

## Определение температуры объекта с неизвестной излучательной способностью по пяти измеренным яркостным температурам

А. А. ФРУНЗЕ, А. В. ФРУНЗЕ

ННТП «ТЕРМОКОНТ», Москва, Россия, e-mail: alex.fru@mtu-net.ru

Описан численный вариационный метод определения температуры объекта с неизвестной излучательной способностью по пяти измеренным яркостным температурам. Критерием определения является минимум суммы квадратов отклонений рассчитанной монохроматической излучательной способности от соответствующих им значений на кривой полиномиальной регрессии.

**Ключевые слова:** действительная и яркостная температуры, вариационный метод, монохроматическая излучательная способность.

The numerical method of real temperature measurement of the objects with unknown emissivity using five brightness temperatures is described. Computation is using by variational method. The minimum of sum of squares deviation calculated monochromatic emissivity from their values on polynomial regression curve is the fidelity criterium.

**Key words:** real temperature, brightness temperature, variational method, monochromatic emissivity.

Как известно, измерение температуры энергетическими пирометрами характеризуется важной особенностью — необходимостью коррекции результатов по излучательной способности  $\varepsilon$  измеряемого объекта. Неучет этого обстоятельства или неправильно введенное в пирометр значение излучательной способности может внести в процесс измерения большую погрешность — до 10 % и более. В то же время излучательная способность зависит не только от химического состава измеряемого объекта, но и от состояния его поверхности (шероховатая, полированная, гладкая и т. д.). В [1] показано, что, например, спектральная излучательная способность  $\varepsilon_\lambda$  полированной медной поверхности также зависит от характера предшествующей обработки, т. е. значения  $\varepsilon_\lambda$  электро- и механически полированных образцов заметно отличаются. Ограниченность литературных данных об излучательной способности разных материалов, а также часто отсутствие информации, при каких условиях (спектральный диапазон, температура образца и т. д.) получены приведенные значения, вынуждает потребителей не полагаться на справочные данные, а самостоятельно находить излучательную способность объектов, температуру которых впоследствии предстоит измерять.

Несмотря на разнообразие методов измерения  $\varepsilon$ , все они так или иначе сводятся к измерению потока излучения от объекта и последующему делению на значение потока от черного тела, имеющего ту же температуру, что и измеряемый объект. Таким образом, измерение  $\varepsilon$  предполагает знание температуры объекта, а измерение температуры при помощи пирометра — знание  $\varepsilon$ . Получается замкнутый круг, который обычно разрывается только для объектов, допускающих измерение температуры контактными методами.

Если контактные методы неприменимы, то для бесконтактного измерения температуры используют двухканальные пирометры спектрального отношения. Они позволяют правильно измерить температуру серых тел. Но при измерениях «несерых тел» они характеризуются заметными систематическими методическими погрешностями, нередко превышающими 10 — 20 % [2]. Коррекция такой погрешности возможна, но для этого нужно располагать спектральной излучательной способностью  $\varepsilon_\lambda$  измеряемого объекта [3]. Однако определение  $\varepsilon_\lambda$  также требует знания температуры — получается все тот же замкнутый круг.

Таким образом, для измерения температуры «несерых тел»,  $\varepsilon_\lambda$  которых неизвестна и значительно отличается от 1, одно- или двухканальные пирометры непригодны. Поэтому в данном случае используют многоканальные пирометры, осуществляющие измерения на трех и более длинах волн. Настоящая работа посвящена определению температуры «несерого тела» с неизвестной спектральной излучательной способностью  $\varepsilon_\lambda$  по пяти яркостным температурам.

Для вычисления действительной температуры объекта  $T_{д.о}$  служит вариационный метод. Вначале варьируемый параметр  $T_v$  вместе с яркостными температурами  $T_{\lambda_i}$ ,  $i=1-5$  используют для нахождения излучательной способности  $\varepsilon_{\lambda_i}$  на заданных длинах волн  $\lambda_i$  из формулы [2]:

$$1/T - 1/T_{\lambda_i} = (\lambda/c_2) \ln \varepsilon_{\lambda_i}(\lambda, T),$$

где  $\lambda_i$  — длина волны, м;  $c_2 = 1,4380 \cdot 10^{-2}$  м · К — вторая константа излучения.

Далее для найденных значений  $\varepsilon_{\lambda_i}$  осуществляют полиномиальную регрессию полиномом второй степени вида  $\varepsilon = A_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2$ . Коэффициенты полинома определяют

методом наименьших квадратов. Затем сумму квадратов отклонений  $\delta_{\lambda_i}^2$  значений  $\varepsilon_{\lambda_i}$  от соответствующих им значений на кривой, заданной упомянутым полиномом, ставят в соответствие варьируемому параметру  $T_B$ . Варьирование проводят при монотонном изменении  $T_B$  — увеличении от максимальной из яркостных температур, если ряд яркостных температур монотонно уменьшается с ростом длины волны, и от минимальной в противоположном случае. Критерием завершения вариационного процесса является нахождение минимальной суммы квадратов отклонения  $\delta_{\lambda_i}^2$ . Соответствующее этому минимуму значение  $T_B$  и принимается в качестве найденной действительной температуры объекта  $T_{до}$ .

Описанный алгоритм был исследован для реальных значений спектральной излучательной способности W, Ta и Mo, приведенных в [1]. Данные материалы были выбраны по причине очень подробной табуляции  $\varepsilon_{\lambda}$  именно для этих материалов. При этом использовали  $\varepsilon_{\lambda}$  для ванадия W при температурах 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400 и 2600 K; для тантала Ta при температурах 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 и 2400 K; для молибдена Mo при температурах 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 и 2000 K — всего 21 зависимость  $\varepsilon(\lambda, T)$ . Для каждой из этих кривых задавали три значения действительных  $T_D$  температур: 1233, 1300 и 1366 K — для кривых, соответствующих  $\varepsilon_{\lambda}$  W, Ta и Mo при 1200 K; 1433, 1500 и 1566 K — для кривых, соответствующих  $\varepsilon_{\lambda}$  этих материалов при 1400 K; и т. д. После этого с учетом выбранных значений  $T_D$  и  $\varepsilon_{\lambda}$  для длин волн 0,4; 0,45; 0,5; 0,55 и 0,6 мкм находили пять значений яркостных температур  $T_{\lambda_i}$  для пяти упомянутых длин волн и соответствующих зависимостей  $\varepsilon(\lambda, T)$ . Полученные пять значений  $T_{\lambda_i}$  с выбранными длинами волн без информации о действительных температурах и  $\varepsilon(\lambda, T)$  использовали в качестве входных данных для рассматриваемого алгоритма нахождения действительной температуры объекта по пяти яркостным.

Спектральные зависимости  $\varepsilon(\lambda, T)$  перед проведением расчетов были сглажены полиномами десятого порядка, расхождение при этом с затабулированными в [1] значениями не превышали 0,3 %.

Результаты исследования приведены в табл. 1—3.

Анализ данных таблиц показывает, что для W описанный алгоритм позволяет определить действительную температуру объекта по пяти яркостным с погрешностью от 0,3 % и менее

Результаты исследований вольфрама

Кривая	$T_D$ , K	$T_{\lambda_1}$ , K	$T_{\lambda_2}$ , K	$T_{\lambda_3}$ , K	$T_{\lambda_4}$ , K	$T_{\lambda_5}$ , K	$T_{до}$ , K
W-1200	1233	1202,94	1198,91	1194,73	1190,39	1185,33	1232
	1300	1266,62	1262,16	1257,53	1252,72	1247,68	1300
	1366	1329,20	1324,28	1319,19	1313,89	1308,35	1366
W-1400	1433	1392,22	1386,74	1381,03	1375,08	1368,86	1430
	1500	1455,37	1449,38	1443,15	1436,66	1429,87	1498
	1566	1517,42	1510,91	1504,14	1497,09	1489,72	1564
W-1600	1633	1579,80	1572,64	1565,14	1557,32	1549,17	1625
	1700	1642,43	1634,68	1626,58	1618,14	1609,34	1693
	1766	1703,95	1695,62	1686,91	1677,82	1668,37	1756
W-1800	1833	1765,69	1756,56	1746,99	1737,01	1726,65	1820
	1900	1827,77	1817,99	1807,74	1797,06	1785,98	1886
	1966	1888,77	1878,77	1867,39	1856,00	1844,17	1952
W-2000	2033	1949,83	1938,55	1926,66	1914,25	1901,39	2011
	2100	2011,38	1999,38	1986,73	1973,54	1959,87	2076
	2166	2071,85	2059,11	2045,71	2031,72	2017,24	2142
W-2200	2233	2132,24	2118,55	2104,06	2088,92	2073,27	2200
	2300	2193,25	2178,77	2163,44	2147,43	2130,90	2264
	2366	2253,19	2237,90	2221,74	2204,86	2187,43	2330
W-2400	2433	2312,90	2296,52	2279,11	2260,92	2242,19	2387
	2500	2373,37	2356,12	2337,80	2318,67	2298,97	2452
	2566	2432,77	2414,65	2395,42	2375,33	2354,67	2515
W-2600	2633	2491,78	2472,53	2451,96	2430,40	2408,23	2545
	2700	2551,70	2531,52	2509,96	2487,38	2464,16	2634
	2766	2610,57	2589,45	2566,90	2543,28	2519,01	2697

Таблица 2

Результаты исследований молибдена

Кривая	$T_D$ , K	$T_{\lambda_1}$ , K	$T_{\lambda_2}$ , K	$T_{\lambda_3}$ , K	$T_{\lambda_4}$ , K	$T_{\lambda_5}$ , K	$T_{до}$ , K
Mo-1000	1033	1010,32	1007,24	1003,33	999,28	995,28	1011
	1100	1074,32	1070,84	1066,42	1061,85	1057,33	1074
	1166	1137,18	1133,28	1128,34	1123,22	1118,17	1138
Mo-1200	1233	1199,94	1195,38	1189,92	1184,31	1178,72	1200
	1300	1263,30	1258,25	1252,20	1245,99	1239,81	1264
	1366	1325,54	1319,98	1313,33	1306,49	1299,70	1326
Mo-1400	1433	1387,56	1381,76	1374,13	1366,28	1358,70	1388
	1500	1450,29	1443,95	1435,62	1427,05	1418,79	1451
	1566	1511,90	1505,01	1495,96	1486,66	1477,69	1512
Mo-1600	1633	1572,98	1565,70	1555,65	1545,33	1535,56	2131
	1700	1635,05	1627,19	1616,33	1605,20	1594,65	2246
	1766	1696,02	1687,55	1675,88	1663,92	1652,59	>3000
Mo-1800	1833	1756,31	1747,20	1734,60	1721,71	1709,53	2515
	1900	1817,73	1807,97	1794,48	1780,69	1767,67	2616
	1966	1878,05	1867,63	1853,24	1838,53	1824,66	2744
Mo-2000	2033	1937,66	1924,72	1910,42	1895,82	1881,17	1962
	2100	1998,43	1984,67	1969,47	1953,95	1938,40	2023
	2166	2058,11	2043,52	2027,40	2010,96	1994,50	2084

Т а б л и ц а 3

## Результаты исследований тантала

Кривая	$T_{д'}$ , К	$T_{\lambda 1}$ , К	$T_{\lambda 2}$ , К	$T_{\lambda 3}$ , К	$T_{\lambda 4}$ , К	$T_{\lambda 5}$ , К	$T_{д.о'}$ , К
Та-1200	1233	1206,29	1202,72	1198,35	1193,25	1187,32	1210
	1300	1270,34	1266,39	1261,54	1255,89	1249,32	1271
	1366	1333,29	1328,93	1323,60	1317,38	1310,16	1337
Та-1400	1433	1396,68	1391,47	1385,39	1378,42	1370,38	1416
	1500	1460,25	1454,56	1447,92	1440,30	1431,53	1481
	1566	1522,73	1516,54	1509,32	1501,05	1491,52	1546
Та-1600	1633	1585,34	1578,24	1570,22	1561,10	1550,67	1627
	1700	1648,42	1640,74	1632,07	1622,22	1610,96	1693
	1766	1710,40	1702,13	1692,80	1682,21	1670,11	1759
Та-1800	1833	1772,38	1763,07	1752,69	1741,09	1728,04	1826
	1900	1834,95	1824,96	1813,85	1801,43	1787,46	1895
	1966	1896,43	1885,77	1873,91	1860,65	1845,76	1959
Та-2000	2033	1957,85	1945,78	1932,69	1918,32	1902,41	2046
	2100	2019,91	2007,07	1993,15	1977,86	1960,96	2112
	2166	2080,90	2067,27	2052,51	2036,30	2018,39	2180
Та-2200	2233	2141,51	2126,26	2110,14	2092,78	2073,91	2274
	2300	2203,06	2186,92	2169,87	2151,52	2131,58	2344
	2366	2263,54	2246,51	2228,52	2209,17	2188,15	2403
Та-2400	2433	2323,61	2304,71	2284,88	2264,02	2241,96	2457
	2500	2384,64	2364,75	2343,87	2321,93	2298,73	2524
	2566	2444,62	2423,72	2401,79	2378,75	2354,41	2590

для  $\varepsilon(\lambda, T)$ , соответствующих низким температурам, до примерно 2,5 % для  $\varepsilon(\lambda, T)$ , соответствующих высоким температурам; для Та эта погрешность колеблется от 2 до 1 %, причем для среднетемпературного диапазона погрешность оказывается менее 0,5 %. При этом яркостные температуры на длине волны 0,6 мкм характеризовались погрешностями, в несколько раз большими.

Для Мо описанный алгоритм оказался малопримемлемым, адекватные результаты получились лишь для  $\varepsilon(\lambda, T)$ , соответствующей 2000 К. Анализ влияния форм кривых  $\varepsilon(\lambda, T)$  на сходимость данных при использовании предложенного алгоритма в настоящее время продолжается. Предположительно сходимость можно улучшать, используя светофильтры, так как при этом спектральная излучательная способность системы объект+светофильтр равна функционально-

му произведению спектральной излучательной способности объекта на спектральную характеристику пропускания светофильтра. Таким образом появляется возможность в определенной степени «регулировать» форму суммарной характеристики.

Указанный алгоритм после его оптимизации может найти широкое применение при измерениях температуры объектов при помощи спектрометров. По результатам измерения спектров объекта и черного тела при известной температуре можно для любой из регистрируемых спектрометром длин волн найти яркостную температуру на этой длине волны, получив таким образом без каких-либо технических проблем пять значений яркостных температур в любой части спектрального диапазона (предварительно сгладив результаты измерения спектра полиномами высокого порядка). Необходимым условием корректного измерения при этом также является идентичность спектральной чувствительности приемника в момент измерения температур объекта и черного тела. Это условие может быть нарушено, если в приемнике спектрометра отсутствует термостабилизация, а температуры окружающей среды при первом и втором измерениях заметно различаются. Поэтому спектрометр, реализующий подобный алгоритм, должен или иметь термостабилизированный приемник, или снабжаться переносным высокостабильным (1 % и менее) источником спектрального излучения.

## Л и т е р а т у р а

1. **Излучательные** свойства твердых материалов / Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.
2. **Линевег Ф.** Измерение температур в технике: Справочник / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1980.
3. **Фрунзе А. В.** Повышение точности измерений широкополосными пирометрами спектрального отношения температуры металлов // Приборы. 2010. № 12. С. 23—32.

Дата принятия 11.01.2012 г.