

Б. И. ПИЛИПЧУК

## ПЛАТИНОВЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 0—1063 °C

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 3 VI 1954)

В 1948 г. в результате анализа интерполяционных формул платинового термометра сопротивления автором была высказана мысль о целесообразности составления для термометров не таблиц отношений сопротивлений  $w_t = R_t/R_0$  ( $R_t$  и  $R_0$  — сопротивления термометра при температурах, соответственно,  $t$  и 0 °C), как это обычно делается, а таблиц отношений разностей сопротивлений  $v_t = \frac{R_t - R_1}{R_2 - R_1}$  ( $R_1$  и  $R_2$  — сопротивления термометра при температурах  $t_1$  и  $t_2$  двух каких-либо опорных точек;  $R_t$  — сопротивление термометра при температуре  $t$ , лежащей между выбранными опорными точками) (6, 7).

Исходя из эмпирического правила Маттиссена (2, 5), впервые теоретически обоснованного в современной теории металлов Я. И. Френкелем в 1928 г. (13), можно ожидать, что величины  $v_t$  будут почти одинаковы для разных термометров, причем, естественно, совпадение будет тем более совершенным, чем ближе друг к другу крайние опорные точки рассматриваемого промежутка температур\*.

В последние годы были опубликованы (3, 9, 12, 14) некоторые числовые результаты для области от точки кипения водорода (20,3 °K) до точки кипения кислорода (90,2 °K), показавшие, что величина отклонений может достигать примерно 0,05 °K.

В литературе несколько раз высказывалось предложение расширить область применения платиновых термометров сопротивления от точки затвердевания сурьмы (630,5 °C) до точки затвердевания золота (1063,0 °C) (4, 10).

В 1953 г. во ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева (Ленинград) Ф. З. Алиевой были произведены измерения с 5 низкоомными термометрами ( $R_0 \approx 0,11 \div 0,18$  ом) особой конструкции, изготовленными из толстых платиновых проволок (диаметром 0,5 ÷ 0,6 мм) с различными значениями температурного коэффициента ( $\alpha = 3,88 \cdot 10^{-3} \div 3,92 \cdot 10^{-3}$  1/град). Градуировка термометров была произведена в 7 опорных точках при температурах: 0 °C (точка плавления льда), 100 °C (точка кипения воды), 320,9 °C (точка затвердевания кадмия), 419,5 °C (точка затвердевания цинка), 630,5 °C (точка затвердевания сурьмы),

\* Правило Нернста (8), часто применяемое для установления связи между показаниями двух различных термометров при температурах ниже 0 °C (1, 11), основано на предположении о том, что дополнительное сопротивление, связанное с нарушением правильности строения кристаллической решетки металла, остается постоянным в широкой области от 0 °C до измеряемой температуры. При составлении отношений  $v_t$  постоянство дополнительного сопротивления требуется в более узкой области между двумя опорными точками — это довод в пользу построения температурной шкалы при помощи отношений  $v_t$ .

778,8°С (точка затвердевания эвтектики медь — серебро), 360,8°С (точка затвердевания серебра) и 1063,0°С (точка затвердевания золота).

Представляется интересным сделать попытку вычисления отношений  $v_t$  в области температур выше 0°С.

В табл. 1 приведены данные Ф. З. Алиевой и результаты вычислений автора. Термометры расположены слева направо в порядке возрастания значений  $\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0}$ .

В столбцах  $w_t$  даны отношения  $R_t/R_0$  для каждого термометра в опорных точках (температуры указаны в крайнем столбце слева; цифры в скобках указывают число независимых наблюдений, служивших для вычисления окончательного значения  $w_t$ ).

В столбцах  $v_t$  приведены отношения разностей сопротивлений, а именно

$$v_t = \frac{R_t - R_0}{R_{1063,0} - R_0} = \frac{w_t - 1}{w_{1063,0} - 1}. \quad (1)$$

При температурах 0 и 1063,0°С значения  $v_t$  равны, соответственно, нулю и единице. При всех промежуточных температурах отношения  $v_t$  для отдельных термометров достаточно близки друг к другу, несмотря на громадную ширину области — свыше 1000°С. Разности между максимальным и минимальным отношениями  $v_t$  при любой температуре не превышают 3 единиц четвертого знака\*.

По величине температурного коэффициента  $\alpha$  термометры могут быть разбиты на две группы: термометры №№ 7 и 9 образуют группу с малым  $\alpha$ , термометры №№ 8, 6 и 11, изготовленные из хорошей платины, образуют группу с большим  $\alpha$ .

В столбце  $v_t$  помещено среднее арифметическое из всех 3 значений отношений  $v_t$  для каждого отдельного термометра второй группы в опорной точке при температуре  $t$ °С.

В столбцах  $10^2 \Delta t$  указаны отклонения отношений отдельных термометров от усредненного отношения  $\bar{v}_t$  в сотых долях градуса, вычисленные по приближенной формуле, справедливой для малых приращений  $v_t$  и  $t$ :

$$\Delta t = \frac{\Delta v_t}{dv_t/dt} = \frac{v_t - \bar{v}_t}{\frac{dw_t/dt}{w_{1063,0} - 1}} = \frac{(w_{1063,0} - 1)(v - \bar{v}_t)}{\frac{1}{R_0} \frac{dR_t}{dt}}. \quad (2)$$

Числовые значения  $dv_t/dt$  для термометра № 7 приводятся в таблице в последнем столбце. Хотя, строго говоря, значения производных различны у разных термометров, при оценке отклонений вполне допустимо пользоваться этими частными числовыми значениями.

Просматривая все три столбца  $\Delta t$ , мы убеждаемся в том, что для группы тех термометров, у которых  $R_{100}/R_0 \approx 1,392$ , отклонения не достигают 0,1°С, составляя в самом худшем случае 0,08°С (термометр № 11 при температуре 960,8°С). Иначе говоря, если бы мы градуировали данные термометры только в двух опорных точках — в точке плавления льда и в точке затвердевания золота, а затем для вычисления температуры пользовались таблицей усредненных значений  $\bar{v}_t$ , мы не сделали бы за счет интерполяции погрешностей, превышающих 0,1°С. Такая точность определения температуры вполне

\* Для сравнения надо отметить, что отношения сопротивлений  $w_{1063,0}$  для крайних термометров №№ 7 и 11 равны, соответственно, 4,5311 и 4,5670. Так как производная  $dw_t/dt$  при температуре затвердевания золота равна приблизительно  $270 \cdot 10^{-5}$ , разности этих чисел (0,0359) по градуировочной таблице  $w_t$  любого из этих термометров будет соответствовать разность температур порядка 13°С.

Таблица 1

| Т-ра t<br>в °C     | Термометр № 7         |            |  | Термометр № 9         |            |  | Термометр № 8         |            |    | Термометр № 6         |            |    | Термометр № 11        |            |    | Средн.<br>знач.<br>$\frac{dv}{10^5 v} \frac{dt}{t}$ |
|--------------------|-----------------------|------------|--|-----------------------|------------|--|-----------------------|------------|----|-----------------------|------------|----|-----------------------|------------|----|-----------------------------------------------------|
|                    | $10^5 \alpha = 3,886$ |            |  | $10^5 \alpha = 3,903$ |            |  | $10^5 \alpha = 3,910$ |            |    | $10^5 \alpha = 3,918$ |            |    | $10^5 \alpha = 3,925$ |            |    |                                                     |
|                    | $10^5 w_t$            | $10^5 v_t$ |  | $10^5 w_t$            | $10^5 v_t$ |  | $10^5 w_t$            | $10^5 v_t$ |    | $10^5 w_t$            | $10^5 v_t$ |    | $10^5 w_t$            | $10^5 v_t$ |    |                                                     |
|                    |                       |            |  |                       |            |  |                       |            |    |                       |            |    |                       |            |    |                                                     |
| 0                  | 100 000 (6)           | 0          |  | 100 000 (8)           | 0          |  | 100 000 (10)          | 0          | 0  | 100 000 (10)          | 0          | 0  | 100 000 (10)          | 0          | 0  | 111                                                 |
| 100                | 138 862 (6)           | 11 006     |  | 139 033 (5)           | 11 013     |  | 139 101 (5)           | 10 999     | -2 | 139 181 (5)           | 11 001     | 0  | 139 246 (10)          | 11 002     | +1 | 108                                                 |
| 320,9 <sub>1</sub> | 220 578 (5)           | 34 147     |  | 221 050 (3)           | 34 153     |  | 221 343 (3)           | 34 134     | 0  | 221 547 (4)           | 34 128     | -6 | 221 779 (7)           | 34 140     | +6 | 101                                                 |
| 419,5 <sub>9</sub> | 255 263 (7)           | 43 970     |  | 255 808 (4)           | 43 960     |  | 256 208 (6)           | 43 941     | -4 | 256 509 (7)           | 43 944     | -1 | 256 774 (8)           | 43 951     | +6 | 98                                                  |
| 630,5 <sub>1</sub> | 325 490 (8)           | 63 858     |  | 326 278 (4)           | 63 842     |  | 326 896 (10)          | 63 826     | -4 | 327 318 (8)           | 63 826     | -4 | 327 709 (7)           | 63 837     | +8 | 91                                                  |
| 778,9 <sub>9</sub> | 371 779 (6)           | 76 966     |  | 372 742 (5)           | 76 951     |  | 373 538 (4)           | 76 946     | -2 | 374 047 (9)           | 76 946     | -2 | 374 495 (6)           | 76 953     | +5 | 86                                                  |
| 960,8 <sub>9</sub> | 424 954 (5)           | 92 025     |  | 426 153 (6)           | 92 021     |  | 427 113 (5)           | 92 017     | -5 | 427 754 (10)          | 92 026     | +6 | 428 234 (8)           | 92 019     | -4 | 80                                                  |
| 1063,0             | 453 114 (6)           | 100 000    |  | 454 434 (5)           | 100 000    |  | 455 493 (4)           | 10 000     | 0  | 456 153 (5)           | 100 000    | 0  | 456 704 (7)           | 100 000    | 0  | 76                                                  |

достаточно во многих случаях лабораторной и промышленной практики.

Дальнейшее накопление опытных данных об отношении  $v_t$  для термометров из предельно чистой платины представляет большой теоретический и практический интерес. Таблица усредненных отношений должна быть построена на достаточном числе надежных наблюдений.

Как показывает формула (1), отношение разностей сопротивлений  $v_t$  является функцией температуры той же степени, как и отношение сопротивлений  $w_t$ . Аналитическое представление  $v_t$  надо искать в форме полинома без члена с нулевой степенью температуры

$$v_t = \sum_{i=1}^n a_i t^i, \quad (3)$$

которая удовлетворяет требованию  $v_0 = 0$  \*.

Индивидуальные отклонения значений  $v_t$  любого термометра от усредненных табличных значений могут быть представлены в виде функций температуры и «параметра качества платины»  $w_{1063,0}$ . Можно предполагать возможность разделения этой функции на универсальную (т. е. одинаковую для всех термометров) функцию только одной температуры и универсальную функцию только одного параметра качества \*\*.

Всесоюзный научно-исследовательский  
институт метрологии  
им. Д. И. Менделеева

Поступило  
1 VI 1954

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Н. А. Бриллиантов, ЖТФ, 18, 1113 (1948). <sup>2</sup> Л. Ландау, Ф. Компанеев, Электропроводность металлов, Харьков, 1935, стр. 16, 55—57. <sup>3</sup> Los, Morrison, Canad. J. Phys., 29 (2), 143 (1951). <sup>4</sup> Н. Moser, Ann. d. Phys., (5), 6, 852 (1930). <sup>5</sup> Р. Пайерлс, Электронная теория металлов, М., 1947, стр. 75 и след. <sup>6</sup> Б. И. Пилипчук, Тр. ВНИИМ, в. 4 (64), 3 (1948). <sup>7</sup> Б. И. Пилипчук, ЖТФ, 19 (6), 669 (1949). <sup>8</sup> М. М. Попов, Термометрия и калориметрия, М., 1934, стр. 169. <sup>9</sup> Procès-verbaux CIPM, 21, T84 (1948). <sup>10</sup> П. Г. Стрелков, Зав. лабор., 8 (10—11), 1101 (1939). <sup>11</sup> П. Г. Стрелков, Изв. АН СССР, сер. физ., 14 (1), 116 (1950). <sup>12</sup> Van Dijk, Procès-verbaux CIPM, 23-B, T48 (1952). <sup>13</sup> Я. И. Френкель, УФН, 30 (1—2), 33 (1946). <sup>14</sup> Hoge, Rev. Sci. Instr., 21 (9), 815 (1950).

\* Усредненные значения  $\bar{v}_t$ , приведенные в таблице, могут быть представлены с погрешностью порядка  $0,02^\circ$  при помощи интерполяционной формулы 2-й степени  $10^5 \bar{v}_t = 111,6814t - 1,65644 \cdot 10^{-2}t^2$ . Для отношения разностей сопротивлений в области от точки плавления льда ( $0^\circ\text{C}$ ) до точки затвердевания меди ( $1083^\circ\text{C}$ ) имеет аналогичное выражение

$$10^5 \bar{V}_t = 10^5 \frac{R_t - R_0}{R_{1083} - R_0} = 10^5 \frac{v_t}{v_{1083}} = 110,0063 t - 1,63160 \cdot 10^{-2}t^2.$$

\*\* В статье Б. И. Пилипчука «Температурная шкала Д. И. Менделеева», опубликованной в ДАН, т. 95, № 1, на стр. 76 следует внести следующие исправления:

|                | Напечатано:                                      | Следует читать:                                                                             |
|----------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| строка 24      | избегает                                         | избегается                                                                                  |
| строка 5 снизу | <sup>3</sup> W. F. Giauque                       | <sup>4</sup> W. F. Giauque                                                                  |
| строка 4 снизу |                                                  | Пропущена ссылка: <sup>6</sup> Д. И. Менделеев, ЖРФХО, ч. физ., 6, отд. 1, в. 1, 10 (1874). |
| строка 4 снизу | <sup>7</sup> Д. И. Менделеев, ЖРФХО, ч. хим., 11 | <sup>7</sup> Д. И. Менделеев, ЖРФХО, ч. хим., 6                                             |
| строка 3 снизу | <sup>8</sup> A. Kuhlberg, Ber., 7 (1874)         | <sup>8</sup> A. Kuhlberg, Ber., 7 (2), 126 (1874).                                          |