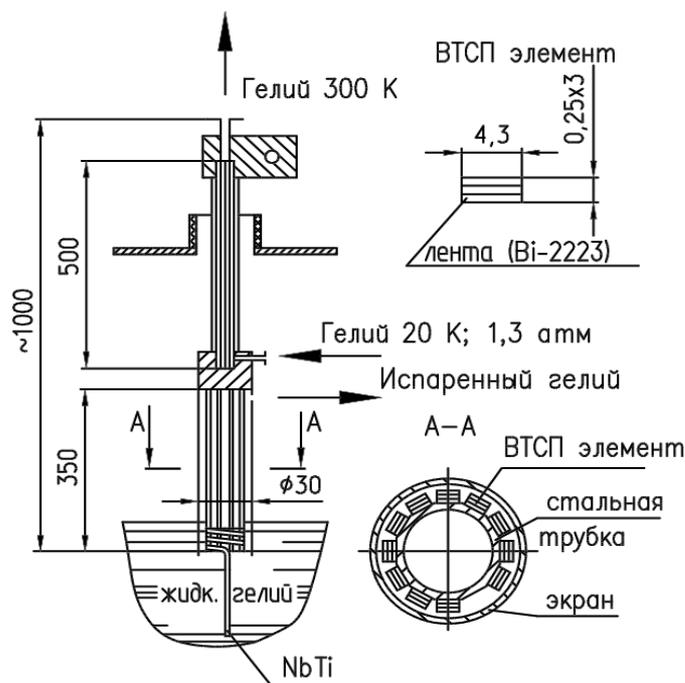


Рис. 3. Конструкция токовода.

ВТСП часть токовода #1 состоит из 33-х ВТСП лент из Bi2223/Ag+10ат.% Au длиной 350 мм каждая, расположенных по 3 шт. на 11 гранях 12-гранной трубки из нержавеющей стали. У токовода #2 ВТСП часть состоит из 16 Bi2223/Ag+1ат.% Au лент, которые располагаются на 8 гранях 9-гранной трубки. ВТСП часть токовода #3 имеет следующую особенность: на верхнем конце ВТСП части поверх ВТСП лент наложены короткие куски ВТСП лент, образующие третий слой длиной 100 мм, из которых 20 мм попадают в область верхнего сая, 75 мм свободны, а на длине 5 мм произведена пайка к лентам нижнего слоя. Токовод #4 также имеет ступенчатую конструкцию: в отличие от #2 ленты второго слоя укорочены.

Верхняя концевая деталь ВТСП части выполнена из меди. Она содержит пазы для укладки ВТСП лент, при этом в выступающих частях сделана винтовая канавка для укладки медной проволоки, прижимающей ВТСП ленты в пазах и тем самым облегчающей условия пайки. Пайка выполнена свинцово-оловянным припоем на длине 20 мм методом окупания. Аналогичная винтовая канавка сделана и в нижней медной концевой детали. Она служит для равномерной спиральной укладки сверхпроводящего NbTi провода поверх ВТСП лент на длине 30 мм. Такая геометрия и применение для пайки специального припоя обеспечивают очень низкое значение переходного сопротивления между ВТСП лентами и NbTi сверхпроводником. ВТСП ленты охлаждаются парами гелия, которые проходят в кольцевом зазоре между ВТСП лентами и наружной трубкой из нержавеющей стали, выполняющей роль защитного кожуха.

Для соединения токовода с СП-магнитами используется композитный сверхпроводящий провод из сплава HT-50 стабилизированного медью. Характеристики проводов обеспечивают большой запас по току (>1000 А на одну проволоку при 4.2 К в магнитном поле 6 Т), что дает возможность осуществлять соединение с магнитами в области больших магнитных полей. К тоководам #2 –#4 припаяно по 2 таких провода, к тоководу #1 – один.

### 3. Испытания тоководов в рабочих условиях

Испытательный стенд [9] с установленными ВТСП и обычным резистивным тоководом схематично представлен на рис. 4. Между собой тоководы соединены NbTi проводом, описанным выше. ВТСП часть токовода и обычный токовод охлаждаются парами гелия, испаряющимися в криостате. Уровень гелия контролируется с помощью уровнемера и поддерживается таким образом, что нижний конец ВТСП части постоянно находится в жидком гелии. Поток газообразного гелия для охлаждения резистивной части токовода получается с помощью устройства, состоящего из теплообменника, нагревателя, термометра, измерителя мас-

сового расхода гелия и системы управления. Расход и входная температура потока гелия измеряется и автоматически регулируется. Падение давления потока газа в резистивной части токоввода измеряется дифференциальным манометром. Перепад давления газообразного гелия с температурой 20 К на резистивной части токоввода #1 составил 1 кПа, а токовводов #2 – #4 – 5 кПа при номинальном токе 600 А. Такое отличие связано с различной плотностью упаковки медных проволок в трубках.

Измерение теплопритока в жидкий гелий проводилось при различных значениях тока и при номинальном массовом расходе газообразного гелия с температурой 20 К через резистивную часть. Для этого измерялось распределение температуры вдоль токоввода. Для измерения температурного профиля на каждом из ВТСП токовводов, были смонтированы 9 термометров: 4 на резистивной части и 5 на ВТСП части. Термометры на ВТСП части вставлены в гильзы, припаянные к ВТСП ленте. С их помощью определялся теплоприток по токовводу в жидкий гелий и проводился анализ теплопередачи от различных частей токоввода к потоку охлаждающего газа.

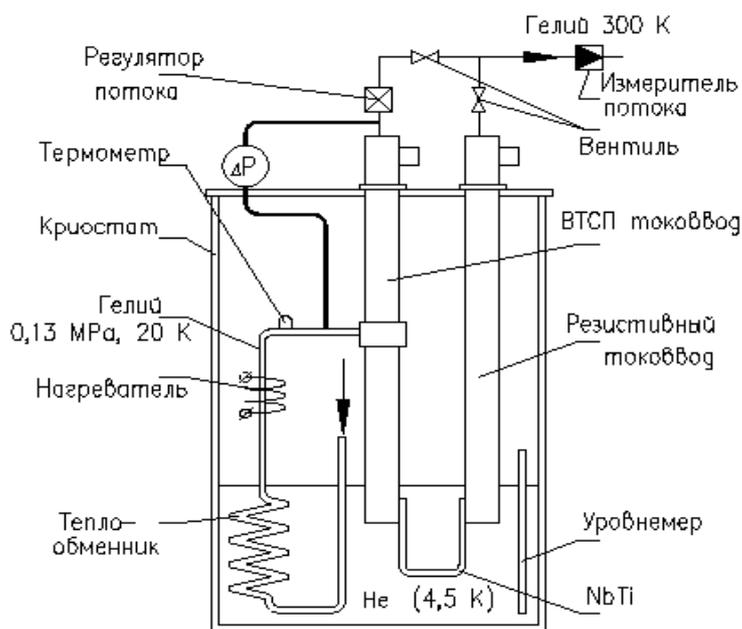


Рис. 4. Схема испытательного стенда.

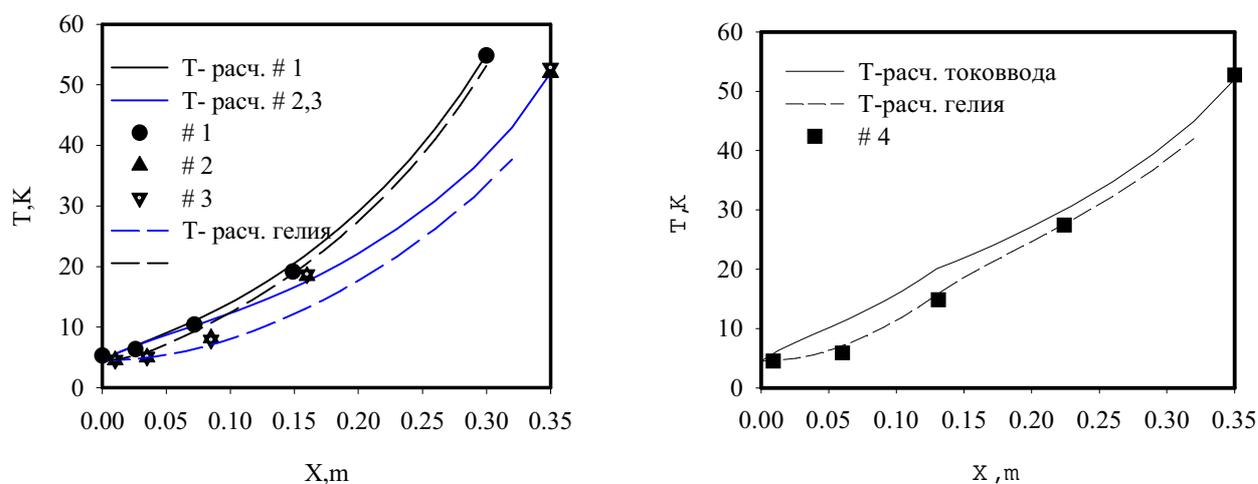


Рис. 5. Профиль температур на ВТСП части токовводов.

На рис. 5 приведены рассчитанный и измеренный профили температуры на ВТСП части токовводов при токе 600 А. Видно, что за счет неидеальности теплового контакта с ВТСП лентой показания термометров находятся между расчетными температурами лент и гелия. Величина теплопритока в жидкий гелий составляет 42, 130, 125 и 80 мВт для токовводов #1 – #4 соответственно. На рис. 6 представлена зависимость теплопритока к жидкому гелию от величины тока для токовводов #2 – #4 при номинальном расходе. Видно, что путем конструктивных изменений в токовводе #4 удалось уменьшить теплоприток до 80 мВт при токе 600 А.

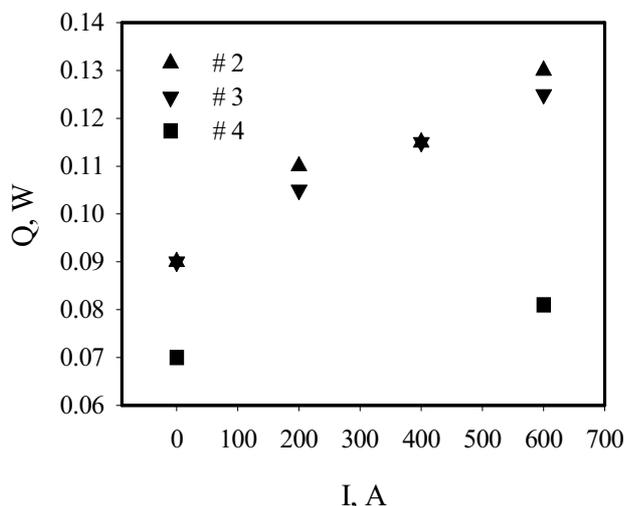


Рис. 6. Зависимость теплопритока к жидкому гелию от величины тока для токовводов #2 – #4.

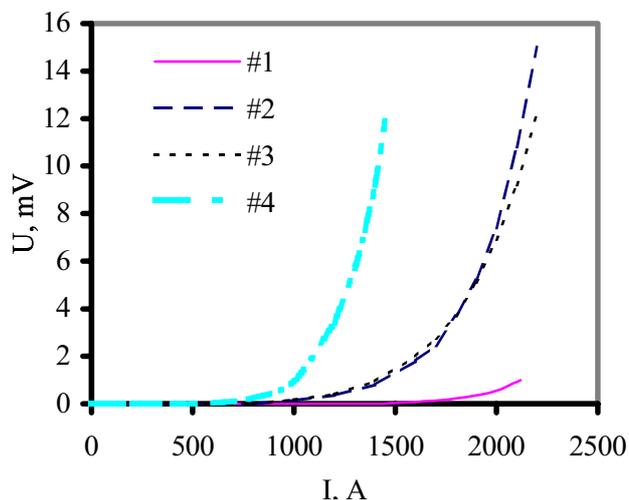


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики ВТСП части токовводов.

Теплоприток в жидкий гелий при отсутствии тока определялся, когда расход 20 К газообразного гелия через резистивную часть равнялся 60% от номинального, при этом величина теплопритока составила 42, 140, 135 и 70 мВт для токовводов #1 – #4 соответственно.

На токовводах располагались потенциальные отводы, служащие для измерения падения напряжения на ВТСП и резистивных частях и на верхнем и нижнем спаях ВТСП части. Падение напряжения на резистивной части при 600 А и при номинальном расходе 20 К гелия составляет 58, 76, 72 и 76 мВ для токовводов #1– #4 соответственно. Согласно требованиям, электрическое сопротивление R50 между ВТСП частью токоввода и его резистивной частью при температуре 50 К не должно превышать 1 мкОм. А сопротивление R4 между ВТСП и проволоками из низкотемпературного проводника при температуре 4.6 К должно быть меньше 30 нОм. Путем тщательного подбора материала припоя и соответствующего выбора конструкции переходных узлов удалось достичь более низких значений этих сопротивлений. Значения этих сопротивлений наряду с другими важнейшими характеристиками токовводов сведены в табл. 2.

На рис. 7 приведены вольтамперные характеристики ВТСП части токовводов. Эти ВАХ получены при вводе тока со скоростью 300 А/с до уровня напряжения на ВТСП части токоввода 10 мВ. Такое напряжение соответствует началу перехода ВТСП части в нормальное состояние. Измерения проводились при номинальном расходе газообразного гелия на охлаждение резистивной части. Температура верхнего конца ВТСП части токоввода в начальный момент составляла около 50 К, за время действия токовой перегрузки она выросла всего лишь на несколько градусов. Тепловая инерционность верхнего спая ВТСП части токоввода и вид вольт-амперных характеристик являются прямым подтверждением высокой надежности токовводов при кратковременных перегрузках по току. Очевидно также, что для токоввода на основе Bi2223/Ag+10 ат.% Au количество ВТСП лент взято с большим запасом и может быть уменьшено, что приведет к дальнейшему снижению теплопритока к жидкому гелию.

При токе 600 А и температуре верхнего конца ВТСП части токоввода 60 К все токовводы работали стабильно.

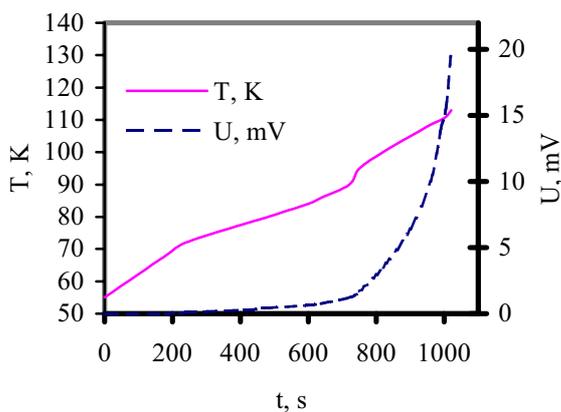
**Таблица 2.** Основные характеристики тоководов.

| Параметр   | Требования  | #1    | #2   | #3   | #4   |
|--|-------------|-------|------|------|------|
| Расход He с температурой 20 К при 600А, г/с              | $\leq 0.04$ | 0.03  | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| Падение давления He в токовводе, кПа                     | $\leq 5$    | 1.0   | 5.0  | 5.0  | 5.0  |
| Теплоприток в жидкий He при 600 А, мВт                   | $\leq 80$   | 42    | 130  | 125  | 80   |
| Теплоприток в жидкий He при 0 А, мВт                     | $\leq 70$   | 42    | 140  | 135  | 67   |
| Сопротивление перехода<br>ВТСП – резистивная часть, мкОм | $\leq 1$    | 0.130 | 0.22 | 0.25 | 0.22 |
| Сопротивление перехода<br>ВТСП – NbTi проводник, нОм     | $\leq 30$   | 1.4   | 2    | 3    | 6    |

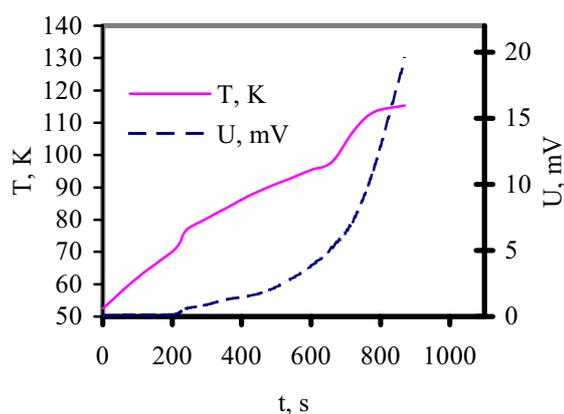
С целью инициации перехода ВТСП части в нормальное состояние на токовводе с током 600 А перекрывался поток гелия, охлаждающий резистивную часть. За счет повышения температуры верхнего конца ВТСП части на ней появлялось электрическое напряжение. Так, на токовводе #1, содержащем 33 ленты Bi2223/Ag +10 ат.% Au, это напряжение возросло от 0 до 55 мкВ и застabilizировалось на этом уровне, который более чем на два порядка ниже условного напряжения начала перехода (10мВ). Все остальные параметры токоввода также оставались неизменными и он стабильно работал при токе 600 А, температура верхнего конца токоввода составляла при этом 69 К. Аналогичный процесс наблюдался на ВТСП части токоввода #2, содержащем 16 лент из Bi2223/Ag +1ат.% Au. Хотя рост напряжения на ВТСП части и не прекращался, но происходил он очень медленно. Так, за время приблизительно 1000 с напряжение на ВТСП части возросло до 600 мкВ, а температура верхнего конца ВТСП части достигла 87 К. Поскольку указанным выше способом достичь напряжения 10 мВ не удалось, то была предпринята попытка достичь этого путем увеличения температуры на верхнем конце ВТСП части с помощью нагревателя, рис.8. Максимальная мощность на нагревателе составляла 25 Вт. Как видно, процесс перехода ВТСП части в нормальное состояние происходит медленно. На рис. 9 показано развитие процесса на токовводе #4. Характерные времена такие же, как на рис. 8, но дополнительного подогрева не производилось.

Наблюдаемая инерционность, безусловно, является положительным свойством данных тоководов. Но с точки зрения надежности наиболее показательным является тот факт, что после достижения порогового напряжения 10 мВ тоководы продолжали нести ток 600 А в течении 1 минуты (против 10 секунд согласно требованиям CERN). После этого каких-либо повреждений или изменений свойств не обнаружилось.

При понижении уровня жидкого гелия ниже холодного конца ВТСП части на 2 см при номинальном токе через тоководы практически не наблюдалось изменения параметров тоководов, по крайней мере, в течение первых 10 минут. При этом охлаждение нижнего конца осуществлялось за счет теплопроводности по NbTi проводникам.



**Рис. 8.** Поведение токоввода #2 при прекращении подачи охлаждающего газа и подогреве верхней части ВТСП нагревателем.



**Рис. 9.** Поведение ВТСП части токоввода #4 при прекращении подачи охлаждающего газа.

## Заключение

Испытания токовводов показали их высокую надежность и соответствие требованиям ЦЕРН. Токовводы стабильно работают при повышении температуры верхнего конца ВТСП части до 60 К. Токовводы обладают хорошими электрическими характеристиками. Значения переходных сопротивлений значительно ниже допустимых. Все токовводы обладают избыточностью по токовым характеристикам, что, с одной стороны, обеспечивает высокую надежность при кратковременных перегрузках по току, но с другой, приводит к тому, что полученные значения теплопритоков в гелий для токовводов #2 и #3 превышают допустимые. На примере токоввода #4 было показано, что существует возможность снизить теплоприток по токовводам на основе Bi2223/Ag +1ат.% Au путем уменьшения числа ВТСП лент. Величина теплопритоков к жидкому гелию уменьшена в 10 раз по сравнению с токовводами из меди.

## Литература

- [1] A. Ballarino. "Application of High Temperature Superconductors to Accelerators". – Proceed. of 7 European Particle Accelerator Conference, Vienna, Austria, 2000, pp.227-231.
- [2] A. Ballarino. "High Temperature Superconducting Current Leads for the Large Hadron Collider", ASC-98, IEEE v.9, 1999, pp.523-526.
- [3] I. Bogdanov, S. Kozub, K. Myznikov et al. "Application of HTS Bi-2223 for Current Leads of Superconducting Magnets", Proc. of EPAC-2000, Vienna, Austria, 2000, p.2178.
- [4] G. Citver, S. Feher, P.J. Limon et al. "HTS power lead test results". – Proceed. of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, USA, 1999, pp.1420-1422.
- [5] Technical specification for the fabrication and supply of prototype 600 A current leads using high temperature superconductor. IT-17847/LHC/LHC, Geneva, Switherland, July 1998.
- [6] И.В. Богданов, С.С. Козуб, П.А. Щербаков и др. "Характеристики провода Bi-2223/(Ag+Au) для токовводов на 600 А". – 16-е Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998, стр.41-44 .
- [7] I.I. Akimov, N.I. Kozlenkova, P.A. Kuznetsov et al. "Properties of Bi-2223/(Ag+Au) Tapes", Proc. of XVI Conf. on Magnet Technology, Tallahassee, USA, 1999, pp.1493-1495.
- [8] И.В. Богданов, Л.М. Васильев, В.В. Зубко и др. "Расчет 600 А токоввода с использованием высокотемпературного сверхпроводника". – 16-е Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998, стр.28-31.
- [9] I.V. Bogdanov, S.S. Kozub, K.P. Myznikov et al. "Design and Test of High Temperature Superconductor Current Lead". – Proceed. of XVI Conf. on Magnet Technology, Tallahassee, USA, 1999, pp.1485-1488.