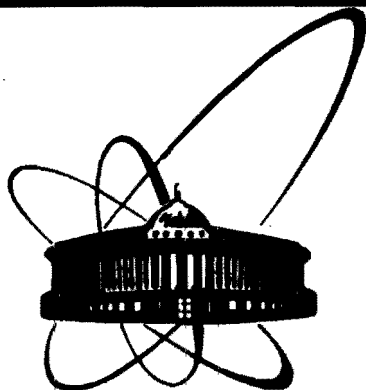


87-604

Суханов В.И.



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

Д.215

P8-87-604

В.И.Дацков, Л.В.Петрова, Г.П.Цвинева

**КРИОГЕННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ  
НА ОСНОВЕ РЕЗИСТОРОВ ТИПА ТВО  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

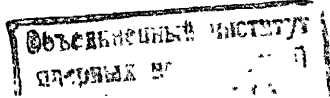
**1987**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие криогенной техники требует надежных, точных и дешевых термометров, работающих в широком диапазоне температур, в сильных магнитных и радиационных полях. Существующие отечественные промышленные криогенные термометры не отвечают всем требованиям для работы в криогенно-магнитных системах создаваемых в ОИЯИ ускорителей. В результате поисковой работы в 1979 г. в криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ впервые было предложено использовать отечественные резисторы типа ТВО<sup>1, 2/</sup> в качестве рабочих криогенных термометров. Исследования и длительный опыт применения показали, что параметры предложенных термометров не хуже, чем у зарубежных термометров фирм "Аллен-Бредли"<sup>3/</sup> и СПИР<sup>4/</sup>, а в отношении рабочего интервала температур и стабильности даже лучше их. На аттестованной градуировочной установке в ЛВЭ ОИЯИ откалибровано большое количество термометров, обеспечивающих нужды ОИЯИ, а также научно-исследовательских организаций СССР. В связи с широким распространением термометров на основе ТВО и их успешной эксплуатации в течение 7 лет возникла необходимость представить все характеристики и обобщить опыт работы с такими термометрами в одной публикации.

## 2. КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ, НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СОСТАВ РЕЗИСТОРА ТВО

В СССР безындуктивные композиционные резисторы типа ТВО (теплостойкий, влагостойкий, объемный) производятся с 1950 г. с номинальными мощностями от 60 Вт до 0,125 Вт, из которых удобно применять резисторы с минимальными размерами, т.е. с номинальной мощностью 0,125 Вт. Промышленность выпускает резисторы ТВО с допускаемыми отклонениями от номинальных сопротивлений  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ . Резисторы ТВО предназначены для работы в электронных устройствах в интервале температур от  $-60^\circ\text{C}$  до  $+155^\circ\text{C}$  в цепях постоянного и переменного тока и в импульсном режиме<sup>5/</sup>. Уровень собственных шумов не превышает 5 мкВ/В для резисторов с сопротивлением до 100 кОм. Существующая технология производства резисторов ТВО не позволяет получать их со строго заданными величинами сопротивлений и температурными коэффициентами сопротивлений (ТКС). Существенными достоинствами резисторов ТВО являются их



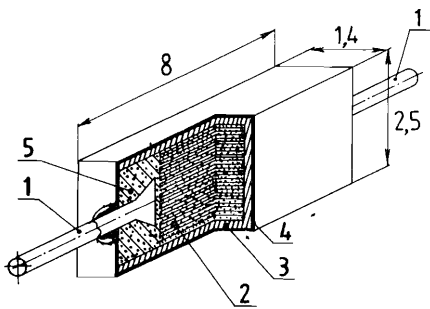


Рис. 1. Конструкция и размеры композиционного резистора ТВО-0,125. 1 – платиновые выводы, 2 – токопроводящая объемная композиция, 3 – керамическая оболочка, 4 – стеклоэмаль, 5 – серебряный порошок.

безындуктивность, хорошая электрическая изоляция конструкции и высокая надежность.

Резистор ТВО-0,125 представляет собой (рис. 1) стержень прямо-

угольной формы с аксиально-запрессованными выводами <sup>1</sup>/<sub>5</sub>. Объемная токопроводящая композиция 2 прямоугольного сечения герметично защищена керамической оболочкой 3 и слоем стеклоэмали толщиной 0,2 мм. Электрические контакты между проводящей композицией 2 и платиновыми выводами 1 осуществлены диффузией серебряного порошка 5 при спекании и прессовании в процессе производства, поэтому они герметичны и имеют повышенную прочность. Токопроводящая композиция состоит из мелкодисперсной (200 ÷ 50 Å) газовой сажи (~ 3 ÷ 5%), борно-свинцового флюса и корундового микропорошка, и ее ТКС зависит от ТКС сажи, имеющего полупроводниковый характер, т.е. сопротивление нелинейно растет с понижением температуры.

### 3. ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИСТОРОВ ТВО – ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ (ТСК)

Измерения зависимости сопротивления резисторов от температуры проводились на градуировочном стенде по 4-проводной схеме с питанием постоянным измерительным током 10 мкА со стабильностью не хуже 10<sup>-5</sup>. Сопротивление определялось по потенциалу с резистора при помощи цифровых вольтметров класса 0,05. Температура контролировалась по образцовому германиевому термометру ТСГ-1 в диапазоне 4,2 ÷ 30 К с точностью 0,02 К и в диапазоне 30 ÷ 273 К по платиновому термометру ТСПН-3 с точностью 0,05 К.

На первом этапе была проверена зависимость от номинального сопротивления относительных изменений сопротивлений резисторов от комнатной до азотной ( $\delta_1$ ) и гелиевой ( $\delta_2$ ) температур. Измерялось от 5 до 10 резисторов каждого номинала из интервала от 10 Ом до 10 кОм. Результаты (рис. 2) показывают, что низкие номиналы мало чувствительны к температуре, и лишь с ~ 80 Ом начинает увеличиваться температурная чувствительность. Для удобства стыковки со вторичной измерительной системой выбран оптимальный номинал резисторов ТВО, равный 1кОм, имеющий хорошую температурную чувстви-

Рис. 2. Зависимость температурных коэффициентов сопротивления  $\delta_1$  и  $\delta_2$  резисторов ТВО-0,125 от номинала  $R_H$  ( $T_0 = 300$  К);

$$\delta_1 = \frac{R_{78\text{ К}} - R_{300\text{ К}}}{R_{300\text{ К}}} \cdot 100\% ;$$

$$\delta_2 = \frac{R_{4,2\text{ К}} - R_{300\text{ К}}}{R_{300\text{ К}}} \cdot 100\% .$$

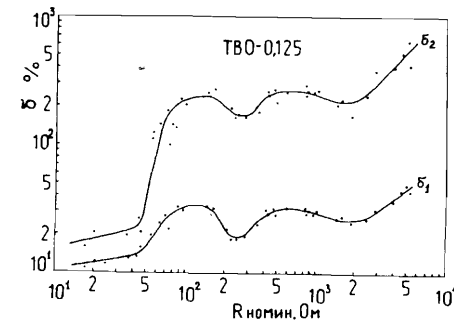
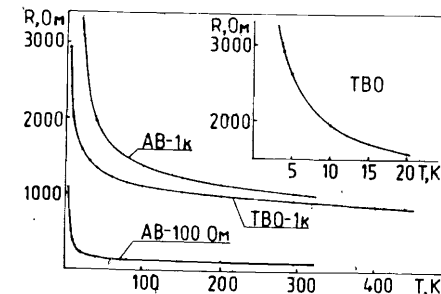


Рис. 3. Зависимость сопротивления  $R$  резисторов ТВО ( $R_H = 1$  кОм) и "Аллен-Бредли" (АВ,  $R_H = 1$  кОм и  $R_H = 100$  Ом) от температуры  $T$ .



тельность, показанную в табл. 1 в сравнении с резистором ( $R_H = 100$  Ом) фирмы "Аллен-Бредли"

На рис. 3 показаны кривые температурной зависимости сопротивления резисторов ТВО ( $R_H = 1$  кОм) и фирмы "Аллен-Бредли" (А-Б,  $R_H = 1$  кОм и  $R_H = 100$  Ом), имеющие вид, близкий к гиперболе.

Таблица 1

Температура	4,2 К	20,4 К	77,4 К	273 К	400 К
Резистор ТВО					
1000 Ом S, Ом/К	714	26,5	3,8	0,8	0,5
Резистор Аллен-Бредли					
100 Ом S, Ом/К	360	7,0	0,47	0,04	—

### 4. ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ТСК

Термометры ТСК, как и другие низкотемпературные термометры, градуируются лишь по небольшому количеству реперных температурных точек, которые чаще всего неравномерно расположены на темпе-

ратурной шкале и число которых определяется используемой интерполяционной формулой. Такая формула позволяет определять сопротивление термометра при любой температуре (и наоборот, температуру по сопротивлению термометра). Поскольку большинство исследователей работают с криогенными термометрами на основе резисторов фирм "Аллен-Бредли" и СПИР, то предложено много интерполяционных формул именно для этих термометров <sup>6,7,8</sup>. Из данных работ можно рекомендовать некоторые формулы для описания калибровки ТСК:

$$\ln R = K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{\ln R}{T}\right)^n; \quad (1)$$

$$\ln R + \frac{K}{\ln R} = A + \frac{B}{T}; \quad (2)$$

$$\ln R = A + \frac{B}{T^n}; \quad (3)$$

где  $R$  — сопротивление термометра при соответствующей температуре  $T$ ;  $K, n, A, B$  — коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого термометра. Такие формулы хорошо применять для грубых (~ 5%) расчетов в небольших интервалах температуры. Коэффициенты формулы (1) легко определяются графически. Для одного из термометров ТСК ( $R_H = 0,91$  кОм) в интервале температуры  $4 \div 20$  К с погрешностью измерения ~ 2% получены следующие коэффициенты уравнения (1):  $n = 0,4$ ;  $K_1 = 6,65995$ ;  $K_2 = 1,11607$ . При температуре 30К погрешность возрастает до 6%. Простая формула (3) из <sup>8</sup> позволяет грубо (~ 5%) рассчитывать градуировочную характеристику термометров ТСК в интервале  $77,4 \div 1,5$  К, причем достаточно иметь всего две реперные точки при 77,4 и 4,2 К. Для одного из термометров ТСК ( $R_H = 1$  кОм) получены следующие коэффициенты:  $A = 2,886$ ;  $B = 1,061$ ;  $n = 0,4$ . Для более широкого интервала температур авторами работы <sup>9</sup> предложено следующее уравнение:

$$T = \sum_{n=0}^m K_n \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^n; \quad (4)$$

где коэффициенты полинома  $K_n$  определяются методом наименьших квадратов,  $R_0$  обычно равно 1000 Ом. В результате обработки градуировок ~ 100 термометров ТСК определено, что для интерполяции с погрешностью ~ 0,5% в интервале  $300 \div 4,2$  К необходимо иметь 11 равномерно расположенных по  $R$  градуировочных точек, при этом требуется брать 7 коэффициентов полинома (4).

Авторами настоящей работы предложено следующее уравнение:

$$T = \sum_{n=1}^m K_n \cdot \left(\ln \frac{R_0}{R}\right)^{n-1}, \quad (5)$$

где  $R_0 = 3000$  Ом;  $m = 8$ .

Это уравнение (5) позволяет описывать градуировку ТСК с погрешностью менее 1% в интервале  $300 \div 2$  К. В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ разработаны программы расчета калибровок по формулам (4), (5) на ЭВМ типа ЕС-1055 и CDC-6500 с использованием стандартной программы FUMILI. Листинг такого расчета содержит сведения о градуировочных точках, погрешности расчета, коэффициентах полинома, расчетную таблицу  $R = f(T)$  с удобным по  $R$  шагом для потребителя термометров. Коэффициенты полиномов (4), (5) выдаются с 5 значащими цифрами, что позволяет легко вводить их в память автоматизированных измерительных систем на основе мини-ЭВМ типа СМ-3, "Электроника-60", МЭРА-60, ДВК и др.

## 5. СТАБИЛЬНОСТЬ ПОКАЗАНИЙ ТСК

С целью изучения стабильности показаний, партия из 10 термометров ТСК ( $R_H = 0,91$  кОм) была сначала подвергнута 10 циклам испытаний: охлаждению до температуры 4,2 К и отогреву до 300 К. Затем в течение 7 лет проводилась периодическая (через 1-6 мес.) проверка калибровки при 3 значениях температуры: 4,2; 77,4 и 273 К. Результаты испытаний показаны на рис. 4, 5, 6, откуда видно, что погрешность показаний 3 термометров в течение 7 лет не превышает: при 4,2 К ~ 0,015 К (~ 0,4%), при 77,4 К ~ 0,7 К (~ 0,9%), при 273 К ~ 2,5 К (~ 0,9%).

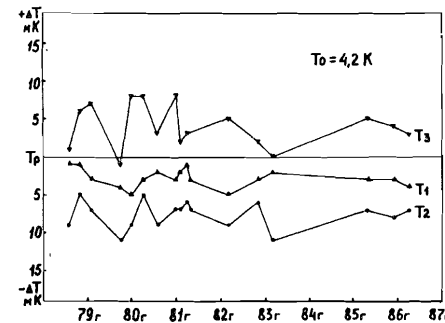


Рис. 4. Относительное отклонение показаний  $\Delta T$  3 контрольных термометров ( $T_1 \div T_3$ ) в течение 7 лет проверки при температуре 4,2 К.

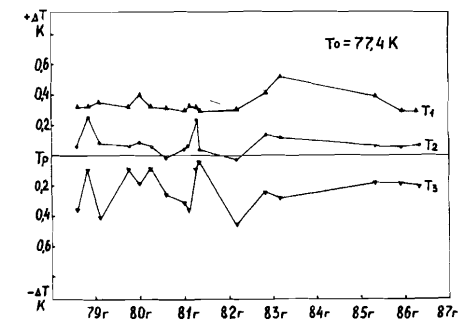


Рис. 5. Относительное отклонение показаний  $\Delta T$  3 контрольных термометров ( $T_1 \div T_3$ ) в течение 7 лет проверки при температуре 77,4 К.

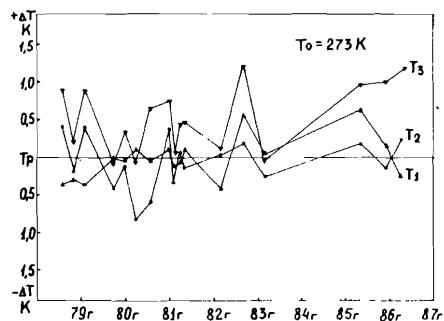


Рис. 6. Относительное отклонение показаний  $\Delta T$  3 контрольных термометров ( $T_1 \div T_3$ ) в течение 7 лет проверки при температуре 273 К.

Было обнаружено, что кратковременные (5 ÷ 10 мин) нагревы при пайке в пределах 1% погрешности не меняют показаний ТСК, в то же время длительный нагрев (~ несколько часов) может существенно изменить показания ТСК.

Партия из 10 ТСК с разными номиналами была подвергнута длительному (до 70 часов) прогреву при температуре ~ 350°С с периодической (через 1-8 часов) проверкой показаний при температурах: 4,2; 77,4, ~ 300К. Оказалось, что уже через один час прогрева сопротивление ТСК начинает уменьшаться, причем для номинала 0,91 кОм это изменение в 3 раза больше, чем для 1 кОм. При температуре 4,2 К погрешности этих термометров после прогрева в течение 70 часов соответственно равны 0,35 и 0,12 К. Дальнейший прогрев при 350°С в течение ~ 15 часов данных термометров существенно не изменил их сопротивление, т.е. в ответственных случаях для термометров можно рекомендовать предварительный прогрев в течение 40-70 часов и затем производить их градуировку.

Влияние величины измерительного тока на погрешность показаний термометров, находящихся в жидком гелии и в газе над уровнем (~ 1 см) жидкого гелия, показано в табл. 2.

Таблица 2

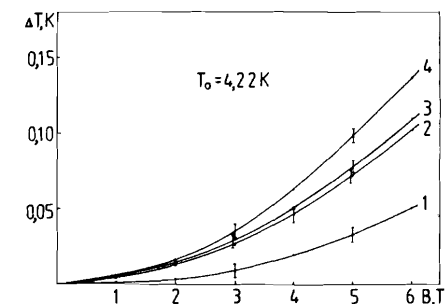
Измерительный ток, мкА	1	10	50	100	300	1000
$\Delta T$ , К в жидком гелии	0,003	0,008	0,030	0,081	0,449	2,371
$\Delta T$ , К в газе	0,021	0,047	0,076	0,149	0,588	2,942

Из таблицы видно, что для погрешности измерений ~ 1% ( $\leq 0,04$  К при  $T = 4,2$  К) измерительный ток в термометре должен быть не более 10 мкА.

## 6. ПОГРЕШНОСТЬ ПОКАЗАНИЙ ТСК В МАГНИТНОМ И РАДИАЦИОННОМ ПОЛЯХ

Поскольку зависимость сопротивления ТСК от температуры имеет нелинейный полупроводниковый характер, то, очевидно, должен про-

Рис. 7. Зависимость погрешности показаний  $\Delta T_B$  от величины магнитного поля  $B$  для термометров с различной температурной чувствительностью  $S_T$  при  $T_0 = 4,22$  К; 1 -  $S_T = 570$  Ом/К; 2 -  $S_T = 710$  Ом/К; 3 -  $S_T = 920$  Ом/К; 4 -  $S_T = 1670$  Ом/К.



явиться магниторезистивный эффект. К тому же выводы резисторов изготовлены из магнитного сплава и являются местными концентраторами внешнего магнитного поля.

Для изучения влияния магнитного поля 8 штук ТСК ( $R_n = 1$  кОм) с разной температурной чувствительностью помещались в апертуру сверхпроводящего соленоида с индукцией магнитного поля до 6 Тл, при этом они омывались свободно кипящим жидким гелием.

На рис. 7 показана зависимость погрешности показаний ( $\Delta T_B$ ) для некоторых термометров ТСК от величины индукции магнитного поля. Из графика видно, что погрешность незначительна ( $< 1\%$ ) вплоть до индукции ~ 3 Тл, но затем она нелинейно возрастает (сопротивление ТСК растет), причем более крутой рост наблюдается у ТСК с большей температурной чувствительностью. Для термометра 1 (рис. 7) с умеренной чувствительностью  $S_T$  (570 Ом/К при  $T = 4,2$  К), аналогичного чаще применяемым в практике, погрешность показаний ( $\Delta T_B$ ) в магнитном поле невелика ( $\leq 1\%$  при 6 Тл) и хорошо описывается зависимостью, полученной экспериментальным путем:

$$\Delta T_B = 2,04 \cdot 10^{-6} \cdot S_T \cdot B^2; \pm 0,005 \text{ К}, \quad (6)$$

где  $S_T$  — чувствительность термометра при  $T = 4,2$  К;  $B$  — индукция магнитного поля (Тл). Существенного влияния ориентации ТСК в магнитном поле на погрешность показаний не обнаружено.

Под воздействием радиационного облучения в ускорителях криогенные термометры нагреваются и могут менять свои характеристики, причем наиболее вредное воздействие могут оказать гамма-лучи и нейтроны, обладающие большой проникающей способностью  $\sim 10^7$ . Партия из 10 штук ТСК облучалась на реакторе быстрыми нейтронами интенсивностью  $\phi = 3 \cdot 10^{12}$  н.с/см<sup>2</sup> и энергией  $E_n \geq 0,1$  МэВ.

Испытания показали, что погрешность показаний при 4,2 К заметно возрастает (сопротивление ТСК растет), начиная с интегрального потока  $\sim 10^{16}$  н/см<sup>2</sup> и достигает ~ 0,04 К в потоке  $\sim 10^{17}$  н/см<sup>2</sup>. Радиационная стойкость ТСК на несколько порядков выше, чем у полупроводниковых термометров.

## 7. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТСК

Точность измерений истинной температуры в нестационарных тепловых процессах зависит от многих факторов, в том числе от тепловой инерции и теплоемкости самого термометра.

В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ с помощью методики импульсно-го нагрева<sup>11/</sup> были проведены измерения названных параметров в интервале  $4 \div 10$  К. На рис. 8 представлены зависимости тепловой инерции  $\tau$  ТСК ( $R_H = 1$  кОм) и термометра "Аллен-Бредли" ( $R_H = 50$  Ом) от температуры. Наибольшим быстродействием обладает ТСК, у которого при 4,2 К  $\tau \approx 1$  мс, в то время как у термометра "Аллен-Бредли"  $\tau \approx 8$  мс. На рис. 9 показаны зависимости собственной (только композита ТСК) и полной (вместе с выводами  $\sim$  по 5 мм) теплоемкости ТСК ( $R_H = 1$  кОм, масса  $\sim 0,075$  г) от температуры в сравнении с графитом и пирексом. В соответствии с составом резистора ТВО (ТСК), кривые теплоемкости занимают положение между графитом и пирексом, и величину полной теплоемкости можно описать экспериментальной зависимостью

$$C_T = (A \cdot T + B \cdot T^3) \cdot 10^{-6}; \quad [Дж/г \cdot К], \quad (7)$$

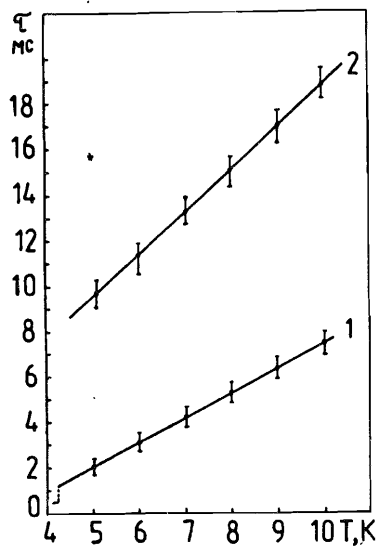


Рис. 8. Зависимость величины тепловой инерции  $\tau$  термометров от температуры  $T$ : 1 – ТСК; 2 – фирмы "Аллен-Бредли".

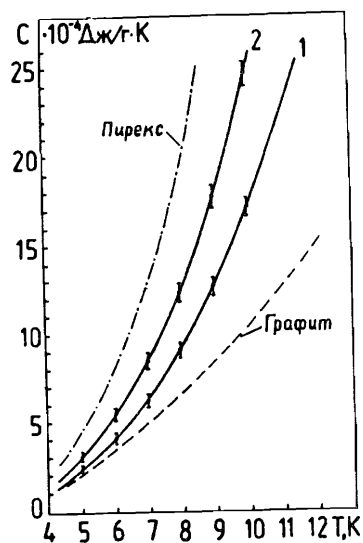


Рис. 9. Зависимость теплоемкости  $C$  термометра ТСК от температуры  $T$ : 1 – собственная теплоемкость (композит), измеренная по импульсной методике; 2 – полная теплоемкость, измеренная методом термической релаксации.

где  $C_T$  – теплоемкость термометра при температуре  $T$ ;  $A = 0,99$ ;  $B = 1,70$ . При температуре  $T = 4,2$  К  $C_T = 1,3 \times 10^{-4}$  Дж/г К.

## 8. УНИФИКАЦИЯ ТЕРМОМЕТРОВ

Для диагностики работы крупных сверхпроводящих магнитных систем ускорителей желательнее применять партии термометров с одинаковыми термометрическими характеристиками  $R = f(T)$ . В то же время промышленность не производит партий резисторов с одинаковыми характеристиками  $R = f(T)$ , т.е. их необходимо подвергать сортировке. В ЛВЭ ОИЯИ в связи с поступившими запросами из других организаций проделана статистическая обработка характеристик  $R = f(T)$  большой партии (1100 шт.) резисторов ТВО-0,125 ( $R_H = 1,1$  кОм) с заводским разбросом сопротивлений  $\sim 5\%$ . Гистограммы распределения сопротивления ТВО для одной из партий (550 шт.) при температурах 4,2 К; 77,4 К; 300 К показаны на рис. 10-12. На гистограмме (рис. 10) можно выделить основную группу резисторов ( $\sim 65\%$  от всей партии) с разбросом сопротивлений относительно суммарного среднего в группе  $\sim 52\%$  и дополнительную группу ( $\sim 35\%$  от всей партии) с разбросом сопротивлений  $\sim 105\%$ . На гистограмме (рис. 11) также можно выделить основную группу резисторов ( $\sim 66\%$  от всей партии) с разбросом сопротивлений в группе  $\sim 10\%$ , дополнительную группу ( $\sim 34\%$  от всей партии) с разбросом  $\sim 9\%$ . Более детальный анализ гистограмм показал, что резисторы из основной и дополнительной групп при 4,2 К соответственно находятся в основной и дополнительных группах при 77,4 К. Для применения рекомендуются резисторы из основной группы, которую можно формировать уже при  $T = 77,4$  К, как обладающие лучшей повторяемостью показаний после нескольких перепаек при монтаже. По результатам обработки можно сделать следующие выводы:

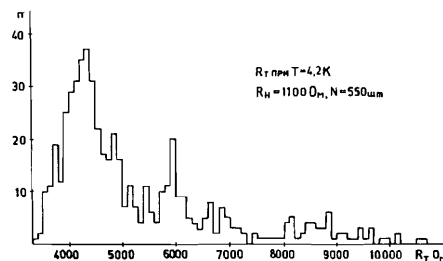


Рис. 10. Гистограмма распределений сопротивления резисторов ТВО ( $R_H = 1,1$  кОм) в партии 550 шт. при  $T = 4,2$  К.

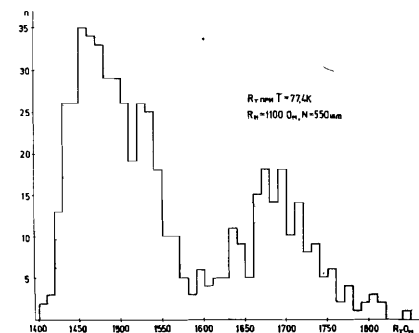


Рис. 11. Гистограмма распределения сопротивления резисторов ТВО ( $R_H = 1,1$  кОм) в партии 550 шт. при  $T = 77,4$  К.

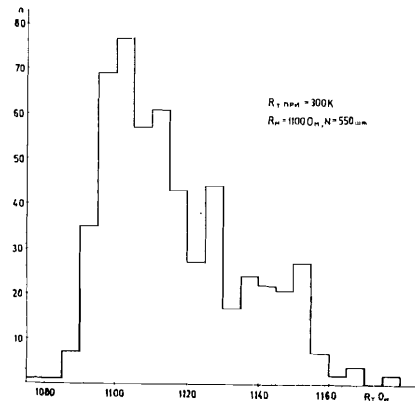


Рис. 12. Гистограмма распределения сопротивления резисторов ТВО ( $R_n = 1,1 \text{ кОм}$ ) в партии 550 шт. при  $T = 300 \text{ К}$ .

а) из 1100 штук резисторов ТВО с 5% заводским разбросом удалось отобрать ~ 24 группы по  $10 \div 15$  штук одинаковых термометров с погрешностью  $\sim 1 \div 1,5\%$  в группе;

б) отбор больших групп одинаковых термометров будет более успешным при использовании  $\geq 1000$  ТВО в партии с 1% заводским разбросом сопротивлений.

## 9. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТСК

С 1979 г. в криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ накоплен опыт по измерению температур с помощью ТСК, установленных на стенке сосуда со стороны жидкого гелия, в гелиевых трубопроводах при давлениях до 30 бар, на поверхности объекта со стороны вакуума и др. В каждом новом случае применения ТСК конструкция его крепления может быть совершенно иной, чем существующие. Но всегда надо иметь в виду, что повышенную погрешность показаний ТСК могут вызывать следующие причины:

а) повышенный теплоприток по измерительным проводам к термометру при отсутствии или плохом теплоотводе с проводов на температурном уровне  $\sim 10 \div 80 \text{ К}$ ;

б) отсутствие экранирования от теплопритока излучением к термометру в вакууме от окружающих теплых ( $100 \div 300 \text{ К}$ ) поверхностей;

в) плохой тепловой контакт термометра с местом измерения;

г) утечка измерительного тока через плохую изоляцию проводов;

д) искажения электрического сигнала от термометра, паразитные термо-ЭДС спаев измерительных проводов из константана и др.

Тщательный обзор погрешностей показаний термометров и методов их устранения приведены в работе <sup>18/</sup>.

В качестве измерительных проводов нами используется манганин марки ПЭМС диаметром 0,1 мм в эмаливой изоляции. В 4-проводной схеме измерения нами применяется скрутка длиной  $1 \div 2 \text{ м}$  с шагом скрутки  $1 \div 2 \text{ мм}$ .

Измерительные провода от разъема криостата через  $\sim 0,5 \text{ м}$  приклеиваются клеем БФ-2 или БФ-4 (длина приклеенных проводов  $\sim 0,3 \div 0,4 \text{ м}$ ) к "холодной" поверхности (обычно выходные гелиевые или азотные трубки). Для удобства эксплуатации нижняя часть измерительных

проводов обычно заканчивается промежуточным электрическим разъемом, после которого идет разводка проводов к термометрам, установленным в разных местах. Обычно на промежуточном разъеме формируется последовательная электрическая цепь всех термометров, питаемая одним источником стабильного тока. В качестве измерительных проводов можно применять и константан, но в этом случае нужно очень тщательно термостатировать спаи, чтобы не возникали или взаимно компенсировались паразитные термо-ЭДС, которые могут достигать величины  $\sim 10 \div 50\%$  от полезного сигнала.

По сравнению с константановым проводом из манганина в спае с медью имеет термо-ЭДС на 3 порядка меньше и в то же время маленькую теплопроводность.

Хорошие результаты (погрешность измерения  $\sim 0,02 \div 0,04 \text{ К}$  при 4,2 К) получаются при помещении термометра в отверстие (диаметр  $\sim 3 \text{ мм}$ , глубина  $\sim 15 \text{ мм}$ ) стенки из меди с заполнением силиконовой вакуумной замазкой. Заполнение отверстия с датчиком замазкой необходимо вести с прогревом до  $\sim 60 \div 70^\circ \text{ С}$  и стараться исключить в массе пузырьки воздуха, которые потом могут привести к повышенной погрешности измерений температуры.

На рис. 13 показано крепление термометра ТСК к стенке из нержавеющей стали (толщиной 2 мм) гелиевого сосуда криостата со стороны жидкого гелия. С помощью такого крепления ТСК изучался нестационарный теплоприток через стенку к жидкому гелию при авариях криостата <sup>12/</sup>.

На рис. 14 показана конструкция крепления ТСК в гелиевом трубопроводе с выводом измерительных проводов в вакуум. Такая конструкция применена в рефрижераторе КГУ-1600/4,5 в трубопроводах с давлением до 25 бар.

Существуют также крепления ТСК с помощью пропаиваемых медных чехлов, замоноличивания ТСК в обмотках сверхпроводящих магнитов при изготовлении, но такие крепления являются более сложными и не всегда дают успешные результаты.

Не рекомендуется:

а) многократно гнуть выводы резистора возле основания;

б) греть термометр паяльником до  $200 \div 250^\circ \text{ С}$  свыше 3-5 мин.

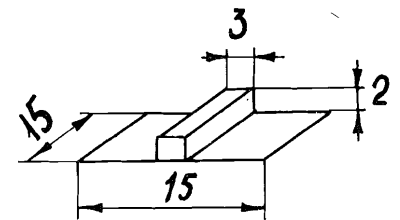


Рис. 13. Конструкция крепления ТСК на внутренней стенке гелиевого сосуда: 1 – термометр ТСК; 2 – медный теплопровод толщиной 0,1 мм; 3 – покрытие из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, 4 – стенка гелиевого сосуда из нержавеющей стали толщиной 2 мм.

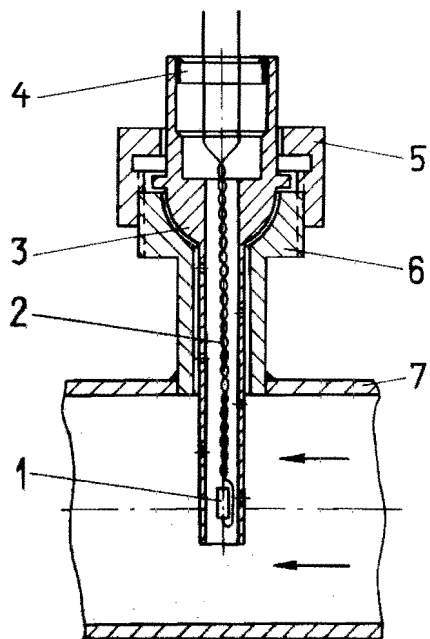


Рис. 14. Конструкция крепления ТСК в гелиевом трубопроводе: 1 – термометр ТСК, 2 – измерительные провода (скрутка 2 МГТФ-0,07), 3 – защитный чехол, 4 – доннышко с выводами, 5 – накидная гайка, 6 – штуцер, 7 – труба.

### 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По своим параметрам резисторы типа ТВО в качестве криогенных термометров вполне удовлетворяют требованиям технического эксперимента на криогенных установках в широком интервале температур  $2 \div 450$  К. При правильном применении они дают точность измерения температуры не хуже 1%. Они получили массовое применение на всех криогенных установках ОИЯИ и во многих организациях СССР.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дацков В.И. – ПТЭ, 1981, №4, с.253.
2. Дацков В.И. В кн.: Труды 2-й Всесоюзной конференции по техническому использованию сверхпроводимости. Л.: ЛНИВЦ, 1984, т.2, с.250. Препринт ОИЯИ 8-83-717, Дубна, 1983.
3. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. М.: Мир, 1966, с.158.
4. Уайт Г.К. Экспериментальная техника в физике низких температур. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1961, с.150.
5. Гребенкина В.Г. и др. Объемные резисторы. Киев: Наукова думка, 1976, с.26.
6. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. М.: Энергия, 1980.
7. Менке Х., Цвинева Г.П. Препринт ОИЯИ Р8-9055, Дубна, 1975.
8. Корр F.J., Achworth T. – Rev. Sei. Instr. U3, No2, 1972, p.327.
9. Дацков В.И. и др. Препринт ОИЯИ 10-81-200, Дубна, 1981.
10. Гальперин Б.С. Непроволочные резисторы. Л.: Энергия, 1968, с.89.
11. Дацков В.И. и др. Препринт ОИЯИ 8-83-45, Дубна, 1983.
12. Бартнев В.Д. и др. Препринт ОИЯИ 8-85-269, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 июля 1987 года.

Дацков В.И., Петрова Л.В., Цвинева Г.П.  
Криогенные термометры на основе резисторов  
типа ТВО и их применение

Р8-87-604

В публикации представлены результаты исследования характеристик криогенных термометров на основе резисторов типа ТВО-0,125 ( $R_H = 1$  кОм). При температуре 4,2 К: повторяемость показаний в течение 7 лет не хуже  $\sim 0,015$  К ( $\sim 0,4\%$ ); чувствительность некоторых экземпляров от 570 Ом/К до 1600 Ом/К; погрешность показаний в магнитном поле 6 Тл  $< 1\%$ ; погрешность показаний после облучения быстрыми нейтронами потоком  $10^{17}$  н/см<sup>2</sup>  $< 1\%$ ; теплоемкость  $\sim 1,3 \cdot 10^{-4}$  Дж/г·К; тепловая инерция  $\sim 1$  мс. Приведены некоторые интерполяционные формулы и даны рекомендации по применению криогенных термометров в установках.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Datskov V.I., Petrova L.V., Tsvineva G.P.  
Cryogenic Thermometers Based on TWO Type  
Resistors and Their Application

Р8-87-604

Results of a study of the characteristics of cryogenic thermometers based on TWO-0.125 resistors ( $R_H = 1$  kOhm) are presented. At a temperature of 4.2 K the repetition of values during 7 years is no worse than 0.015 K ( $\sim 0,4\%$ ), the sensitivity of some samples is from 570  $\Omega$ /K to 1600  $\Omega$ /K, the error in a magnetic field of 6 T is  $< 1\%$ , the error after the radiation by  $10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> fast neutrons is  $< 1\%$ , the heat capacity is  $\sim 1,3 \cdot 10^{-4}$  J/g.K, and the thermal inertia is  $\sim 1$  ms. Some interpolation formulae are presented. Recommendations on the application of the cryogenic thermometers in setups are given.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987