

Przemysław SKRZYPCZAK
Jacek HAUSER
Marcin WESOŁOWSKI

ADAPTACJA PROGRAMÓW WSPOMAGAJĄCYCH PROJEKTOWANIE OŚWIETLENIA DO SYMULACJI RADIACYJNEGO PRZEKAZYWANIA CIEPŁA

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono propozycję wykorzystania programu Dialux, służącego obliczeniom oświetleniowym, do symulacji radiacyjnego przekazywania ciepła przez promienniki podczerwieni. Przeprowadzono porównanie wyników symulacji dla prostego układu wymiany radiacyjnej otrzymanych z obliczeń teoretycznych oraz z symulacji. Ponadto przedstawiono praktyczne wykorzystanie obliczeń symulacyjnych dokonywanych przy użyciu tego programu w celu wyznaczenia rozkładu natężenia napromienienia dla bardziej skomplikowanych radiacyjnych układów grzejnych.*

Słowa kluczowe: *radiacja, promiennik podczerwieni, Dialux, natężenie napromienienia*

DOI: 10.5604/00326216.1210783

1. WSTĘP

1.1. Promieniowania optyczne i ich wymiany

Promieniowanie optyczne, obejmujące promieniowania: podczerwone, widzialne i nadfioletowe, jest częścią widma fal elektromagnetycznych obejmującą zakresy ich częstotliwości f lub energii fotonu E_f równe:

$$3 \cdot 10^{11} \text{ Hz} \leq f \leq 3 \cdot 10^{16} \text{ Hz} \quad 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \leq E_f \leq 1,24 \cdot 10^2 \text{ eV} \quad (1)$$

dr inż. Przemysław SKRZYPCZAK, dr hab. inż. Jacek HAUSER
e-mail: [przemyslaw.s.skrzypczak; jacek.hauser]@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska, 61-965 Poznań, ul. Piotrowo 3a

dr inż. Marcin WESOŁOWSKI
e-mail: mawesolo@ien.pw.edu.pl

Instytut Energetyki Politechniki Warszawskiej, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, ISSN-0032-6216, LXIII, zeszyt 273, 2016

Opisy wymiany promieniowania optycznego w układach rzeczywistych są niezwykle skomplikowane. Po przyjęciu, że wymiana strumieni promienistych w układzie odbywa się pomiędzy N szarymi (właściwości promienne niezależne od wartości f) i promieniującymi i odbijającymi w sposób „lambertowski” (cosinusoidalny) powierzchniami o skończonych wymiarach, znajdującymi się w ośrodku nie pochłaniającym promieniowania, opisy wymiany promieniowania optycznego ulegają znacznym uproszczeniom.

Radiacyjna wymiana ciepła odbywa się pomiędzy wszystkimi ciałami, których temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego. W przypadku rozpatrywania radiacyjnej wymiany ciepła – przy ww. uproszczeniach – w której wszystkie powierzchnie (czynno-bierne) układu zarówno emitują jak i odbijają promieniowanie temperaturowe, otrzymuje się zestawy równań obrazujących bilanse strumieni radiacji dla wszystkich N powierzchni układu. Skomplikowanie obliczeń analitycznych tej wymiany wynika z konieczności określania (geometrycznych) współczynników konfiguracji φ pomiędzy ciałami. Zależne są one od kształtów, wymiarów, wzajemnego usytuowania i odległości pomiędzy powierzchniami biorącymi udział w wymianie. Z uwagi na to – i zwykle przy dużej liczbie elementów biorących udział w wymianie energii promienistej – obliczenia stają się bardzo skomplikowane [1, 2, 4, 6]. Skutkiem tego tylko niewielka grupa oprogramowania przeznaczonego do modelowania pól fizycznych umożliwia uwzględnienie radiacyjnej wymiany ciepła między elementami modelu obliczeniowego [5].

Natomiast przy rozpatrywaniu – dla ww. uproszczeń, z wyjątkiem konieczności założenia „lambertowskiego” rozsyłu promieniowania źródeł pierwotnych – wymian strumieni promienistych w układach składających się ze źródeł pierwotnych (promieniujących) i z powierzchni promieniście biernych (odbijających i pochłaniających promieniowanie), bilans strumieni radiacji P_i na każdej z $i = 1, \dots, N$ powierzchni układu obrazuje wzór:

$$P_i = P_{ib} + P_{ip} = P_{ib} + \sum_{k=1}^N (1 - \delta_{ki}) \rho_k \phi_{ki} P_k \quad (2)$$

gdzie:

- P_i – całkowity strumień padający na powierzchnię S_i ,
- P_{ib} – strumień padający bezpośrednio ze źródeł na powierzchnię S_i ,
- P_{ip} – strumień padający pośrednio (po wielokrotnych odbiciach strumieni źródeł od pozostałych powierzchni) na powierzchnię S_i ,
- P_k – całkowity strumień padający na powierzchnię S_k ,
- ρ_k – uśredniony całkowity współczynnik odbicia powierzchni S_k ,
- ϕ_{ki} – całkowity współczynnik konfiguracji powierzchni S_k na powierzchnię S_i ,
- δ_{ki} – symbol Kroneckera równy 1, gdy $k = i$, lub równy 0, gdy $k \neq i$.

Równania typu (2) wykorzystuje się m.in. w technice świetlnej do obliczania wymian strumieni świetlnych.

1.2. Wymiana ciepła, promiennik podczerwieni

Wymiana ciepła pomiędzy ciałami znajdującymi się w przestrzeniach gazowych odbywa się głównie na drodze unoszenia (konwekcyjnego przejmowania ciepła) i pro-

mieniowania (radiacyjnej wymiany ciepła) [1, 2]. Wraz ze wzrostem temperatury ciał wymienających ciepło procentowy udział wymiany ciepła na drodze radiacyjnej ulega zwiększeniu. W pewnej grupie ww. układów nagrzewania pośredniego ma się do czynienia z występowaniem ciała (lub ciał) o temperaturze powierzchni (S_1) dużo wyższej niż temperatury otoczenia T_o , tzn. temperatury powietrza i powierzchni obiektu (obiektów) do którego (do których) dociera promieniowanie.

Za promiennik podczerwieni można uznać ciało, dla którego gęstość powierzchniowa q_r mocy promienistej P_r jest większa (lub dużo większa) od gęstości powierzchniowej q_k mocy konwekcyjnego przejmowania ciepła P_k , tzn. [6]:

$$q_r = \frac{P_r}{S_1} = \varepsilon_T \sigma (T_1^4 - T_o^4) \gg q_k = \frac{P_k}{S_1} = \alpha_k (T_1 - T_o) \quad (3)$$

gdzie:

- ε_T – emisyjność całkowita,
- σ – stała Stefana,
- T_o – temperatura otoczenia,
- T_1 – temperatura powierzchni S_1 promiennika,
- α_k – współczynnik konwekcyjnego przejmowania ciepła.

W przypadkach, gdy temperatura T_1 powierzchni S_1 promiennika podczerwieni – o zwykle dużej wartości emisyjności widmowej ε_{λ} w zakresie promieniowania podczerwonego – jest dużo większa od temperatury T_o otoczenia, ciepło z promiennika do powierzchni nagrzewanej jest transportowane prawie wyłącznie na drodze radiacji [1, 2].

Wśród układów nagrzewania promiennikowego istnieje cała grupa układów, w których powierzchnia promieniująca i ukierunkowująca promieniowanie promiennika podczerwieni jest znacznie mniejsza niż powierzchnia nagrzewana, lub gdy powierzchnie te (niezależnie od ich wielkości) znajdują się w dużej odległości od siebie. Wówczas dopuszczalne jest potraktowanie elementu promieniującego tylko jako element czynny, natomiast nagrzewanej powierzchni – tylko jako element bierny nie mający wpływu na moc promienistą wysyłaną przez element promieniujący.

Założenie takie, powszechnie stosowane w przypadku rozpatrywania wymiany promieniowania widzialnego w obliczeniach oświetleniowych (zob. (2)), w znaczny sposób upraszcza model matematyczny promienistej wymiany ciepła. Z uwagi na fakt, iż promieniowanie podczerwone tak samo jak światło jest wydzieloną częścią promieniowania optycznego, podlega zatem tym samym prawom optyki geometrycznej. Zasadnym więc wydaje się wykorzystanie istniejących programów, służących obliczeniom oświetleniowym, do przeprowadzania obliczeń radiacyjnej wymiany ciepła w ww. układach nagrzewania promiennikowego. Jednym z popularniejszych programów do obliczeń oświetleniowych jest program Dialux.

2. CECHY PROGRAMU DIALUX

Program Dialux firmy Dial GmbH należy do grupy programów obliczeniowych służących do wyznaczania parametrów oświetleniowych [3]. Cechuje się on prostym

interfejsem graficznym, umożliwia wprowadzanie wielu powierzchni obliczeniowych oraz wielu źródeł światła. Źródło światła cechuje się określonymi wymiarami geometrycznymi oraz daną bryłą światłości. Na uwagę zasługuje fakt nieskomplikowanego tworzenia plików definiujących źródło promieniowania.

Analogie pomiędzy wielkościami świetlnymi oraz promienistymi przedstawione są w tabeli 1.

TABELA 1

Wielkości świetlne i promieniste oraz ich jednostki

Wielkość świetlna	Symbol	Jednostka	Wielkość promienista	Symbol	Jednostka
Strumień świetlny	ϕ	[lm]	Strumień promienisty	P	[W]
Światłość	I_ϕ	[cd = lm/sr]	Natężenie promieniowania	I	[W/sr]
Natężenie oświetlenia	E_ϕ	[lx = lm/m ²]	Natężenie napromienienia	E	[W/m ²]

W celu modelowania promieniowania źródła światła i radiacyjnego źródła ciepła konieczne jest utworzenie odpowiednio plików fotometrycznych *.ldt lub analogicznych plików radiometrycznych. W pliku radiacyjnego źródła ciepła określono powierzchnie części czynnej promiennika, strumień promienisty P oraz rozkład natężenia promieniowania I_γ .

Poprawność obliczeń natężenia napromienienia E przy wykorzystaniu programu Dialux sprawdzono porównując te obliczenia – dla „lambertowskiego” rozsyłu promieniowania – z obliczeniami analitycznymi przeprowadzonymi dla prostych układów geometrycznych (zob. p. 3).

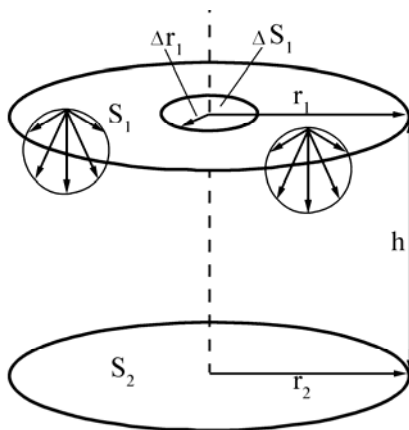
Stwierdzenie identyczności ww. wyników natężenia napromienienia z wynikami uzyskanymi przy wykorzystaniu programu Dialux, pozwala być pewnym poprawności wartości natężeń napromienienia uzyskanych – z zastosowaniem tego programu – dla innych układów geometrycznych i przy rzeczywistych rozsyłach promieniowania ciał (źródeł pierwotnych), różniących się mniej lub bardziej od rozsyłu „lambertowskiego” (zob. p. 4).

3. WERYFKACJA PROGRAMU DIALUX

Do celów symulacyjnych utworzono modele promienników kołowych o promieniach r_1 równych 50 mm oraz 5 m, których rozsył intensywności promieniowania ma charakter „lambertowski”. Przy założeniu, że strumień promienisty P wynosi np. 1500W, natężenie promieniowania w kierunku normalnym do powierzchni ($I_{\gamma=0}$), zgodnie z równaniem [1, 2]:

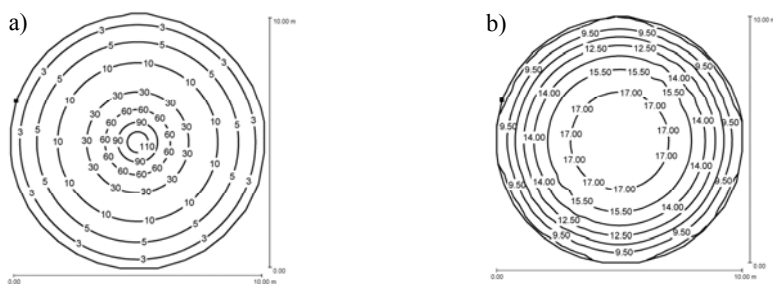
$$P = \pi I_{\gamma=0} \quad (4)$$

będzie równa $I_{\gamma=0} = 1500/\pi = 477,5$ W/sr. Powierzchnia S_2 obiektu nagrzewanego w sposób radiacyjny ma promień r_2 równy 5 m i umieszczona jest współosiowo i równoległe do promienników o powierzchniach ΔS_1 i S_1 w odległości h równej 2 m (rys. 1).



Rys. 1. Geometria układu obliczeniowego służącego weryfikacji

Rozkłady natężenia napromienienia na powierzchni S_2 , wyliczone przy pomocy programu Dialux dla układu z rysunku 1 i dla strumieni promienistych $P_1 = 1500$ W, wysyłanych z powierzchni promieniujących ΔS_1 i S_1 o promieniach Δr_1 i r_1 równych odpowiednio 50 mm i 5 m, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład natężenia napromienienia E_2 (w W/m^2) na powierzchni S_2 w przypadku gdy promień elementu promieniującego wynosi: a) $\Delta r_1 = 50$ mm, b) $r_1 = 5$ m

Średnie wartości: natężeń napromienienia $E_{2(\Delta S_1)}$ i $E_{2(S_1)}$, oraz strumieni promienistych $P_{2(\Delta S_1)} = P_{\Delta S_1-S_2} = E_{2(\Delta S_1)}S_2$ i $P_{2(S_1)} = P_{S_1-S_2} = E_{2(S_1)}S_2$ są równe odpowiednio: $16,84$ W/m^2 i $11,5$ W/m^2 , oraz 1322 W i 1048 W, a stosunki strumieni promienistych $P_{2(\Delta S_1)}/P_1$ i $P_{2(S_1)}/P_1$ wynoszą:

$$\frac{P_{2(\Delta S_1)}}{P_1} = \frac{P_{\Delta S_1-S_2}}{P_1} = 0,882 \quad i \quad \frac{P_{2(S_1)}}{P_1} = \frac{P_{S_1-S_2}}{P_1} = 0,699 \quad (5)$$

Analizując uzyskane wartości rozkładów natężenia napromienienia z rysunku 2 (2a i 2b) można stwierdzić, że wraz ze zwiększaniem się stosunku r_1/h ($\Delta r_1/h$) następuje wyraźne zwiększenie równomierności natężenia napromienienia E_{min}/E_{sr} na powierzchni S_2 (zob. tab. 2).

Przytaczane w literaturze wzory i wykresy opisujące średnie geometryczne współczynniki konfiguracji ϕ_{1-2} ($\phi_{S_1-S_2}$, $\phi_{\Delta S_1-S_2}$), mówią jaka część strumienia promienistego P_1 , wysłanego z powierzchni 1 (S_1 , ΔS_1), dociera do powierzchni 2 (S_2). Dla układów geometrycznych przedstawionych na rysunku 1 wzór służący do wyznaczania średniego geometrycznego współczynnika konfiguracji wyniesie [1, 2, 4, 6]:

$$\phi_{1-2} = \frac{P_{1-2}}{P_1} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} dS_1 \int_{S_2} d\phi_{d_1, d_2} = \dots = \frac{1}{2R_1^2} \left[1 + R_1^2 + R_2^2 - \sqrt{(1 + R_1^2 + R_2^2)^2 - 4R_1^2 R_2^2} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$$R_1 = \frac{r_1}{h}; \quad R_2 = \frac{r_2}{h} \quad (7)$$

Wartości tych współczynników, wyliczone ze wzorów (6) i (7) dla dwóch wyżej rozpatrywanych układów geometrycznych z rysunku 1, wynoszą odpowiednio:

$$\phi_{\Delta S_1-S_2} = \frac{P_{\Delta S_1-S_2}}{P_1} = 0,863 \quad i \quad \phi_{S_1-S_2} = \frac{P_{S_1-S_2}}{P_1} = 0,672 \quad (8)$$

TABELA 2

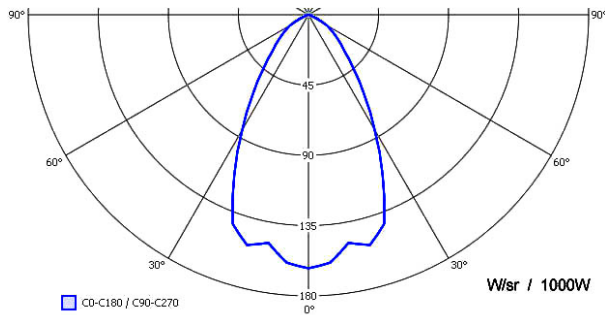
Zestawienie wyników symulacji i obliczeń analitycznych

Wariant (rys. 2)	Symulacja (Dialux)				Obliczenia
	E_{sr} [W/m ²]	E_{max} [W/m ²]	E_{min}/E_s r	ϕ_{1-2} (wzór (5))	ϕ_{1-2} (wzór (8))
a)	16,84	119,5	0,132	0,882	0,863
b)	13,35	18,0	0,532	0,699	0,672

W tablicy 2 przedstawiono wyniki obliczeń uzyskane na drodze symulacji (Dialux) oraz wzorów analitycznych. Porównanie wartości średnich współczynników konfiguracji ϕ_{1-2} , wyliczonych ze wzorów analitycznych (zob. (8)), z wartościami tych współczynników wyliczonych z wykorzystaniem programu Dialux (zob. (5)), wykazuje dużą zgodność uzyskanych wyników (wariant a) – błąd równy 2,2%, wariant b) – błąd równy 4,0%). Świadczy to o możliwości zastosowania programu Dialux do prawidłowych obliczeń wartości natężenia napromienienia w podobnych układach promienistych, o innych różnych i różnie rozmieszczonych powierzchniach i o znanym i niekoniecznie lambertowskim rozkładzie promieniowania źródła (powierzchni 1 (S_1 , ΔS_1)).

4. UKŁAD NAGRZEWANIA PROMIENNIKOWEGO

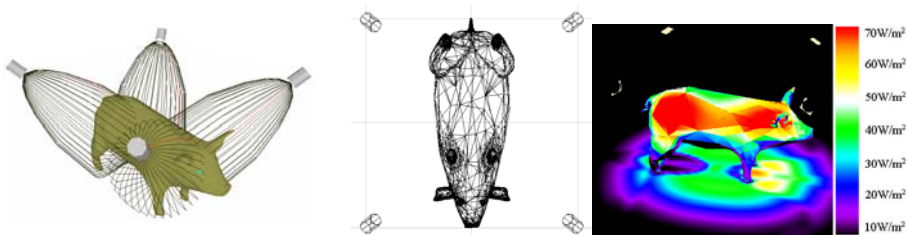
Do celów symulacyjnych posłużono się promiennikiem o powierzchni promieniującej równej ok. $0,012 \text{ m}^2$ i o rzeczywistym rozsyłu intensywności promieniowania. Pomiarów parametrów promienistych promiennika lampowego rubinowego 150 W z wewnętrznym odbłyśnikiem dokonano na radiometrze ramiennym wyposażonym w miernik promieniowania podczerwonego. Na podstawie uzyskanych danych utworzono obrotowo-symetryczną bryłę natężenia promieniowania przedstawioną na rysunku 3. Założono, że strumień promienisty promiennika wynosi 105 W.



Rys. 3. Krzywa rozsyłu intensywności promieniowania w układzie biegunowym dla badanego promiennika lampowego rubinowego

Przedstawiony na rysunku 3 rozsył promieniowania rzeczywistego promiennika lampowego wykorzystano do obliczeń natężenia napromienienia w przypadku praktycznego zastosowania. Promienniki tego typu są często stosowane do ogrzewania zwierząt w gospodarstwach rolnych.

Poniżej przedstawiono przykład obliczeń wykonanych przy użyciu programu Dialux. Cztery promienniki zostały umieszczone na wysokości 1,5 m ponad podłożem w odległości 1 m od osi symetrii zwierzęcia pod kątem 35° . Na rysunku 4 przedstawiono usytuowanie promienników względem nagrzewanego zwierzęcia oraz uzyskiwane wartości natężenia napromienienia (w W/m^2).



Rys. 4. Obiekt nagrzewany, usytuowanie promienników oraz wyniki symulacji

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki natężenia napromienienia uzyskane przy wykorzystaniu programu Dialux. Obliczeń dokonano dla dwóch przypadków nieskomplikowanych układów geometrycznych, dla których znane są zależności analityczne do wyznaczania wartości średniego współczynnika konfiguracji. Dokonano porównania uzyskanych wyników oraz potwierdzono ich zgodność. Program Dialux dla części układów w których spełnione są pewne warunki i założenia upraszczające opisane w rozdziale 1 może być stosowany, a uzyskiwane parametry radiometryczne nie odbiegają od uzyskiwanych w sposób analityczny. Program umożliwia przyjęcie dla powierzchni promieniującej „nielambertowskiej” bryły natężenia promieniowania. Rozszerza to możliwości zastosowania obliczeń do obszarów, w których obliczenia analityczne są czasochłonne i skomplikowane. Potwierdzeniem są przedstawione w punkcie 4 obliczenia dla układu nagrzewania przedstawiciela trzody chlewnej.

LITERATURA

1. Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006.
2. Hering M.: Termokinetika dla elektryków. WNT, Warszawa, 1980.
3. <http://www.dial.de/DIAL/en/dialux-international-download.html>.
4. Klučnikov A.D., Ivancov G.F.: Teploperedatca izluceniem w ognetechničeskich ustanovkach. Energija, Moskva, 1970.
5. Przyłucki R.: Wykorzystanie komputerowych technik optymalizacyjnych w projektowaniu wzbudników wielowarstwowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2014.
6. Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła. WNT, Warszawa, 1982.

Przyjęto do druku dnia 12.05.2016 r.

ADAPTATION OF LIGHTING DESIGN SUPPORT PROGRAM FOR SIMULATION OF RADIATION TRANSMISSION OF HEAT

Przemysław SKRZYPCZAK,
Jacek HAUSER, Marcin WESOŁOWSKI

ABSTRACT *The article presents the proposal to use the program Dialux, for lighting calculations to simulate the radiative heat transfer by infrared heaters. The comparison of simulation results for simple radiation system obtained from the theoretical calculations and simulations is presented. In addition, the practical use of the simulation made using the above program in order to determine the distribution of the irradiance for more complex radiative heating system is shown.*

Keywords: *radiation, infrared, Dialux, irradiance*