

КРАВЧЕНКО ІГОРКПІ ім. Ігоря Сікорського
ORCID ID: [0000-0002-9223-057X](https://orcid.org/0000-0002-9223-057X)
e-mail: kravchenko.igor@iit.kpi.ua**МАМУТА МАРИНА**КПІ ім. Ігоря Сікорського
ORCID ID: [0000-0002-7674-4984](https://orcid.org/0000-0002-7674-4984)
e-mail: rybalkomaryna@gmail.com

КОЕФІЦІЄНТ ВИПРОМІНЕННЯ ЛАМП РОЗЖАРЮВАННЯ

В роботі наведено результати табуляції та комп'ютерного моделювання методами поліноміальної апроксимації та лінійного прогнозування значень коефіцієнта випромінення вольфраму для радіометричних моделей оптичних ламп розжарювання.

Ключові слова: коефіцієнт випромінення, вольфрам, лампа розжарювання, лінійне прогнозування.

KRAVCHENKO IGOR, MAMUTA MARYNA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

EMISSIVITY OF FILAMENT LAMPS

Quartz Tungsten Halogen Filament Electric Lamps (QTH FEL) are still widely used as light sources in various photoelectric systems and are currently the irradiance transfer standard following the introduction of the USA National Institute of Standards and Technology (NIST). Most of world leading manufactories, such as Phillips, OSRAM, GE, has FELs in its product lines. For system modelling and characterization, the Absolute Black Body (ABB) model is used with correction factor by filament emissivity. The most reliable data of tungsten emissivity have some peculiarity: they are represented in graphs format, for visual waves length and for temperatures up to 2800 K. Which makes it impossible to use it for infrared systems and for modern FEL, which has color temperatures 2850 K – 3200 K.

This paper presents the results of research of convection graphs De Vos data to numerical form and extrapolation for temperatures up to 3200 K. It was determined that from many data sources original De Vos data are most useful for tabulating. The necessity of correction of grid nonorthogonality and distorsion are determined. It was found, that emissivity has near linear dependence from temperature. That's why polinomial linear, quadratic and cubic approximation extention and linear prediction has been studied for data extrapolation. Spectral ranges and extrapolation methods for SSE minimizing are defined. The estimated prediction absolute, relative errors and standard deviation were calculated. The expanded data for tungsten emissivity with standard deviation less than 0.0005, relative error less than 0.004 for temperatures up to 3200 K were obtained.

Keywords: emissivity, tungsten, filament lamp, incandescent lamp, linear prediction.

Постановка проблеми

В багатьох оптико-електронних системах джерелами випромінювання слугують оптичні лампи розжарювання. В якості робочих еталонів для експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків параметрів фотоприймачів та оптико-електронних систем регулюючими органами, зокрема Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST), визначені світловимірвальні лампи розжарювання [1; 2]. Тільки деякі виробники вказують для ламп спектральну щільність енергетичної світності для обмеженої (4–7) кількості стандартизованих довжин хвиль [3]. Для більшості ламп визначається робоча кольорова температура: NBS87, NBS1133 [4], СИС, СИП [5] лампи виробництва Philips [6], Osram [7], GE [8] тощо. Робоча кольорова температура оптичних ламп варіюється від 2400 К до 3200 К з основним значенням 2856 К та максимальним до 8000 К [6].

Колби оптичних ламп виготовляються з кварцового скла, що забезпечує їхнє застосовування для ультрафіолетового, видимого та інфрачервоних діапазонів NIR (IR-A), SWIR (IR-B), тобто для довжин хвиль від 0.2 мкм до 2.6 мкм.

Актуальним є питання отримання табличних значень спектральної щільності коефіцієнта випромінення таких ламп для діапазону температур до 3200 К.

Аналіз останніх джерел

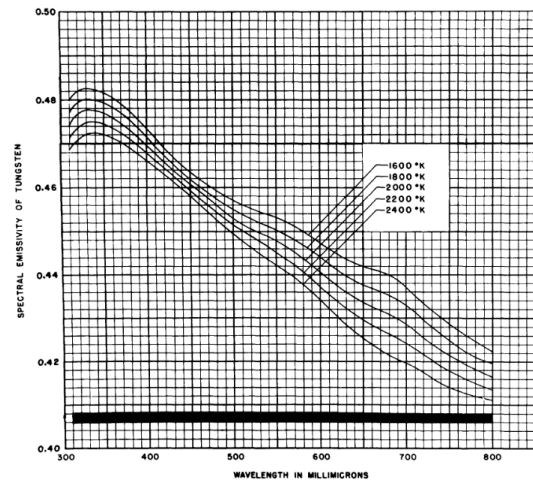
Випромінювальні властивості тіла розжарювання лампи обумовлюються матеріалом тіла: вольфрамом, - та його формою.

Найбільш точними вважаються експериментальні дані спектральної щільності напівсферичного коефіцієнта випромінення вольфраму Ларабі (R. D. Larrabee) [9]. Ці дані наведені табличному вигляді (рис. 1 а) та у вигляді графіків (рис. 1 б) у видимому діапазоні для (0.31–0.4) мкм з кроком 0.1 мкм, для (0.4–0.8) мкм з кроком 0.2 мкм, для температур від 1600 К до 2400 К з кроком 200 К. Хоча результати Ларабі вважаються найбільш достовірними [1; 10], принциповим недоліком даних є обмежені діапазони температур та довжин хвиль. Вказаний недолік унеможливує застосування даних для систем ультрафіолетового та інфрачервоного діапазонів, для опису галогенних ламп розжарювання.

Найбільш застосовуваними в науково-технічних міжнародних джерелах є експериментальні дані спектральної щільності нормального коефіцієнта випромінення вольфраму Де Воса (J. C. De Vos). Оригінальні дані наведені у вигляді графіків для температур від 1600 К до 2800 К з кроком 200 К в діапазоні (0.23–2.7) мкм [11]. Саме ці дані використані в розрахункових моделях Національного інституту стандартів і технологій США та Національної фізичної лабораторії Фінляндії.

Table I. Spectral Emissivity of Tungsten.

Wavelength (m μ)	Temperature				
	1600° K	1800° K	2000° K	2200° K	2400° K
300	—	—	—	—	—
310	0.4798	0.4769	0.4740	0.4711	0.4682
320	0.4823	0.4795	0.4767	0.4739	0.4711
330	0.4828	0.4801	0.4774	0.4747	0.4720
340	0.4823	0.4798	0.4773	0.4748	0.4723
350	0.4816	0.4792	0.4768	0.4744	0.4720
360	0.4804	0.4781	0.4758	0.4735	0.4712
370	0.4791	0.4769	0.4747	0.4725	0.4703
380	0.4775	0.4754	0.4733	0.4712	0.4691
390	0.4754	0.4735	0.4716	0.4697	0.4678

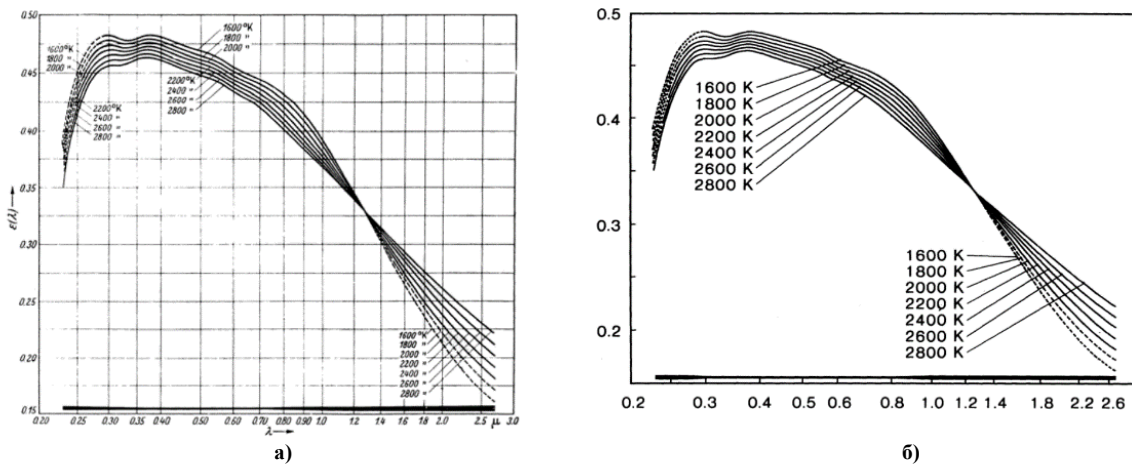


а) б)
Рис. 1. Дані Ларабі [9]: а) табличні значення; б) графіки

Метою роботи є табуляція графіків спектрального коефіцієнта випромінення вольфраму для отримання табличних даних, дослідження методів екстраполяції та розширення значень спектрального коефіцієнта випромінення вольфраму для актуальних робочих температур ламп в 3000 К, 3200 К.

Виклад основного матеріалу

Не зважаючи на те, що координатна сітка графіків де Воса не є ортогональною, мітки осі абсцис не відтворюють заявлений логарифмічний масштаб, а вертикальні лінії сітки мають явну «подушкоподібну» дисторсію, саме ці оригінальні дані є найбільш зручними для квантування. Екземпляри графіків, наведені в інших джерелах [12–14] або не мають координатної сітки, або мають сітку, яка не є достатньою для згущення (рис. 2). При цьому всі згадані екземпляри мають спотворений логарифмічний масштаб осі абсцис (рис. 3).



а) б)
Рис. 2. Графіки коефіцієнта випромінення: а) [14]; б) [13]

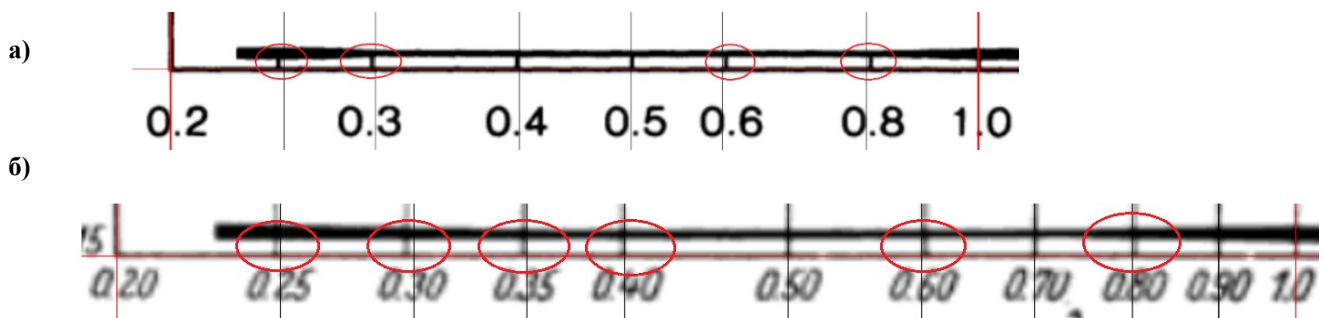


Рис. 3. Похибки координатної сітки: а) [13]; б) [14]

Проведений аналіз поведінки даних для відомих значень спектральної густини коефіцієнта випромінення вольфраму при температурі 2800 К.

З графіків залежності коефіцієнта випромінювання від температури (рис. 4) видно, що залежність наближена до лінійної, тому в якості наближення обрані метод прогнозування та поліноміальні апроксимації від лінійної до кубічної.

Метод апроксимації за критерієм мінімуму СКВ проводився алгебраїчним поліномом для кожної довжини хвилі з діапазону (0.23–2.7) мкм:

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^N a_i T^i,$$

де a_i – коефіцієнти поліному; T – значення температури.

Метод лінійного прогнозування проводився з розрахунком коефіцієнтів кореляції методи Берга для кожної довжини хвилі з діапазону (0.23–2.7) мкм:

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^{k-1} a_i \varepsilon_i,$$

де a_i – коефіцієнти кореляції даних; ε_i – відомі табличні значення у вузлах рівномірної сітки.

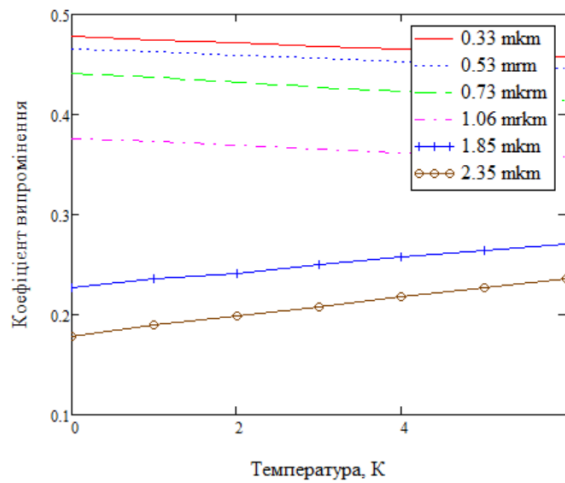


Рис. 4. Залежність спектрального коефіцієнта випромінювання від температури

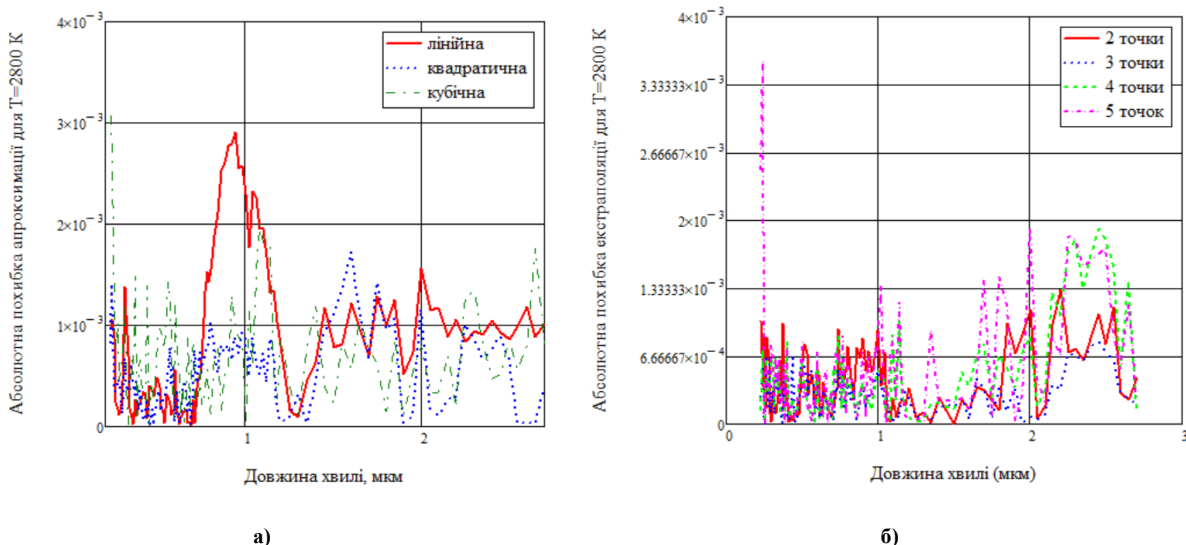


Рис. 5. Абсолютні похибки: а) апроксимації; б) лінійного прогнозування

Розрахункові значення абсолютної помилки для поліноміальної апроксимації для $T=2800$ К наведені на рис. 5. З графіків видно, що для різних значень довжини хвилі точніше наближення надають різні методи. За результатами аналізу виділено п'ять спектральних діапазонів для використання методів лінійної апроксимації та прогнозування по 2-х та 3-х точках.

За результатами аналізу за критерієм мінімальної похибки виявлено, що для різних діапазонів кращий результат надають різні методи екстраполяції. Отримані значення абсолютної похибки Δ_{max} , відносної похибки δ_{max} та середньоквадратичного відхилення СКВ регресійного наближення наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Похибки екстраполяції для $T=2800$ К

Діапазон хвиль, мкм	Метод	$\Delta_{\max} \times 10^{-3}$	$\delta_{\max} \times 10^{-3}$	СКВ $\times 10^{-3}$
0.23–0.34	Прогнозування по 3-х точках	0.660	1.496	0.423
0.35–0.52	Лінійна апроксимація	0.487	1.085	0.322
0.53–1.35	Прогнозування по 3-х точках	0.534	1.432	0.304
1.4–1.7	Прогнозування по 2-х точках	0.364	1.264	0.285
1.75–2.7	Прогнозування по 3-х точках	0.802	3.478	0.483

В результаті комп'ютерного моделювання отримані розширені табличні значення з трьома вірними знаками (СКВ <) нормального коефіцієнта випромінювання вольфраму в діапазонах:

(0.23–0.8) мкм з кроком 0.1 мкм;

(0.8–1.2) мкм з кроком 0.2 мкм;

(1.2–2.7) мкм з кроком 0.5 мкм;

для діапазону температур від 1600 К до 3200 К з кроком 200 К.

Значення прогнозованої відносної похибки для $T=2800$ К наведені на рис. 6. Числові значення розрахованих значень спектральної щільності нормального коефіцієнта випромінювання вольфраму для $T=3000$ К, 3200 К наведено в таблиці 2.

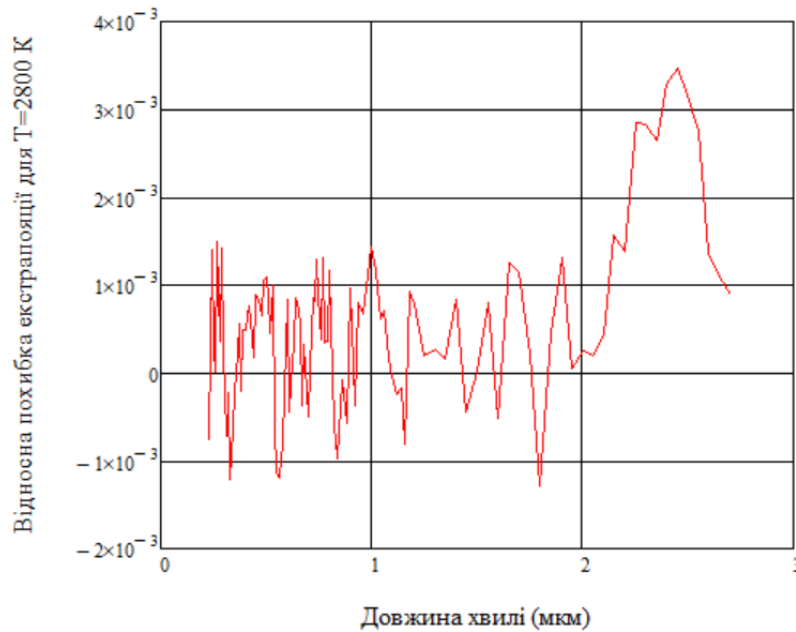


Рис. 6. Відносна похибка екстраполяції спектрального коефіцієнта випромінювання вольфраму за даними Де Воса для $T=2800$ К

Висновки

Проведений аналіз відомих джерел та показано, що найбільш достовірним джерелом значень спектрального нормального коефіцієнта випромінювання вольфраму є [11]. Отримані табличні дані коефіцієнта випромінювання для температур від 1600 К до 2800 К з кроком 200 К в діапазоні (0.23–2.7) мкм.

Шляхом комп'ютерного експерименту досліджено точність екстраполяції методами поліноміального наближення та лінійного прогнозування. Виявлено, що в різних спектральних діапазонах більшу точність екстраполяції забезпечують різні методи. Вихідні табличні дані розширені для температур 3000 К та 3200 К.

Таблиця 2

Спектральний нормальний коефіцієнт випромінювання вольфраму

λ , мкм \ T, К	3000	3200	λ , мкм \ T, К	3000	3200	λ , мкм \ T, К	3000	3200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.23	0.341	0.334	0.38	0.460	0.457	0.53	0.442	0.439
0.24	0.381	0.375	0.39	0.459	0.456	0.54	0.441	0.438
0.25	0.404	0.397	0.40	0.458	0.454	0.55	0.440	0.436
0.26	0.423	0.417	0.41	0.456	0.453	0.56	0.438	0.435
0.27	0.436	0.431	0.42	0.455	0.451	0.57	0.437	0.433

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.28	0.444	0.440	0.43	0.453	0.450	0.58	0.435	0.431
0.29	0.450	0.445	0.44	0.452	0.448	0.59	0.432	0.428
0.30	0.452	0.447	0.45	0.450	0.447	0.60	0.430	0.427
0.31	0.452	0.447	0.46	0.449	0.445	0.61	0.429	0.426
0.32	0.452	0.448	0.47	0.447	0.444	0.62	0.428	0.424
0.33	0.454	0.450	0.48	0.446	0.443	0.63	0.426	0.423
0.34	0.456	0.453	0.49	0.446	0.442	0.64	0.425	0.421
0.35	0.458	0.456	0.50	0.445	0.441	0.65	0.424	0.420
0.36	0.460	0.457	0.51	0.444	0.440	0.66	0.422	0.419
0.37	0.460	0.457	0.52	0.443	0.440	0.67	0.420	0.417
0.68	0.419	0.415	1.00	0.366	0.365	1.75	0.284	0.289
0.69	0.417	0.413	1.02	0.360	0.358	1.80	0.281	0.286
0.70	0.415	0.411	1.04	0.360	0.359	1.85	0.276	0.282
0.71	0.413	0.409	1.06	0.356	0.354	1.90	0.273	0.280
0.72	0.412	0.407	1.08	0.353	0.351	1.95	0.270	0.276
0.73	0.410	0.406	1.10	0.350	0.349	2.00	0.265	0.272
0.74	0.407	0.403	1.12	0.348	0.346	2.05	0.263	0.270
0.75	0.405	0.401	1.14	0.345	0.344	2.10	0.259	0.266
0.76	0.404	0.401	1.16	0.342	0.340	2.15	0.256	0.263
0.77	0.402	0.398	1.18	0.339	0.339	2.20	0.253	0.260
0.78	0.400	0.396	1.20	0.337	0.336	2.25	0.250	0.258
0.79	0.398	0.395	1.25	0.330	0.330	2.30	0.247	0.255
0.80	0.396	0.393	1.30	0.325	0.326	2.35	0.244	0.252
0.82	0.393	0.390	1.35	0.320	0.321	2.40	0.242	0.250
0.84	0.389	0.385	1.40	0.315	0.317	2.45	0.239	0.247
0.86	0.387	0.384	1.45	0.309	0.311	2.50	0.237	0.245
0.88	0.384	0.381	1.50	0.305	0.308	2.55	0.234	0.242
0.90	0.380	0.378	1.55	0.301	0.304	2.60	0.232	0.240
0.92	0.377	0.374	1.60	0.296	0.300	2.65	0.230	0.238
0.94	0.374	0.372	1.65	0.292	0.297	2.70	0.227	0.235
0.96	0.370	0.368	1.70	0.288	0.293			
0.98	0.368	0.366						

Література

- Hunt T., Ruth Montgomery, Neil Harrison, Emma Woolliams (2004). An Investigation into the Collapse of Filaments of FEL QTH Lamps used as Irradiance Standards. NPL REPORT DQL-OR 003. 64 p.
- Ohno Y. Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-37. 1997. 100 p.
- Model 5000 FEL Lamp Source System Data Sheet. Gamma Scientific. <https://gamma-sci.com/wp-content/uploads/2020/10/5000-FEL-1000-Watt-Lamp-Source-rev-3.18.2.pdf>.
- Booker Robert L., Donald A. McSparron (1987). Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-15 / Robert L. Booker. 88 p.
- ГОСТ 10771082. Лампи розжарювання електричні світловимірювальні робочі. Видавництво стандартів, 1988. 21 с.
- Philips Entertainment Lamps catalogue. Koninklijke Philips Electronics N.V. 2013. 109 p.
- FEL. Product datasheet. OSRAM GmbH. 2022. 3 p.
- Technical catalogue. European edition– GE Lighting, 2015. 133 p.
- Larrabee R. D. The spectral emissivity and optical properties of tungsten. Technical report 328. Massachusetts institute of technology, 1957. 88 p.
- Branstetter J. Robert NASA Technical note D-1088. Radiant heat transfer between nongray parallel plates of tungsten. 1961. 26 p.
- De Vos J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon. Physica 1954, Vol XX, P. 690-714.
- Rieck G. D. Tungsten and Its Compounds. Pergamon press, 1967. 137 p.
- Lassner Erik Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys and Chemical Compounds. Springer. 1999. 422 p.
- Rutgers G. A. Absolute radiometric measurements. NBS special publication 378. 1973. P. 53-62.

References

- Hunt T., Ruth Montgomery, Neil Harrison, Emma Woolliams (2004). An Investigation into the Collapse of Filaments of FEL QTH Lamps used as Irradiance Standards. NPL REPORT DQL-OR 003. 64 p.

-
2. Ohno Y. Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-37. 1997. 100 r.
 3. Model 5000 FEL Lamp Source System Data Sheet. Gamma Scientific. <https://gamma-sci.com/wp-content/uploads/2020/10/5000-FEL-1000-Watt-Lamp-Source-rev-3.18.2.pdf>.
 4. Booker Robert L., Donald A. McSparron (1987). Photometric Calibrations. NIST Special Publication 250-15 / Robert L. Booker. 88 r.
 5. HOST 10771082. Lampy rozzhariuvannia elektrychni svitlovymiriuvalni robochi. Vydavnytstvo standartiv, 1988. 21 s.
 6. Philips Entertainment Lamps catalogue. Koninklijke Philips Electronics N.V. 2013. 109 r.
 7. FEL. Product datasheet. OSRAM GmbH. 2022. 3 p.
 8. Technical catalogue. European edition– GE Lighting, 2015. 133 p.
 9. Larrabee R. D. The spectral emissivity and optical properties of tungsten. Technical report 328. Massachusetts institute of technology, 1957. 88 p.
 10. Branstetter J. Robert NASA Technical note D-1088. Radiant heat transfer between nongray parallel plates of tungsten. 1961. 26 p.
 11. De Vos J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon. Physica 1954, Vol XX, P. 690-714.
 12. Rieck G. D. Tungsten and Its Compounds. Pergamon press, 1967. 137 p.
 13. Lassner Erik Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys and Chemical Compounds. Springer. 1999. 422 p.
 14. Rutgers G. A. Absolute radiometric measurements. NBS special publication 378. 1973. P. 53-62.