

УДК 004:546.78:546.08

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЛЬФРАМОВОЙ ПРОВОЛОКИ****Родин В.В., Толмачева И.И.***ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», Саранск, e-mail: 89879979005@rambler.ru*

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением температуры вольфрамовой проволоки. Указывается актуальность поставленной задачи при разработке нагревательных и осветительных приборов различного назначения. Приводятся известные табличные данные по соответствию величины температуры вольфрама величине изменения его удельного электрического сопротивления. Предлагаются и сравниваются несколько аналитических функций, описывающих зависимость величины температуры вольфрама от изменения величины его удельного электрического сопротивления. Из рассматриваемых линейной и степенной функций, полиномиальных функций второго и третьего порядка выбирается функция, имеющая наименьшие расхождения. Рассчитывается относительная погрешность результатов. Определяется дифференциальное и интегральное расхождение расчетных данных с известными результатами, приводимыми в литературных источниках. Предлагается схема установки, позволяющая измерить сопротивление ламп накаливания при различных температурах вольфрамовой спирали, используемой в них. На основе измеренных величин сопротивления определяется температура вольфрамового тела накала. Устанавливается зависимость температуры для вакуумных и газополных ламп от величины прикладываемого напряжения. Сравниваются результаты измерений сопротивления ламп, расчета температуры спирали по изменению сопротивления с соответствующими данными, приведенными в литературных источниках. Делается заключение о возможности определения температуры по измерению величины сопротивления вольфрамовой проволоки с помощью полиномиальной зависимости третьего порядка.

**Ключевые слова:** вольфрам, проволока, зависимость, сопротивление, температура, измерение, расчет, тело накала**DETERMINATION OF TUNGSTEN WIRE TEMPERATURE****Rodin V.V., Tolmacheva I.I.***National Research Mordovia State University, Saransk, e-mail: 89879979005@rambler.ru*

The article deals with issues related to the determination of the temperature of a tungsten wire. The urgency of the task is indicated in the development of heating and lighting devices for various purposes. Known tabular data on the correspondence between the temperature of tungsten and the change in its electrical resistivity are given. Several analytical functions are proposed and compared that describe the dependence of the temperature of tungsten on the change in the value of its electrical resistivity. From the considered linear and power functions, polynomial functions of the second and third order, the function that has the smallest discrepancies is selected. The relative error of the results is calculated. Determines the differential and integral discrepancy between the calculated data and the known results given in the literature. A setup diagram is proposed that allows measuring the resistance of incandescent lamps at various temperatures of the tungsten filament used in them. Based on the measured resistance values, the temperature of the tungsten filament is determined. The dependence of the temperature for vacuum and gas-filled lamps on the magnitude of the applied voltage is established. The results of measuring the resistance of lamps, calculating the temperature of the spiral by changing the resistance with the corresponding data given in the literature are compared. A conclusion is made about the possibility of determining the temperature by measuring the resistance value of tungsten wires using a third-order polynomial dependence.

**Keywords:** tungsten, wire, dependence, resistance, temperature, measurement, calculation, filament

Вольфрам является уникальным металлом для создания нагревательных и осветительных приборов различного назначения. Поэтому определение его температуры в различных режимах работы приборов, в зависимости от изменения условий окружающей среды, напряжения питания является актуальной задачей. Температура определяет твердость, прочность, износостойкость, расширение, скорость испарения и другие параметры. Вольфрам является одним из основных металлов, используемых на температурах свыше 1000 °С. Следует учитывать, что на высоких значениях температуры в наибольшей степени проявляется ее влияние на параметры всех веществ.

При проектировании приборов на основе вольфрамовой проволоки установление

величины ее температуры возможно по известной зависимости температуры от величины изменения удельного электрического сопротивления. В литературных источниках эта зависимость приводится в виде таблицы [1, 2]. Величине температуры сопоставляется отношение величины удельного электрического сопротивления вольфрама к сопротивлению при 300 К ( $R_{300}$ ). В приводимых источниках шаг изменения температуры обычно равен 100 К.

Также известна аналитическая зависимость сопротивления металлов от температуры в виде [3, 4]:

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta t), \quad (1)$$

где  $R_t$  – сопротивление металла при температуре  $t$ ;  $R_0$  – сопротивление при начальной

температуре;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $\Delta t$  – величина изменения температуры металла.

Зависимость (1) позволяет по известному начальному электрическому сопротивлению (для вольфрама эта величина равна 300 К) и температурному коэффициенту (для вольфрама 0,0046 К<sup>-1</sup>) рассчитать сопротивление  $R_t$  для требуемой температуры и, соответственно, по табличным данным определять ее. Следует учитывать, что изменение электрического сопротивления вольфрамовой проволоки, определенное по (1), линейно.

Предлагается сравнить несколько аналитических зависимостей, которые можно будет использовать для расчета величины температуры вольфрамовой проволоки по величине изменения электрического сопротивления. Полученные результаты также сравниваются с результатами измерений электрического сопротивления тела накала ламп.

#### Материалы и методы исследования

По известным данным в табличном редакторе Excel построен график изменения температуры от изменения удельного электрического сопротивления. Табличный редактор позволяет по графику строить различные линии тренда, соответствующие экспериментальным результатам [5]. Выбраны четыре аналитические зависимости величины температуры  $t$  от изменения удельного электрического сопротивления вольфрамовой проволоки  $R_t / R_{300}$ :

$$t_1 = 169,22 \frac{R_t}{R_{300}} + 249,36, \quad (2)$$

$$t_2 = -1,6181 \frac{R_t^2}{R_{300}^2} + 202,98 \frac{R_t}{R_{300}} + 127,76, \quad (3)$$

$$t_3 = 0,0457 \frac{R_t^3}{R_{300}^3} - 3,0629 \frac{R_t^2}{R_{300}^2} + 215,46 + 215,46 \frac{R_t}{R_{300}} + 102,97, \quad (4)$$

$$t_4 = 294,97 \frac{R_t^{0,8299}}{R_{300}^{0,8299}}. \quad (5)$$

Зависимость (2) является линейной функцией, (3) и (4) – полиномы второго и третьего порядка, (5) – степенная функция.

В табл. 1 приводятся известные экспериментальные данные зависимости температуры  $t$  от изменения сопротивления вольфрамовой проволоки  $R_t / R_{300}$  и соответ-

ствующие им величины  $t_1, t_2, t_3, t_4$  полученные с помощью (2)–(5).

В таблице также приводятся соответствующие относительные погрешности  $d_1, d_2, d_3, d_4$  описания экспериментальных данных предложенными функциями.

Наибольшее дифференциальное отклонение имеет линейная функция, наименьшее – степенная функция. Из расчетных данных следует, что величины расхождений для линейной функции наибольшие для всех точек аппроксимации экспериментальных данных. Для вольфрама использование (1) при определении изменения сопротивления от температуры приводит к появлению больших отклонений.

Интегральная оценка погрешности по диапазону изменения температур от 300 до 3600 К соответствует для (2) – 138,19%, (3) – 24,86%, (4) – 13,39%, (5) – 16,44%. Анализ величин отклонений также показывает меньшие расхождения описания полиномом третьего порядка в диапазоне температур выше 800 К.

Следовательно, рекомендуется для оценки температур использовать полиномиальную зависимость третьего порядка.

Широкое развитие вычислительной техники, на которой установлены программные средства (Excel, Access), реализующие полиномиальную функцию третьего порядка, позволяют автоматизировать расчет необходимого значения температуры [6].

Выражение (4) позволяет определять температуру в произвольном режиме работы приборов с вольфрамовыми спиралями, даже в тех случаях, когда измерение невозможно с помощью специализированных измерительных приборов (пирометров).

Измерение значения  $R_t$  и заранее известное значение  $R_{300}$  при работе прибора позволяет определять искомое значение температуры.

Получение экспериментальных результатов измерений электрического сопротивления вольфрама, особенно на высоких температурах, является сложной задачей. Необходимо обеспечить изоляцию проволоки от воздействия внешней среды. Нагрев до высоких значений температуры приводит к ее разрушению.

Наиболее простым решением является измерение сопротивления вольфрамовой проволоки, являющейся телом накала тепловых источников света [7]. К вольфрамовым спиралям ламп предъявляются высокие требования по качеству материала, малому содержанию примесей, по отсутствию механических повреждений, наличию раскола, трещин, пор способных вызывать локальные перегревы.

Таблица 1

Зависимость величины температуры вольфрама  
от изменения удельного электрического сопротивления

$R_t / R_{300}$	$t$	Результат расчета							
		$t_1$	$\delta_1$	$t_2$	$\delta_2$	$t_3$	$t_3$	$t_4$	$\delta_4$
1,00	300	418,58	39,53	329,12	9,71	315,41	5,14	294,97	1,68
1,43	400	491,34	22,84	414,71	3,68	404,95	1,24	396,91	0,77
1,87	500	565,80	13,16	501,67	0,33	495,47	0,91	495,88	0,82
2,34	600	645,33	7,56	593,87	1,02	590,96	1,51	597,30	0,45
2,85	700	731,64	4,52	693,11	0,98	693,21	0,97	703,48	0,50
3,36	800	817,94	2,24	791,51	1,06	794,07	0,74	806,47	0,81
3,88	900	905,93	0,66	890,96	1,00	895,51	0,50	908,76	0,97
4,41	1000	995,62	0,44	991,43	0,86	997,50	0,25	1010,64	1,06
4,95	1100	1087,00	1,18	1092,86	0,65	1099,99	0,00	1112,32	1,12
5,48	1200	1176,69	1,94	1191,50	0,71	1199,23	0,06	1210,30	0,86
6,03	1300	1269,76	2,33	1292,89	0,55	1300,84	0,06	1310,28	0,79
6,58	1400	1362,83	2,66	1393,31	0,48	1401,10	0,08	1408,72	0,62
7,14	1500	1457,59	2,83	1494,55	0,36	1501,84	0,12	1507,52	0,50
7,71	1600	1554,05	2,87	1596,55	0,22	1603,04	0,19	1606,74	0,42
8,28	1700	1650,50	2,91	1697,50	0,15	1702,93	0,17	1704,71	0,28
8,86	1800	1748,65	2,85	1799,14	0,05	1803,29	0,18	1803,24	0,18
9,44	1900	1846,80	2,80	1899,70	0,02	1902,41	0,13	1900,67	0,04
10,03	2000	1946,64	2,67	2000,87	0,04	2002,02	0,10	1998,75	0,06
10,63	2100	2048,17	2,47	2102,60	0,12	2102,10	0,10	2097,48	0,12
11,24	2200	2151,39	2,21	2204,83	0,22	2202,68	0,12	2196,89	0,14
11,84	2300	2252,92	2,05	2304,21	0,18	2300,49	0,02	2293,78	0,27
12,46	2400	2357,84	1,76	2405,68	0,24	2400,49	0,02	2393,03	0,29
13,08	2500	2462,76	1,49	2505,90	0,24	2499,43	0,02	2491,44	0,34
13,72	2600	2571,06	1,11	2608,06	0,31	2600,55	0,02	2592,20	0,30
14,34	2700	2675,97	0,89	2705,75	0,21	2697,59	0,09	2689,04	0,41
14,99	2800	2785,97	0,50	2806,84	0,24	2798,41	0,06	2789,82	0,36
15,63	2900	2894,27	0,20	2905,04	0,17	2896,85	0,11	2888,31	0,40
16,29	3000	3005,95	0,20	3004,92	0,16	2997,58	0,08	2989,17	0,36
16,95	3100	3117,64	0,57	3103,39	0,11	3097,59	0,08	3089,34	0,34
17,62	3200	3231,02	0,97	3201,91	0,06	3198,45	0,05	3190,35	0,30
18,28	3300	3342,70	1,29	3297,53	0,07	3297,24	0,08	3289,21	0,33
18,97	3400	3459,46	1,75	3396,00	0,12	3400,00	0,00	3391,92	0,24
19,66	3500	3576,23	2,18	3492,93	0,20	3502,32	0,07	3494,00	0,17
20,35	3600	3692,99	2,58	3588,31	0,32	3604,30	0,12	3595,47	0,13

В качестве объекта измерений предлагается использовать серийно выпускаемые лампы, в которых вольфрамовое тело накала располагается в вакууме или атмосфере инертного газа.

При использовании бытовых ламп температура стеклянной колбы значительно меньше температуры вольфрамовой спира-

ли. В качестве ламп использовались вакуумные лампы типа В220-230-25 и газополные В220-230-25. Мощность ламп составляет 25 Вт, что упрощает требования к используемому оборудованию.

Измерение сопротивления осуществляется на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке.

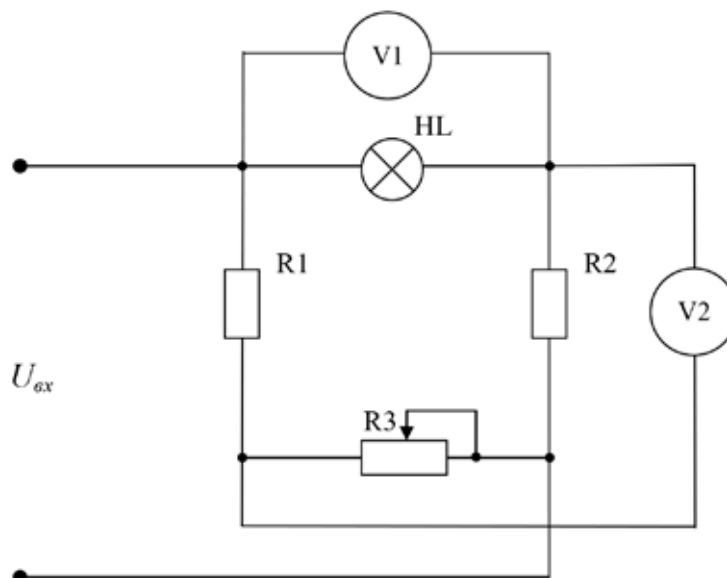


Схема для измерения сопротивления тела накала лампы

Для обеспечения высокой точности измерений лампа  $HL$  включается в одно из плеч моста. Температура тела накала лампы изменяется регулированием подаваемого на вход электрической схемы напряжения  $U_{вх}$ . Величина напряжения, прикладываемого к источнику света при этом, регистрируется вольтметром  $V1$ . Уровень напряжения на лампе будет определять величину температуры тела накала.

При измерениях устанавливается баланс плеч моста после изменения прикладываемого входного напряжения, определяемый по нулевым показаниям вольтметра  $V2$ . Уравновешивание моста достигается изменением сопротивления  $R3$ . Сопротивление лампы при этом вычисляется по формуле

$$R_l = R1R2 / R3. \quad (6)$$

Сопротивление и изменение сопротивления токоведущей арматуры лампы при измерениях не учитывалось, поскольку их величины на несколько порядков меньше соответствующих величин вольфрамовой спирали.

При проведении измерений необходимо учитывать большую величину протекающего тока по лампе и большую мощность, выделяемую на резисторе в соседней ветви моста.

В схеме используется реостат РПШ-0,6, магазин сопротивлений РЗЗ, магазин сопротивлений МСР 58, вольтметр В7-26. Питание схемы для более высокой точности измерений осуществлялось постоянным напряжением от регулируемого источника.

### Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 представлены измеренные значения электрического сопротивления лампы типа В220-230-25 и Б220-230-25 при различных величинах прикладываемого напряжения.

В табл. 2 также приводятся рассчитанные по (4) величины температур вольфрамовой спирали, соответствующие измеренным значениям сопротивлений и рассчитанным отношениям  $R_l / R_{300}$ .

Для указанных типов ламп температуру тела накала можно определять по величине напряжения на них. Следует отметить, что по результатам измерений температура вольфрамовой спирали газополных ламп имеет большее значение. Это определяет их большую световую отдачу при одинаковых значениях прикладываемого напряжения.

Сравнение измеренных величин сопротивлений и рассчитанных отношений  $R_l / R_{300}$  с известными данными показывает их соответствие. Например, измеренное отношение  $R_l / R_{300}$  ламп В220-230-25 для температуры 1406 К равно 6,61 (известная аналогичная величина для 1400 К равна 6,58), для 1702 К равно 8,28 (известная аналогичная величина для 1700 К равна 8,28). Лампы В220-230-25 при 1094 К имеют отношение  $R_l / R_{300}$  равное 4,92 (известная аналогичная величина для 1100 К равна 4,95), при 1912 К равное 9,5 (известная аналогичная величина для 1900 К равна 9,44).

Таблица 2

Зависимость электрического сопротивления и температуры тела накала ламп от напряжения

U, В	Б220-230-25			Б220-230-25		
	$R_r$ , Ом	$R_r / R_{300}$	$t$ , К	$R_r$ , Ом	$R_r / R_{300}$	$t$ , К
0	174,1	1,00	315	148,4	1,00	315
20	760,9	4,37	989	477,8	3,22	766
40	985,3	5,66	1232	730,5	4,92	1094
60	1150,3	6,61	1406	964,1	6,50	1385
80	1317,5	7,57	1577	1125,6	7,58	1580
100	1441,2	8,28	1702	1280,6	8,63	1763
120	1544,0	8,87	1804	1409,8	9,50	1912
140	1634,5	9,39	1893	1528,9	10,30	2047
160	1761,2	10,12	2016	1637,5	11,03	2168
180	1842,9	10,59	2094	1732,8	11,68	2273
200	1917,8	11,02	2165	1818,1	12,25	2366
220	1990,6	11,43	2234	1887,3	12,72	2441

### Заключение

Получена полиномиальная зависимость изменения температуры от изменения величины электрического сопротивления вольфрамовой проволоки. Она позволит определять температуру без использования специализированных средств измерений и проектировать нагревательные и осветительные приборы с учетом полученных значений. Известное линейное изменение электрического сопротивления вольфрама от температуры с использованием температурного коэффициента сопротивления имеет более высокую погрешность, чем полученная функция. Результаты измерений электрического сопротивления вольфрамовой проволоки, являющейся телом накала ламп, также свидетельствуют о возможности использования полученной полиномиальной зависимости.

### Список литературы

1. Агте К., Вацек И. Вольфрам и молибден. М.: Энергия, 1964. 229 с.
2. Удельное сопротивление и площадь поперечного сечения вольфрамовой проволоки. [Электронный ресурс]. URL: <https://avglob.org/reference/udelnoe-soprotivleniie-provoloki.html> (дата обращения: 28.11.2022).
3. Зависимость сопротивления проводника от температуры. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sxemotehnika.ru/zavisimost-soprotivleniia-provodnika-ot-temperatury.html> / (дата обращения: 28.11.2022).
4. Королев А.П., Лоскутова А.Д. Исследование электрофизических свойств композита железо – карбид вольфрама // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2017. Т. 23. № 3. С. 535–540.
5. Рудикова Л.В. Microsoft Office Excel 2019. СПб.: БХВ-Петербург, 2020. 622 с.
6. Александер М., Куслейка Р. Excel 2019. Библия пользователя. СПб.: ООО «Диалектика», 2019. 1136 с.
7. Зазыгин П.В., Родин В.В. Демонстрация температурного изменения сопротивления металлов // Учебный эксперимент в высшей школе. 2002. № 1. С. 39–43.