

Lucyna HEMKA

# METODYKA BADAŃ RADIALNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY W JARZNIKU WYSOKOPRĘŻNEJ LAMPY WYŁADOWCZEJ<sup>\*)</sup>

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne dwóch metod diagnozowania parametrów plazmy w jarzniku lampy wyładowczej, w oparciu o badanie radialnego rozkładu temperatury.*

**Słowa kluczowe:** *Lampa wyładowcza, radialny rozkład temperatury, symulator światła dziennego D<sub>65</sub>*

## 1. WSTĘP

---

Od kilku lat w Instytucie Elektrotechniki prowadzone są prace, których celem jest kształtowanie widma promieniowania wieloskładnikowej plazmy wysokiego ciśnienia, tak aby można było zrealizować sztuczne źródło promieniowania o charakterystyce emisji odpowiadającej wymaganiom normy dla symulatora światła dziennego D<sub>65</sub>.

---

<sup>\*)</sup> Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2006....2008 jako projekt badawczy Nr 3 T10c 035 30

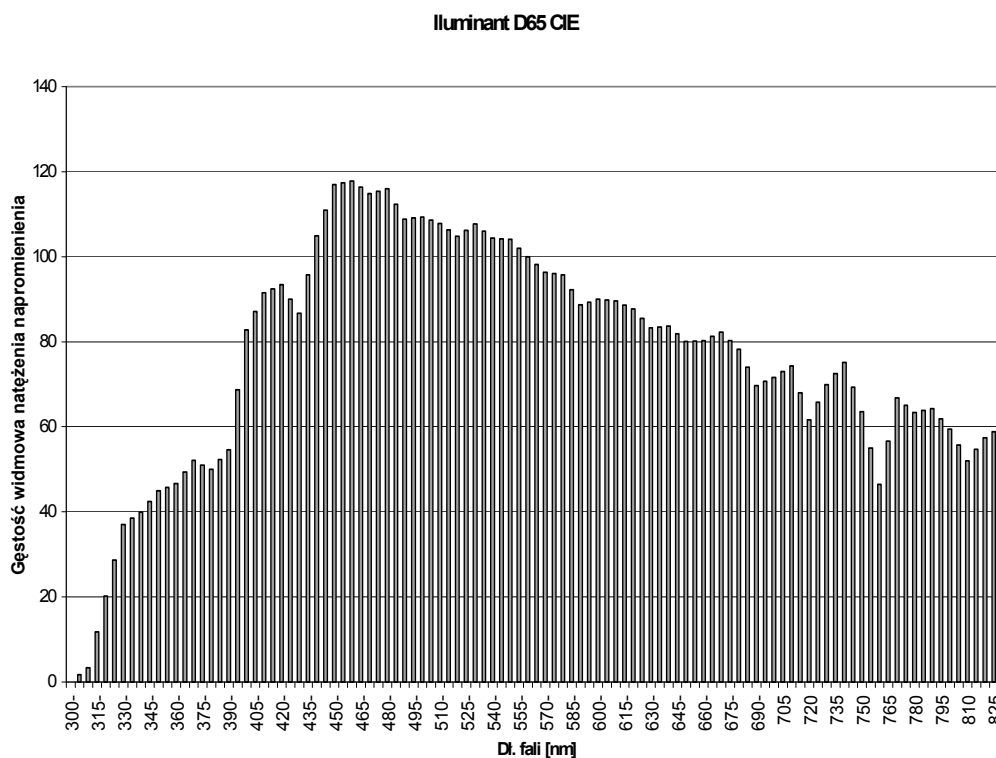
---

**dr Lucyna HEMKA**  
e-mail: l.hemka@iel.waw.pl

Zakład Techniki i Systemów Oświetlenia  
Instytut Elektrotechniki

Dotychczasowe prace prowadzące do uzyskania ze znanych sztucznych źródeł światła symulatora światła dziennego D<sub>65</sub> o parametrach widmowych spełniających zalecenia CIE, doprowadziły do wyselekcjonowania dwóch rodzajów źródeł powszechnie stosowanych na świecie jako wzorce światła dziennego. Są to : wysokoprężna lampa ksenonowa i zestaw żarówek halogenowych z odpowiednio dobranym układem optycznym.

Oba te źródła w praktycznym, kolorymetrycznym zastosowaniu wykazują pewne zalety, ale też szereg wad.



**Rys. 1. Wzorec światła dziennego wg zaleceń CIE**

W trakcie prac prowadzonych w IEL zwrócono szczególną uwagę na źródło, które, ze względu na swoje właściwości fizyko-chemiczne i techniczne, wydaje się być idealne do realizacji założonego celu naukowego, jakim jest uzyskanie sztucznego źródła światła o charakterystyce emisji maksymalnie zbliżonej do światła dziennego. Chodzi mianowicie o lampy wyładowcze domieszkowane związkami metali. Kształt rozkładu widmowego takiej lampy zależy od kilku czynników między innymi: od rodzaju i ilości poszczególnych składników plazmy, rozkładu temperatury w jarzniku, prężności par czy wymiarów gaba-

rytowych jarznika. Na każdy z tych parametrów ma wpływ konstruktor lampy i może poprzez odpowiedni pośredni lub bezpośredni ich dobór, wpływać na kształt emitowanego przez lampę widma emisyjnego.

## 2. RADIALNY ROZKŁAD TEMPERATUR W JARZNIKU LAMPY WYŁADOWCZEJ

---

Jednym z podstawowych parametrów, którego wartość w różnych punktach łuku wpływa w znacznym stopniu na właściwości elektryczne i świetlne lampy, jest radialny rozkład temperatury. Wartość temperatury w różnych punktach przestrzeni wyładowczej określa rozkład prędkości elektronów i jonów, stopnie wzbudzenia i jonizacji, natężenie prądu, gradient potencjału oraz strumień promienisty i świetlny.

Znajomość radialnego rozkładu temperatury pozwala również wyznaczyć inne parametry charakteryzujące plazmę wyładowania takie jak: radialny rozkład gęstości atomów  $n(R)$  poszczególnych składników plazmy oraz ich ciśnienia parcjalne, stany energetyczne oraz spektralne moce promieniowania.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest przedstawienie dwóch metod badawczych pozwalających określić na podstawie badania kształtu linii emisyjnych wysyłanych przez plazmę wyładowania, radialny rozkład temperatury  $T(R)$  (gdzie  $R$  jest promieniem jarznika) w jarzniku lampy wyładowczej.

Metody badawcze procesów zachodzących w źródłach wyładowczych, prowadzące do określenia szeregu parametrów fizycznych plazmy, opierają się głównie na metodach spektroskopii optycznej.

Radialny rozkład temperatury w jarzniku lampy można określić na podstawie badań zmian intensywności wzdłuż promienia jarznika:

- linii spektralnych optycznie wąskich;
- linii nierezonansowych odwróconych;
- linii rezonansowych odwróconych.

Dla każdego z tych rodzajów linii istnieje inne podejście teoretyczne pozwalające określić rozkład temperatury  $T(R)$  wewnątrz jarznika.

W każdym przypadku zakłada się, że plazma ma symetrię cylindryczną oraz że w plazmie istnieje lokalna równowaga termodynamiczna. Przy tych założeniach natężenie promieniowania  $I(\lambda)$  wysyłanego z małego obszaru jarznika o promieniu  $r$  wzdłuż wybranego kierunku  $x$  wyznacza się z równania transportu promieniowania:

$$\frac{dI_{\lambda}(x)}{d(x)} = E_{\lambda}(x) - k'(x)I_{\lambda}(x) \quad (1)$$

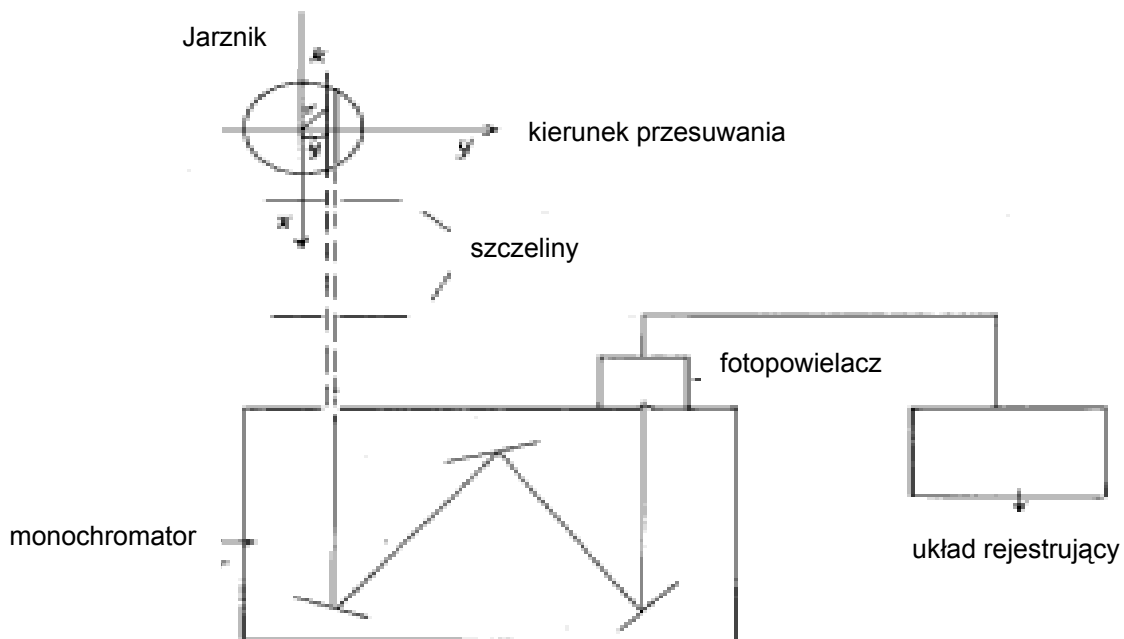
Po scałkowaniu powyższego równania po średnicy jarznika otrzymuje się

$$I_{\lambda}(x) = \int_{-R}^{+R} E_{\lambda}(x) \exp - \left\{ \int_x^R k'(x) dx' \right\} dx \quad (2)$$

gdzie:  $E_{\lambda}(x)$  i  $k'(x)$  – są odpowiednio współczynnikami emisji i absorpcji dla danego  $x$  i  $\lambda$ , a  $R$  promieniem jarznika.

### 3. METODA WYZNACZANIA RADIALNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY W JARZNIKU LAMPY WYŁADOWCZEJ NA PODSTAWIE BADANIA LINII OPTYCZNIE WĄSKICH

Badanie linii optycznie wąskich ma szczególne znaczenie dla określenia parametrów fizycznych plazmy w lampach metalohalogenkowych. W skrócie



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

metoda ta polega na pomiarze intensywności wybranej linii optycznie wąskiej, z której określa się radialny rozkład temperatury w jarzniku lampy.

Matematycznie zagadnienie sprowadza się do rozwiązania równania transportu promieniowania (2) w plazmie, w którym pomija się część absorpcyjną, ponieważ linie optycznie wąskie nie są absorbowane przez plazmę.

Intensywność optycznie wąskiej linii obserwowanej wzdłuż wybranego kierunku „ $x$ ” określa się z wyrażenia:

$$I_{\gamma}(y) = \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} E_{\lambda}(r) dy \quad (3)$$

w którym emisyjność  $E_{\lambda}$  wyraża się wzorem

$$E_{\lambda}(r) = \frac{h\nu}{c^2} \frac{A_{kl} g}{Z} n(r) \quad (4)$$

gdzie:

- $h\nu$  – energia emitowanego kwantu promieniowania,
- $A_{kl}$  – prawdopodobieństwo przejścia,
- $g_k$  – waga statystyczna danego poziomu,
- $Z$  – funkcja podziału równa wadze poziomu podstawowego,
- $E_k$  – energia stanu wzbudzonego,
- $K$  – stała Boltzmana,
- $P_e(\lambda)$  – funkcja opisująca kształt linii.

W celu wyznaczenia radialnego rozkładu temperatury należy rozwiązać równanie (3). Do rozwiązania tego typu równania stosuje się tzw. inwersję Abela pozwalającą wyznaczyć emisyjność  $E_{\lambda}(r)$  jako funkcję natężenia  $I_{\lambda}(y)$ , a mianowicie

$$E_{\lambda}(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(y)}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (5)$$

Całkę tego typu rozwiązuje się metodami numerycznymi. Procedura obliczeniowa polega na wygładzaniu danych doświadczalnych metodą najmniejszych kwadratów, wyliczeniu współczynników szeregu Legendra a następnie wyznaczeniu  $E_{\lambda}(r)$  dla każdego  $r$ . Otrzymane wartości wstawia się do

wyrażenia (4) i oblicza radialny rozkład temperatury. W wyrażeniu (4) występuje wielkość zmienna ze zmianą położenia „ $r$ ” a mianowicie  $n(r)$  – będąca rozkładem gęstości badanego składnika plazmy.

Związana jest ona z ciśnieniem parcjalnym wyrażeniem

$$p = kT(r)n(r) \quad (6)$$

Omówiona powyżej metoda wyznaczania rozkładu radialnego temperatury może być stosowana tylko w przypadkach, gdy znane jest ciśnienie parcjalne badanego składnika plazmy. Nadaje się na przykład do badania rozkładu temperatury w lampach metalohalogenkowych, w których ciśnienie par rtęci wyznacza się z dozy rtęci wprowadzonej do jarznika. Oczywiście poza wielkością dozy potrzebna jest również znajomość temperatury chłodnego miejsca oraz objętość między elektrodami. Temperaturę najchłodniejszego miejsca w jarzniku wyznacza się metodą np. pirometryczną.

Gdy nie potrafimy określić ciśnienia żadnego składnika plazmy, a w spektralnym rozkładzie energetycznym emitowanego przez źródło promieniowania występują dla jednego składnika plazmy dwie linie optycznie wąskie nie należące do tego samego multipletu stosuje się inną procedurę obliczeniową. A mianowicie metodą najmniejszych kwadratów wygładza się dane eksperymentalne dla obu linii i oblicza wartości  $E_\lambda(r)$  dla każdej linii. Dla każdego  $r$  wyznacza się iloraz:

$$\frac{E_{\lambda 1}(r)}{E_{\lambda 2}(r)} = \frac{(A_{kl}g_k)_1}{(A_{mn}g_m)} \exp\left\{-\frac{E_m - E_k}{kT(r)}\right\} \quad (7)$$

i z niego wyznacza wartości  $T(r)$ . Z otrzymanego rozkładu radialnego temperatury wyznacza się gęstość atomów  $n(r)$  tego składnika plazmy, w którego widmie występują linie optycznie wąskie.

Otrzymany powyższą metodą rozkład gęstości atomów rtęci jest pomocny przy analizowaniu linii optycznie szerokich wykazujących samoobrócenie. Ponieważ samoobrócenie linii widmowych jest wynikiem zderzeń pomiędzy atomami badanego składnika a atomami rtęci, więc odległość pomiędzy samoobróconymi maksimumami dla badanego składnika  $\Delta\lambda$  jest proporcjonalna do średniej gęstości atomów rtęci

$$n_{Hg} = \frac{1}{2R} \int_{-R}^R n(r) dr = \frac{1}{2R} P_{Hg} \int_{-R}^R \frac{1}{T(r)} dr \quad (8)$$

i średniej gęstości rozpatrywanego składnika  $n_x$

$$\Delta\lambda_{\max} = \text{const} \cdot n_x^\alpha n_{\text{Hg}}^\beta R^\gamma$$

gdzie:

$R$  jest promieniem jarznika.

$\alpha, \beta, \gamma$  są stałymi których wartość zawiera się w granicach 0,5 do 0,7.

#### 4. METODA BARTELS'A WYZNACZANIA RADIALNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY

W omawianej metodzie, podobnie jak w opisywanej wcześniej konieczne jest wprowadzenie pewnych założeń. A mianowicie zakłada się, że plazma ma symetrię cylindryczną oraz, że w plazmie istnieje stan lokalnej równowagi termodynamicznej (LRT), a to z kolei oznacza, że spełnione jest równanie Boltzmana dotyczące obsadzenia poszczególnych stanów w atomie oraz równanie Saha.

Jak już wspomiano na początku w widmie promieniowania wysyłanego przez wysokoprężne lampy wyładowcze występują poza liniami optycznie wąskimi, dla których część absorpcyjna we wzorze (2) jest do pominięcia, także linie optycznie szerokie, w których zasadniczą rolę odgrywają procesy absorpcji. Wśród linii optycznie szerokich rozróżnia się linie rezonansowe oraz linie nierezonansowe. Obydwa rodzaje linii charakteryzują się bardzo dużym współczynnikiem absorpcji w centrum linii i małym na jej zboczach. Metoda określania radialnego rozkładu temperatury w oparciu o badanie profili linii optycznie szerokich (nierezonansowych), w których następuje samoodwrócenie się została opracowana przez Bartels'a.

Określenie radialnego rozkładu temperatury w jarzniku lampy wyładowczej metodą Bartels'a przebiega wg następującej procedury:

- Wychodząc z równania transportu promieniowania

$$I_\lambda = \int_{-R}^R \varepsilon_\lambda(r_i) \exp \left[ - \int_0^R \chi(\lambda, r) dr' \right] dr, \quad (9)$$

- wprowadza się funkcję źródłową

$$I_\lambda = \frac{\varepsilon(r_i)}{\chi(r_i)},$$

- po przekształceniach matematycznych otrzymuje się wyrażenie na wartość natężenia promieniowania dla wyższego samoodwróconego maksimum

$$I_{\lambda} = I_{\lambda \max} \cdot MY(\tau_0) \quad (10)$$

gdzie:

- $I_{\lambda \max}$  – jest maksymalną wartością funkcji źródłowej równą funkcji Wien'a dla promieniowania ciała doskonale czarnego;
- $MY(\tau)$  – jest wielkością mniejszą od jedności i określa ile razy gęstość promieniowania w maksimum samoodwróconym jest mniejsza od gęstości promieniowania ciała doskonale czarnego dla danej temperatury.

Funkcja źródłowa zależy od położenia i nałożone są na nią następujące ograniczenia:

1. źródło światła ma symetrię cylindryczną;
2. wartość funkcji źródłowej spada monotonicznie wzdłuż promienia od osi ku ściance.

Według Bartels'a maksima natężenia promieniowania dla linii samoodwróconej są zależne tylko od rozkładu funkcji źródłowej i względnego rozkładu współczynnika absorpcji.

W obszarze wyładowania, w którym panuje równowaga termodynamiczna, oba rozkłady są określone przez przestrzenny rozkład temperatury. Ponadto można założyć, że  $M$  i  $Y$  są w pierwszym przybliżeniu stałe i zależą w prostej zależności od energii stanu podstawowego, badanego stanu wzbudzonego i energii jonizacji, a mianowicie:

$$M = \sqrt{\frac{E_n + \frac{1}{2} E_j}{E_m + \frac{1}{2} E_j}} \quad (11)$$

$$Y = Y(p) = 0,736 + 0,264 p^2$$

$$p = \frac{6}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{M^2}{\sqrt{1 + 2 M^2}} \right). \quad (12)$$



Maksymalna funkcja źródłowa może być zastąpiona funkcją Wien'a przy założeniu, że

$$\frac{kT_m}{E_n + \frac{1}{2}E_j} \ll 0,1. \quad (13)$$

Stąd wyrażenie (4) na funkcję źródłową można zapisać w następującej postaci

$$I_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda \cdot kT_m}\right) \cdot Y \cdot M \cdot \Delta\lambda \quad (14)$$

stąd

$$T_m = \frac{c'}{\lambda} \cdot \frac{1}{\ln\left[Y \cdot M \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{A}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{I_\lambda}\right]} \quad (15)$$

gdzie:

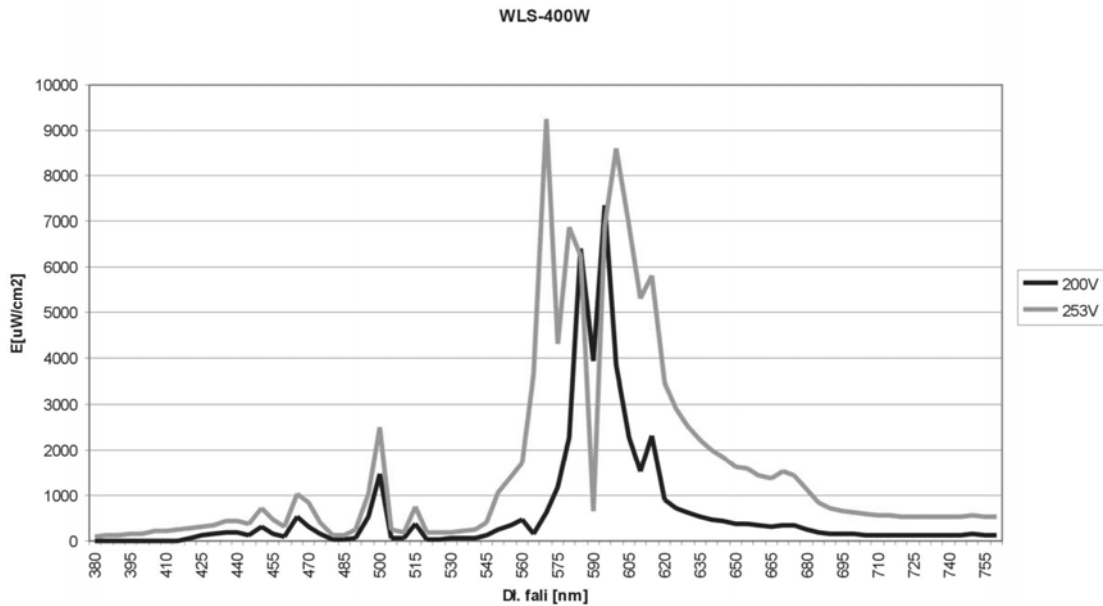
$$C' = \frac{c \cdot h}{k} = 1,4388 \cdot [cm \cdot K]$$

$$A = 2hc^2 = 11,908 \cdot 10^{-6} [erg \cdot cm^2 \cdot s^{-1}]$$

## 5. EKSPERYMENTALNE WYZNACZENIE RADIALNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY W OPARCIU O BADANIE LINII OPTYCZNIE SZEROKIEJ (METODA BARTELS'A)

Badania eksperymentalne wykonano na zautomatyzowanym stanowisku spektrofotometrycznym. Pomiary bezwzględnego rozkładu promieniowania badanej lampy wyładowczej wykonano metodą porównawczą poprzez porównanie z wzorcem rozkładu widmowego.

Omówioną powyżej metodę zastosowano do badania samoodwróconych linii sodu 586,8 nm (rys. 3) i 819,5 nm.



Rys. 3. Samoodwrócona linia D-sodu

Zmierzono radialny rozkład temperatury dla wyższego samoodwrócenia maksimum dla obu rozpatrywanych linii, a następnie w oparciu o wyrażenia (14) i (15) obliczono radialny rozkład temperatury. Jako  $I_\lambda$  przyjęto:

$$I_\lambda = \frac{I_{\lambda m}}{I_{\lambda wzm}} \cdot I_{wz} \cdot \frac{1}{t} = I_m \cdot \frac{1}{t} \quad (16)$$

gdzie:  $I_{\lambda m}$  i  $I_{\lambda wzm}$  są odpowiednio zmierzonymi wartościami natężenia promieniowania lampy badanej i wzorcowej dla danej długości fali,  $I_{wz}$  wartościami natężenia promieniowania wzorca,  $t$  – współczynnikiem transmisji kierunkowej.

Współczynnik transmisji kierunkowej słabo zmienia się z długością fali i jest jednakowy dla obu linii.

Uzyskane zmian wartości temperatury w zależności od odległości od osi wyładowania przedstawiono w tab. 2. (tab. 1 zawiera stałe niezbędne do przeprowadzenia obliczeń)

TABELA 1

Stale niezbędne do obliczeń radialnego rozkładu temperatury metodą Bartels' a

| Dł. fali<br>[nm] | $E_n$<br>[cm <sup>-1</sup> ] | $E_m$<br>[cm <sup>-1</sup> ] | $M$    | $Y$    | $2hc^2/\lambda^5$<br>[μW/cm <sup>3</sup> ] | $Hc/\lambda k$<br>[K <sup>-1</sup> ] | $2hc^2MY\Delta\lambda/\lambda^5$<br>[[μW/cm <sup>2</sup> ] |
|------------------|------------------------------|------------------------------|--------|--------|--|--------------------------------------|--|
| 568,8            | 2,1043                       | 4,2833                       | 0,8261 | 0,904  | $19,9965 \times 10^{14}$                   | 25294,47                             | $1,22454 \times 10^6$                                      |
| 819,5            | 2,1043                       | 3,6168                       | 0,8694 | 0,9267 | $3,2207 \times 10^{14}$                    | 17587,21                             | $0,22673 \times 10^6$                                      |

**TABELA 2**

Radialny rozkład temperatury dla linii sodu 586,8 nm i 819,5 nm

| $R$ [mm]     | 0    | 0,5  | 1    | 1,5  | 2    | 2,5  |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| $T(r)_{819}$ | 3970 | 3950 | 3920 | 3880 | 3760 | 3640 |
| $T(r)_{586}$ | 4010 | 4000 | 3950 | 3900 | 3820 | 3660 |

## 6. PODSUMOWANIE

Znajomość radialnego rozkładu temperatury w jarzniku lampy wyładowczej jest jedną z ważniejszych informacji, której znajomość jest niezbędna przy konstruowaniu lampy.

Umożliwia ona uzyskanie szeregu informacji o plazmie wyładowania min. określenia ciśnienia parcjalnego składników plazmy oraz rozkładu gęstości atomów. Pozwala wyznaczyć parametry promieniste i elektryczne charakterystyczne dla plazmy o danym składzie chemicznym. Dalsze badania nad tym parametrem ułatwią w znacznym stopniu prace nad dopracowaniem metody precyzyjnego kształtowania widma promieniowania lampy wyładowczej.

## LITERATURA

1. Ten Sen Jen, M.F.Hoyanx, L.S. Frost - J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer 9
2. W. Lochte – Hotgreven „Plasma diagnostic”
3. J.A.J.M. van Vliet, J.J. de Groot „The influence of wall temperature on luminous efficacy of high pressure sodium lamps”
4. G. Traving „Plasma diagnostics”
5. Sprawozdanie COBR Polam nr 772/ i nr 729

Rękopis dostarczono, dnia 05.03.2007 r.

Opiniował: **prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński**

METHODS OF RESEARCH OF RADIAL  
TEMPERATURE DISTRIBUTION  
INSIDE BURNER OF DISCHARGE LAMP

Lucyna HEMKA

**ABSTRACT** *Methods of estimation of physical parameters of discharge lamps based on testing of radial temperature distribution in the arc housing are shown and discussed. The possibility of intentional changing of spectral characteristic lamps by modifying of its working parameters is considered.*