

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



4004/2-75

P8 - 9055

Х. Менке, Г. П. Цвинева

УГОЛЬНЫЕ РЕЗИСТОРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

1975

P8 - 9055

Х.Менке, Г.П.Цвинева

**УГОЛЬНЫЕ РЕЗИСТОРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Направлено в журнал "Экспериментальная техника
физики" (ГДР)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Менке Х., Цвинева Г.П.

P8 - 9055

Угольные резисторы для измерения низких температур

В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ создана установка для калибровки угольных резисторов в пределах температур $2 \leq T \leq 77\text{K}$. Рассмотрены вопросы точности различных градуировочных формул и разработана программа для ЭВМ калибровки угольных резисторов фирмы Аллен Бредли. Приведены результаты калибровки в различных пределах температур и рассмотрен вопрос стабильности и повторяемости показаний резисторов Аллен Бредли.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

Mencke H., Zwinjowa G.P.

P8 - 9055

Carbon Resistors for Low Temperature Measurements

An apparatus for calibrating carbon resistors in the temperature range $2 \leq T \leq 77\text{K}$ has been manufactured at the Cryogenic Division of the Laboratory of High Energies of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna. The problem concerning the accuracy of various calibrating equations is discussed. A program for computation of calibrating curves is described. Results of calibration for various temperature ranges and the problem of reproducibility and stability of measurements with Allen Bradley resistors is discussed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1975

1. ВВЕДЕНИЕ

Угольные резисторы более 20 лет используются для измерения низких температур ^{/1,2/}. В настоящее время такие резисторы применяются в пределах температур $0,01 < T \leq 77\text{K}$. Их преимущество - большая чувствительность, малая теплоемкость и незначительное изменение сопротивления в магнитном поле. Привлекает также довольно низкая цена таких резисторов, которые в 1000 раз дешевле германиевых термометров. К недостаткам резисторов относятся: малая надежность повторяемости показаний сопротивления и небольшая теплопроводность. Обычно в качестве термометров применяются резисторы фирмы Аллен Бредли ^{/3/} и реже - фирмы Спир ^{/4/}. Параметры резисторов других фирм значительно хуже. В данной статье рассматривается способ применения угольных резисторов фирмы Аллен Бредли в пределах температур $2 \leq T \leq 300\text{K}$.

Дано описание установки калибровки и формулы градуировки упомянутых выше резисторов в различных пределах температур. Приведены экспериментальные результаты.

2. УСТАНОВКА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ РЕЗИСТОРОВ

Для калибровки угольных резисторов с помощью германиевого термометра изготовлена установка. Низкотемпературная часть ее ^{/рис. 1/} помещается в криостат диаметром 80 мм с жидким гелием. Внутри колпака 1 с двойными стенками, пространство между которыми

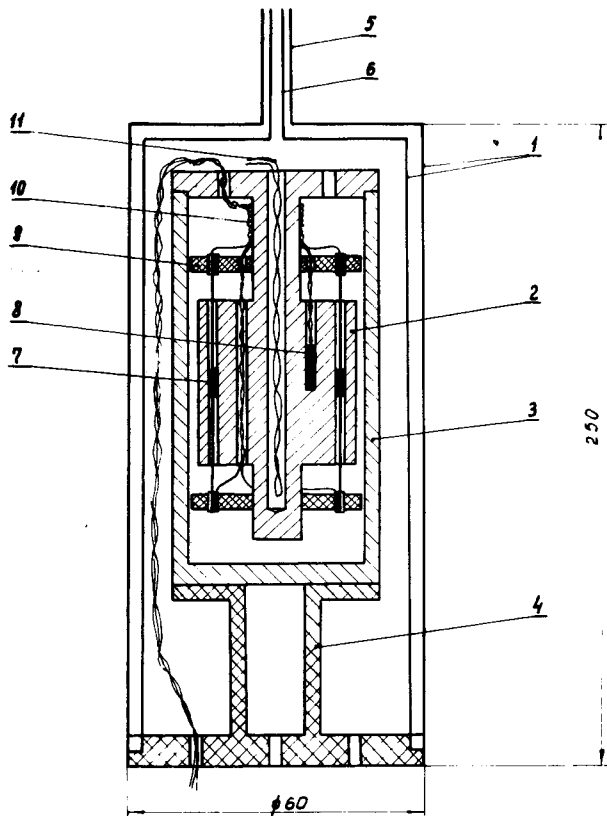


Рис. 1. Низкотемпературная часть установки для калибровки угольных резисторов. 1 - вакуумный кожух; 2 - медный блок; 3 - медный экран; 4 - подставка; 5 - трубка откачки; 6 - обратный поток; 7 - угольные резисторы; 8 - германиевый термометр; 9 - контакты; 10 - потенциальные концы; 11 - нагреватель.

вакуумировано, находятся медный блок 2 и медный экран 3. Подставка 4 из текстолита фиксирует блок в кожухе. В верхней части кожуха 1 имеются трубка 5 для вакуумирования кожуха и трубка 6 для гелиевого обратного потока. Угольные резисторы 7 и германиевый термометр 8 находятся в отверстиях блока. Электрические контакты резисторов и термометра расположены на изоляционных шайбах 9. Все потенциальные концы 10 приклеены к верхней части блока 2 для уменьшения теплопритока. Это не-

обходимо, если температура блока выше температуры жидкого гелия в криостате. При температурах ниже 4,2 К криостат откачивается, и с помощью мембранного маностата давление в нем поддерживается постоянным. Криостат в это время соединен с трубкой обратного потока 6. Для установления температуры выше 4,2 К перекрывается трубка обратного потока 6 и с помощью нагревателя 11 повышается температура блока, при этом блок находится в газообразном гелии. Температура блока поддерживается постоянной с помощью регулировки тока нагревателя /рис. 2/. На операционный усилитель 1 подаются сигналы от угольного резистора 2 и потенциометра 3. В зависимости от разности этих сигналов транзистор 4 пропускает ток через нагреватель 5. Сопротивление германиевого термометра и угольных резисторов определяется, когда температура блока находится в стационар-

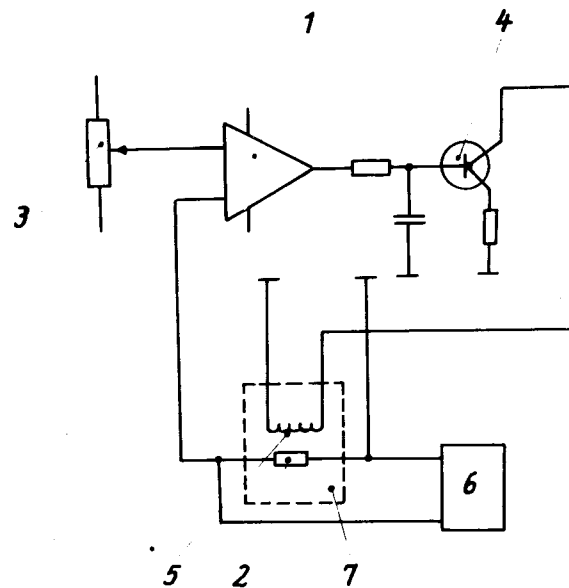


Рис. 2. Схема регулировки тока нагревателя. 1 - операционный усилитель; 2 - угольный резистор; 3 - потенциометр для установления температуры; 4 - транзистор для питания нагревателя; 5 - нагреватель; 6 - стабилизатор тока; 7 - медный блок.

ном режиме. Через датчики пропускается измерительный ток, и падение напряжения на них измеряется с помощью цифрового вольтметра /рис. 3/. Чтобы исключить ошибки, обусловленные термопарными и контактными напряжениями, измерения проводятся с двумя направлениями

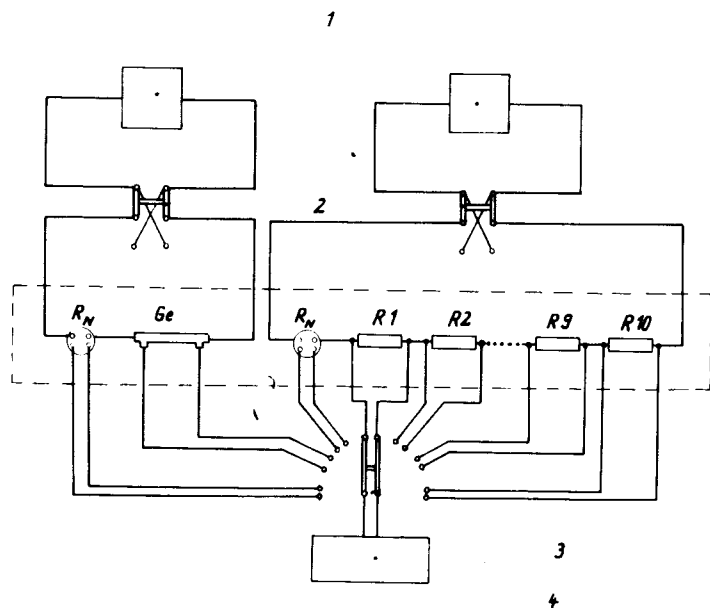


Рис. 3. Схема измерения падения напряжения на германиевый термометр Ge и угольные резисторы $R_1 \dots R_{10}$. 1 - стабилизатор тока; 2 - переключатель для переключения; 3 - переключатель потенциальных концов; 4 - цифровой вольтметр; R_N - образцовая катушка.

тока /при помощи переключателя 2/. Для дальнейшей обработки берутся среднеарифметические значения определяемой величины. При помощи переключателя 3 потенциалы образцовых катушек R_N , германиевого термометра Ge и угольных резисторов $R_1 \dots R_{10}$ подаются на цифровой вольтметр 4. Измерительный ток источников 1 выдерживается постоянным в диапазоне $10 \text{ мкА} \leq J \leq 200 \text{ мкА}$ с помощью стабилизатора тока /рис. 4/.

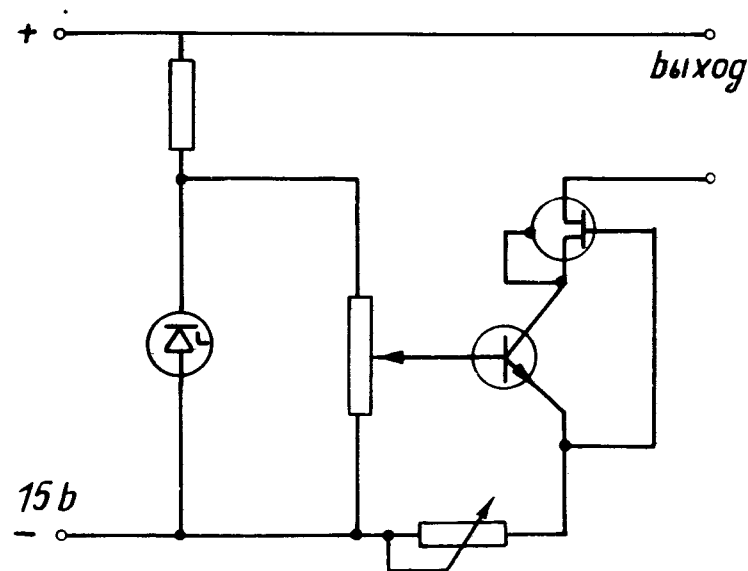


Рис. 4. Стабилизатор тока с полевым транзистором для тока $10 \leq J \leq 200 \text{ мкА}$.

3. ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

3.1. Измерение сопротивления германиевого термометра и угольных резисторов

Сопротивление датчика определяется путем измерения падения напряжения на датчике и образцовой катушке. Если во время измерения рабочий ток считать постоянным, то ошибка определения сопротивления примерно равна двойной погрешности вольтметра. Цифровой вольтметр имеет в различных пределах измерений чувствительность от 10 до 0,1 мкВ. Эта ошибка пренебрежимо мала.

3.2. Термометр

Используемый эталонный термометр имеет гарантируемую точность $\pm 2 \text{ мК}$ в диапазоне $2 \leq T \leq 32 \text{ К}$. На

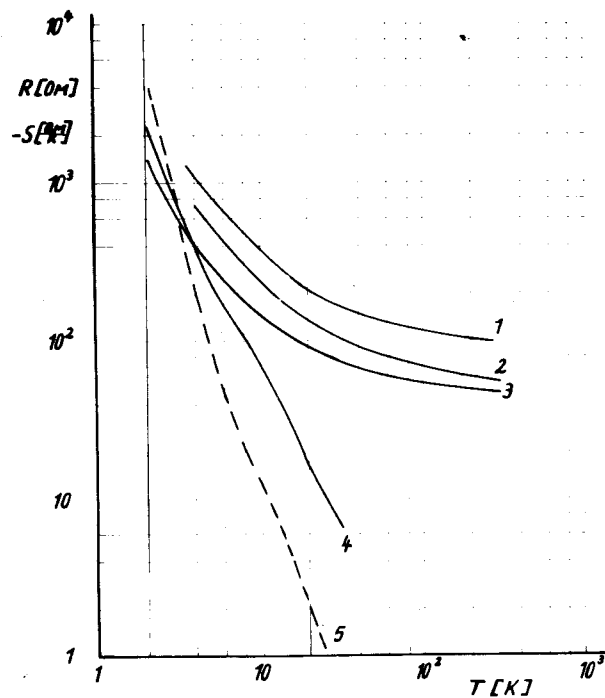


Рис. 5. Зависимость сопротивления R и чувствительности S от температуры T для резисторов фирмы Аллен Бредли АВ и германиевого термометра, 1 - АВ 100 Ом, 1/4 Вт; 2 - АВ 56 Ом, 1/2 Вт; 3 - АВ 47 Ом, 1/4 Вт; 4 - Ge-термометр; 5 - чувствительность Ge-термометра.

рис. 5 показана зависимость $R = f(T)$ термометра, его чувствительность и типичные кривые угольных резисторов фирмы Аллен Бредли.

3.3. Нестабильность температуры в блоке

Во время измерения потенциала десяти угольных резисторов температура блока меняется в пределах /3-10/ мК. Если измерения проводить в следующем порядке: германиевый термометр - угольный резистор -

германиевый термометр, то ошибка от нестабильности температуры в блоке будет пренебрежимо мала.

3.4. Нагрев угольных резисторов измерительным током

Ошибка от нагрева датчика, обусловленная измерительным током, исследовалась в ряде работ /2,5,6,7/, и результаты, в принципе, совпадают. На рис. 6 показано, как повышается температура резистора фирмы Аллен

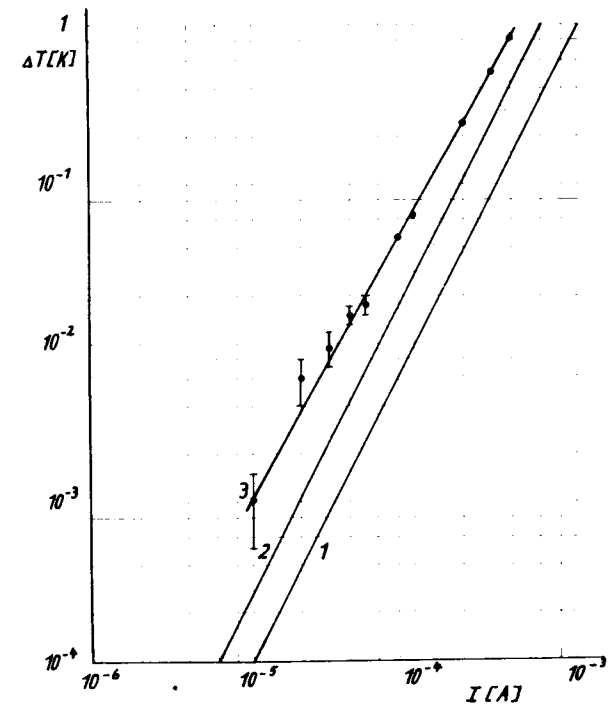


Рис. 6. Ошибка ΔT от нагрева резисторов фирмы Аллен Бредли АВ, измерительным током. 1. АВ - 100 Ом, 1/2 Вт по /2/; 2 - АВ 100 Ом, 1/2 Вт по /7/; 3 - АВ 100 Ом, 1/4 Вт в вакууме.

Бредли. В случае кривой 3 резистор был приклеен к гелиевой ванне и находился в вакууме. При этом

$$\Delta T = T(I) - T(I_0), \quad /1/$$

где $I_0 = 5$ мкА. Рабочий ток при градуировке на описанной установке составлял $I = 10$ мкА и, следовательно, ошибка $\Delta T < 1$ мК.

3.5. Градуировочная формула для угольных резисторов фирмы Аллен Бредли

В отличие от полупроводниковых термометров, для которых теоретически выведена зависимость $R=f(T)$, для резисторов ее нет.

В литературе имеется целый ряд эмпирических формул, измерительные данные которых в различных пределах температур повторяются с разной степенью точности. В работах /1,2/ предложены простые формулы, которые в настоящее время применяются чаще всего.

$$\ln R = K_1 + K_2 \left(\frac{\ln R}{T} \right)^{1/2} \quad /2/$$

$$\ln R + \frac{K}{\ln R} = A + \frac{B}{T} \quad /3/$$

Особенно удобно уравнение /2/, т.к. для него очень просто графически найти постоянные K_1, K_2 . Уравнение /3/ можно переписать в виде

$$\left(\frac{\ln R}{T} \right)^\alpha = C_0 + C_1 \ln R + C_2 (\ln R)^2 \quad /4/$$

При $\alpha = 1$ из уравнения /4/ может быть получено уравнение /3/. В работе /8/ показано, что самые точные

результаты получаются при $\alpha = 1,05$. Без члена $C_2 (\ln R)^2$ при $\alpha = 0,5$ получается уравнение /2/. Оптимальная точность достигается при $\alpha = 0,55^{8/}$. Более общее уравнение с любым числом постоянных, согласно /9/, имеет вид

$$\frac{1}{T} = \sum_{n=-l}^{n=l} K_n' (\ln R)^n \quad /5/$$

Формула, которая обычно применяется для калибровки германиевых термометров, выражается по /10/ в виде

$$\ln R = \sum_{n=0}^{n=m} K_n'' (\ln T)^n \quad /6/$$

С помощью таких уравнений имеется возможность вычислить зависимость $T=f(R)$ и, наоборот, $R=f(T)$.

4. РАСЧЕТНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ РЕЗИСТОРОВ ФИРМЫ АЛЛЕН БРЕДЛИ

При создании программы калибровки для ЭВМ в настоящей работе использованы уравнение /2/ в виде $R=f(T)$ и $T=f(R)$, уравнение /5/ с тремя постоянными, которое совпадает с уравнением /3/, и уравнение /5/ с пятью и семью постоянными. Кроме этого, используется еще уравнение /6/ с семью постоянными. Брать число постоянных более семи не имеет смысла, потому что точность при этом повышается незначительно. Формулы могут быть представлены в общем виде как

$$y = \sum_{k=1}^m K_k f_k(x) = K_1 f_1(x) + K_2 f_2(x) + \dots + K_m f_m(x), \quad /7/$$

у и x - здесь R или T, согласно формулам /2/, /5/, /6/. Имеем n измеряемых данных R_j и T_j /j=1, ... n/ для определения K_k . Находим минимум суммы от разностей между измеряемыми данными y_j и вычисляе-

$$\text{мыми данными } y = \sum_{k=1}^m K_k f_k(x_j) \\ Q = \sum_{j=1}^n \left[y_j - \sum_{k=1}^m K_k f_k(x_j) \right]^2 = \text{Minimum} \quad /8/$$

Первая производная от K_k дает m уравнений

$$\frac{1}{2} \frac{dQ}{dK_i} = \sum_{j=1}^n [y_j - \sum_{k=1}^m K_k f_k(x_j)] f_i(x_j) = 0 \quad /9/$$

$i = 1, 2, \dots, m$

Из уравнения /9/ вытекает система уравнений

$$K_1 \sum_{j=1}^n f_1(x_j) f_1(x_j) + \dots + K_m \sum_{j=1}^n f_1(x_j) f_m(x_j) = \sum_{j=1}^n y_j f_1(x_j)$$

$$K_1 \sum_{j=1}^n f_m(x_j) f_1(x_j) + \dots + K_m \sum_{j=1}^n f_m(x_j) f_m(x_j) = \sum_{j=1}^n y_j f_m(x_j)$$

/10/

Решив систему /10/, получаем значения постоянных K_k , необходимых для градуировочной формулы. Программа калибровки написана для ЭВМ CDC-6200 на языке Фортран.

Вводными данными для программы являются экспериментальные значения сопротивлений резисторов Аллен Бредли и температуры. Программа выдает вычисляемые значения сопротивлений и температур, ошибки вычислений в градусах Кельвина и в процентах, усредненные ошибки и калибровочную таблицу.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ

5.1. Грубая калибровка

Если требуется небольшая точность, то достаточно простой калибровки в жидком азоте и в жидком гелии. По этим двум точкам с помощью уравнения /2/ графически может быть получена градуировочная формула. Ошибка этого способа показана на рис. 7. При этом

$$\Delta T = T_{гр} - T, \quad /11/$$

$T_{гр}$ - градуировочная температура, T - действительная температура.

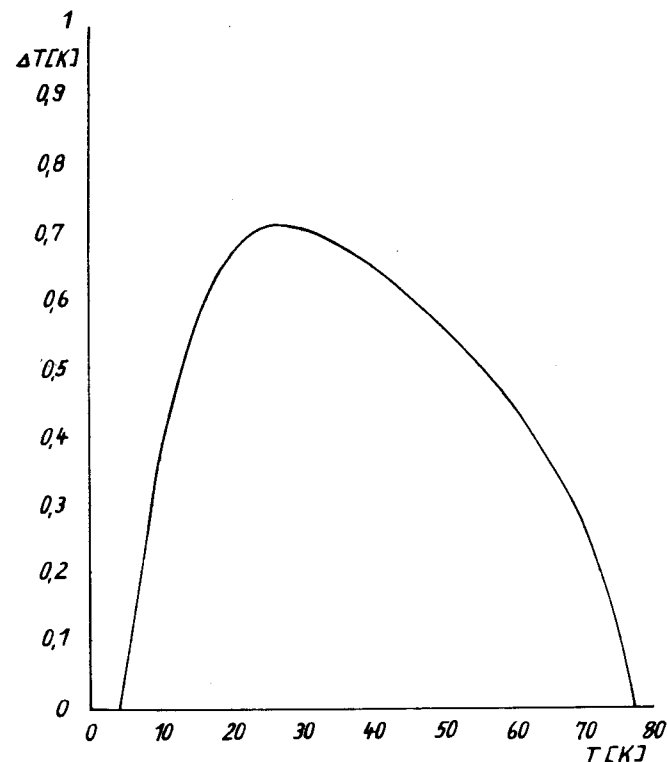


Рис. 7. Ошибка ΔT калибровки с двумя точками в диапазоне температур $4,2 \leq T \leq 77K$.

Есть возможность вычислить усредненную калибровочную кривую нескольких датчиков Аллен Бредли. В табл. 1 показана ошибка при усредненной калибровке шести штук датчиков. Для ее проведения из десяти датчиков выбраны шесть с наиболее близкими сопротивлениями при комнатной температуре, измерены их сопротивления при трех температурах, вычислены среднеарифметические величины сопротивлений и по ним с помощью программы интерполяции получена зависимость $R = f(T)$.

Таблица 1
Усредненная калибровка резисторов Аллен Бредли
47 Ом, 1/4 Вт

| № | R/Ом/ | | | ΔT при 4,2 К |
|-------|-------|--------|--------|-------------------------|
| | 293 К | 77 К | 4,2 К | |
| 1 | 47,2 | 55,34 | 353,0 | 0,128 |
| 2 | 47,3 | 57,47 | 358,1 | 0,084 |
| 3 | 47,8 | 57,55 | 359,0 | 0,077 |
| 4 | 47,8 | 57,57 | 379,3 | -0,084 |
| 5 | 47,9 | 57,60 | 381,1 | -0,097 |
| 6 | 47,9 | 57,70 | 381,5 | -0,100 |
| R_M | 47,65 | 57,538 | 368,66 | ± 0 |

R_M - среднее арифметическое датчиков 1...6
 ΔT^M - ошибка при усредненной калибровке.

5.2. Точная калибровка

Результаты калибровки 20 точек в диапазоне $2 \leq T \leq 30$ К, в жидком азоте и при комнатной температуре показаны в табл. 2. Из таблицы можно видеть, в каких пределах какие формулы выгодно использовать.

- $2 \leq T \leq 300$ К: Формула с тремя постоянными хуже, чем с двумя, лучшая формула /6/;
- $2 \leq T \leq 77$ К: максимальная ошибка с тремя постоянными больше, чем с двумя. Между уравнениями /5/ и /6/ с семью постоянными практически разницы нет;
- $2 \leq T \leq 30$ К: точность нарастает с числом постоянных;
- $2 \leq T \leq 10$ К: максимальная точность достигается уже при пяти постоянных.

Распределение ошибки в большой области температур показано на рис. 8 и 9. Недостатком всех уравнений является то, что экстраполяция практически невозможна, потому что получается большая ошибка.

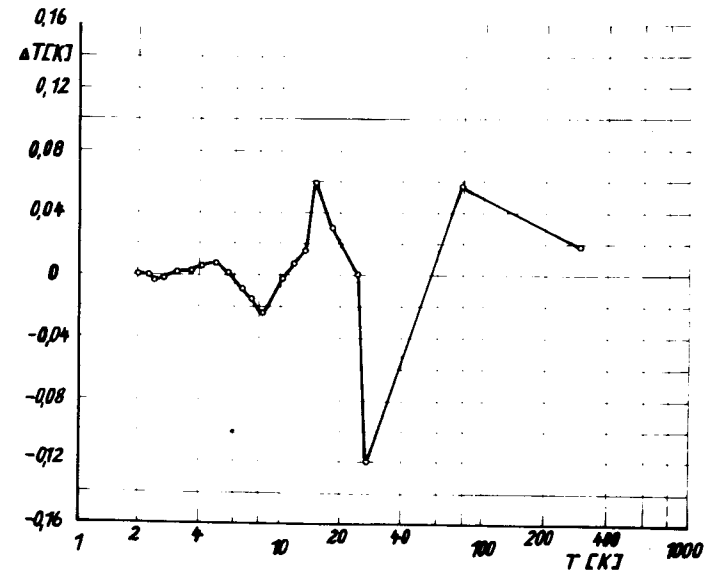


Рис. 8. Распределение ошибки ΔT для калибровочной формулы /6/ с 7 постоянными в диапазоне температур $2 \leq T \leq 300$ К.

Таблица 2
 Ошибка градуировочных формул в процентах
 $2 \leq T \leq 300\text{K}$

| Уравнение | (2) | (3) | (5) | (7) | (6) |
|------------------|-----|-----|------|------|------|
| m | 2 | 3 | 5 | 7 | 7 |
| ΔT_{max} | 42 | 200 | 3,8 | 1,4 | 0,4 |
| ΔT_{cp} | 3,7 | 10 | 0,52 | 0,22 | 0,14 |

$2 \leq T \leq 77\text{K}$

| Уравнение | (2) | (3) | (5) | (7) | (6) |
|------------------|-----|-----|------|-------|-------|
| m | 2 | 3 | 5 | 7 | 7 |
| ΔT_{max} | 14 | 26 | 1,6 | 0,26 | 0,39 |
| ΔT_{cp} | 2 | 1,8 | 0,26 | 0,068 | 0,096 |

$2 \leq T \leq 30\text{K}$

| Уравнение | (2) | (3) | (5) | (7) | (6) |
|------------------|-----|------|------|-------|-------|
| m | 2 | 3 | 5 | 7 | 7 |
| ΔT_{max} | 5,5 | 2,8 | 0,76 | 0,24 | 0,26 |
| ΔT_{cp} | 1,4 | 0,44 | 0,18 | 0,056 | 0,065 |

$2 \leq T \leq 10\text{K}$

| Уравнение | (2) | (3) | (5) | (7) | (6) |
|------------------|------|------|-------|-------|-------|
| m | 2 | 3 | 5 | 7 | 7 |
| ΔT_{max} | 2 | 0,33 | 0,061 | 0,079 | 0,069 |
| ΔT_{cp} | 0,51 | 0,15 | 0,026 | 0,031 | 0,028 |

m - число постоянных; ΔT_{max} - максимальная ошибка;
 ΔT_{cp} - средняя ошибка.

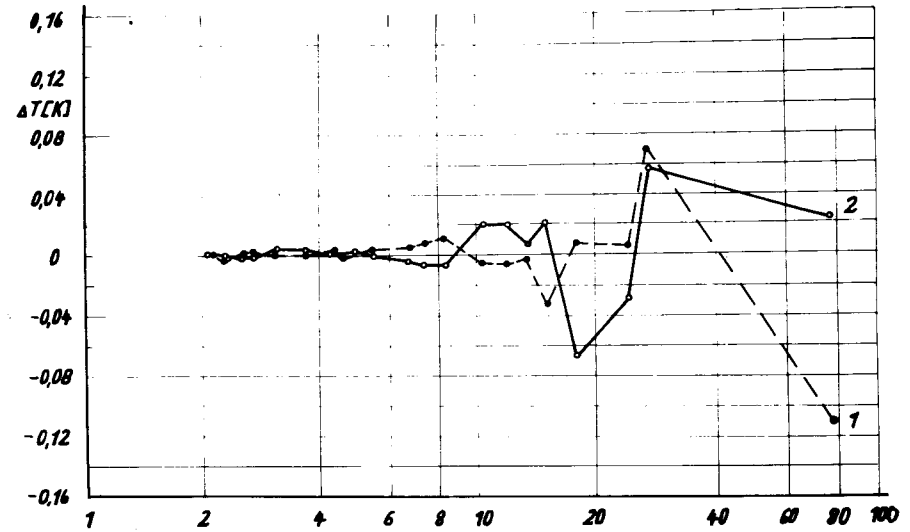


Рис. 9. Распределение ошибки ΔT в диапазоне температур $2 \leq T \leq 77\text{K}$. 1 - формула /5/ с семью постоянными, 2 - формула /6/ с семью постоянными.

6. ПОВТОРЯЕМОСТЬ ПОКАЗАНИЙ РЕЗИСТОРОВ АЛЛЕН БРЕДЛИ

Проблема повторяемости температуры играет большую роль при точных измерениях. В ранних работах /2, 11/ найдена повторяемость показаний резисторов Аллен Бредли в пределах $\pm 4 \text{ мК}$ при медленном охлаждении датчиков. В работе /12/ показано, что повторяемость равна $\pm 1-2 \text{ мК}$ даже при быстром охлаждении датчиков. В работе /13/ обнаружено изменение сопротивления с течением времени в пределах 2-3 мК при 2К и 4,6К. Через 5-6 часов сопротивление больше не меняется.

Для проверки литературных данных по воспроизводимости показаний резисторов Аллен Бредли в настоящей работе для нескольких датчиков проведена температурная тренировка, с этой целью датчики последовательно около

десяти раз охлаждались до 4,2К и нагревались до 300К. Какой-либо тенденции к изменению сопротивления замечено не было. Получена повторяемость в диапазоне ± 3 мК.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью созданной установки можно калибровать угольные резисторы с точностью около 0,2-0,03% в диапазоне $2 \leq T \leq 30$ К. Расчетная программа позволяет вычислять калибровочные таблицы в виде зависимости $R = f(T)$ или $T = f(R)$ с температурной ошибкой 0,2% в диапазоне температуры $2 \leq T \leq 300$ К и 0,03% в диапазоне $2 \leq T \leq 10$ К.

Авторы выражают благодарность Ю.А.Шишову за помощь в создании установки и участие в обсуждении результатов; И.С.Хухаревой - за полезные дискуссии, В.Ф.Чумакову - за содействие в наладке криогенной части установки, В.В.Чуракову - за помощь в конструировании и В.И.Лаврентьеву за консультацию по вопросам электроники.

Литература

1. Clement, Quinzel: *Phys.Rev.*, Vol 74 (1950), 1028.
2. Clement, Quinzel: *Rev. Sci. Instr.*, Vol 23 (1952), 213.
3. Allen Bradley Comp., *Electronics Division, Milwaukee, USA.*
4. Airco Speer Components, Bradford, USA.
5. Berman: *Rev.Sci. Instr.*, Vol. 25 (1954), 94.
6. Hudson: "Experimental Cryophysics", Butterworth, London 1961.
7. Berman, Swenson: *Phys.Rev.*, Vol 93 (1954), 311.
8. Kes, Klein, Klerk: *Cryogenics*, Vol 14 (1974), 168.
9. Rose-Innes: "Low Temperature Technique", English University Press. London 1964.

10. Schriempf: *Cryogenics*, Vol 6 (1966), 362.
11. Clement: "Temperature - Measurement and Control, Vol 2", Reinhold Publ., New York 1955.
12. Plumb, Edlow: "Prog. in Low Temp. Phys.", Amsterdam 1961.
13. Johnson, Anderson: *Rev. Sci. Instr.*, Vol 42 (1971), 1296.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 июля 1975 года.