



METODY OKREŚLANIA PARAMETRÓW OŚWIETLENIA DZIENNEGO DLA POTRZEB OPTYMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ BUDYNKÓW MIESZKALNYCH – KOMFORT WIZUALNY

Dariusz HEIM^{*}, Hanna JĘDRZEJUK^{**}, Eliza SZCZEPAŃSKA^{*}

^{*} Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl, eliza.szczepanska@p.lodz.pl
^{**} Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN,
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, e-mail: Hanna.Jedrzejuk@ippt.gov.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono metody wyznaczania podstawowych parametrów oświetlenia wewnętrznego. Omówiono wielkości uzyskiwane na podstawie pomiarów *in-situ* w budynkach istniejących, obliczeń symulacyjnych lub obliczeń pośrednich metodami analitycznymi. W pracy rozważano jedynie źródła światła dziennego. Szczegółowo opisano sposoby wyznaczania natężenia oświetlenia, luminancji oraz wskaźnika oślnienia. Wyznaczane parametry służą do oceny komfortu wizualnego, a zatem niezbędne jest ich uwzględnienie w wielokryterialnej optymalizacji budynków mieszkalnych jako jedne z wielu kryteriów decydujących o komforcie wewnętrznym. Praca naukowa została częściowo sfinansowana z środków na naukę w latach 2008-11 w ramach Projektu Badawczego Nr 3989/B/T02/2008/35.

Słowa kluczowe: optymalizacja, oświetlenie, komfort wizualny, pomiary *in-situ*, symulacje.

1. WPROWADZENIE

Każdy budynek mieszkalny musi spełniać szereg wymagań wynikających z jego przeznaczenia jak i sposobu eksploatacji. Dotyczą one przede wszystkim bezpieczeństwa oraz komfortu wewnętrznego. Ponadto, z oczywistych powodów, powinny być uwzględniane takie aspekty jak efektywność ekonomiczna czy troska o środowisko. Zastosowanie w procesie projektowania optymalizacji wielokryterialnej, wspomagającej proces podejmowania decyzji, pozwala na dokonanie racjonalnego wyboru jednego rozwiązania z szeregu możliwych [1].

Oświetlenie wewnętrzne, ze szczególnym uwzględnieniem światła dziennego, jest czynnikiem wpływającym zarówno na jakość środowiska wewnętrznego, jak i nakłady ener-

tyczne ponoszone podczas eksploatacji budynków. Choć nadal zbyt mało miejsca poświęca się projektowaniu nowoczesnych systemów oświetlenia, stale rośnie zainteresowanie kreowaniem przyjaznego środowiska pracy i wypoczynku. Jedynie właściwe wykorzystanie światła dziennego jest w stanie zapewnić odpowiedni komfort wizualny i znacznie ograniczyć koszty utrzymania obiektu.

2. KOMFORT WIZUALNY

Warunki oświetleniowe wywierają wpływ na szybkość, dokładność i wysiłek związany z wykonaniem danej czynności, a także na zdrowie, samopoczucie i funkcjonowanie człowieka. Dlatego też, tak istotne jest stworzenie właściwego komfortu wizualnego wewnątrz pomieszczenia poprzez zapewnienie odpowiednich cech jakościowych i ilościowych oświetlenia. Całościowa ocena komfortu zależy od wielu parametrów osobowych oraz psychofizycznych i jest wielkością niezwykle subiektywną. W ramach rozważań zamieszczonych w niniejszej pracy autorzy zwrócili uwagę jedynie na jego pewne, stosunkowo łatwo mierzalne lub wyznaczalne parametry.

Najzdrowszym dla człowieka rodzajem światła jest światło dzienne. Jego barwa uznawana jest przez oko ludzkie jako „przyjemna”, bowiem jej widmo ma charakter ciągły. Elektryczne źródła światła nie posiadają tych naturalnych i korzystnych dla człowieka i jego środowiska cech. Ze względu na ograniczone powierzchnie świecące oraz wysoką luminancję powodują często uciążliwe oślnienie. Widma sztucznych źródeł światła mają zazwyczaj charakter nieciąg-

gły. Jednak najistotniejszą wadą są koszty utrzymania systemów oświetleniowych, w tym koszty dostarczonej energii elektrycznej, ale także i chłodu niezbędnego do wyeliminowania dodatkowych zysków ciepła. Podejmując się zadania optymalizacji oświetlenia należy przede wszystkim prawidłowo oszacować dostępność i jakość światła dziennego. Uwzględnienie potrzeb związanych z tworzeniem odpowiedniego otoczenia świetlnego, wygody widzenia, wydolności wzrokowej jak i bezpieczeństwa, wiąże się przede wszystkim z określeniem wymagań dotyczących następujących wielkości [2]:

- natężenie i równomierność oświetlenia,
- rozkład luminancji,
- oślnienie,
- kierunkowość światła,
- oddawanie barw i barwy postrzeganej.

Należy zaznaczyć, że oślnienie jest wielkością pośrednio wynikającą z rozkładu natężenia oświetlenia oraz luminancji. Metody wyznaczania oślnienia polegają na odpowiedniej interpretacji ww. parametrów. Kierunkowość światła dziennego polegająca na ocenie udziału promieniowania rozproszonego i ukierunkowanego jest natomiast silnie zależna od warunków pogodowych, głównie stopnia zachmurzenia lub zamglenia. Ponadto, w przypadku budynków mieszkalnych jest to wielkość trudna do zoptymalizowania ze względu na dodatkowe funkcje okien, mających zapewniać kontakt wzrokowy ze środowiskiem zewnętrznym. Natomiast barwa światła i jej wpływu na zachowanie człowieka stanowią oddzielne zagadnienie silnie zależne od indywidualnych preferencji użytkownika. Jedynymi wymaganiami sformułowanymi w sposób ilościowy jest wartość temperatury barwowej źródła światła. Ze względu na specyfikę światła dziennego nie jest to wielkość, która mogłaby być w jakikolwiek sposób kontrolowana i regulowana. Prezentowane przykłady uwzględniają jedynie światło dzienne o zdefiniowanym źródle oraz założonej temperaturze barwowej, zależnej jedynie od pory dnia i pory roku. Dlatego w dalszej części omówiono metody wyznaczania jedynie trzech pierwszych parametrów: natężenia, luminancji oraz oślnienia.

3. NATĘŻENIE OŚWIETLENIA

Zapewnienie odpowiedniego poziomu natężenia, a także jego rozkładu wpływa na szybkość i obciążenie podczas wykonywania zadania wzrokowego. Niedostateczne oświetlenie powoduje uczucie znużenia, senności pogarszając znacznie samopoczucie obserwatora a dodatkowo może być przyczyną wypadków. Wymagane średnie wartości natężenia oświetlenia w polu pracy, jak i na polu bezpośredniego otoczenia pola pracy określone są w odpowiednich przepisach normowych, BHP, itp. Drugim istotnym parametrem jest równomierność natężenia oświetlenia. Dla czynności ciągłych przyjmuje się, że równomierność oświetlenia na płaszczyźnie roboczej a także w bezpośrednim otoczeniu

świetlnym. Brak równomierności oświetlenia powoduje zmęczenie, co wynika z konieczności adaptacji do zmiennego rozkładu natężenia oświetlenia. Natężenie oświetlenia E_v [lx] w danym punkcie powierzchni wyrażane jest jako stosunek strumienia świetlnego $d\Phi_v$ [lm] padającego na elementarną powierzchnię zawierającą dany punkt do wartości tej powierzchni dA [m²].

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1)$$

Pomiary natężenia oświetlenia są najprostszym i najczęściej wykonywanym badaniem kontrolnym. Ekspertyzy dotyczą głównie miejsc pracy, dla których sformułowano odpowiednie przepisy. Podstawowym urządzeniem pomiarowym jest luksomierz, służącym do pomiarów punktowych na dowolnie nachylone i zorientowane płaszczyzny. Te same wielkości można wyznaczyć metodami obliczeniowymi zakładając odpowiednie źródło światła – rodzaj niebosłonu i jego luminancję.

Podstawowe wielkości mierzone lub wyznaczane metodami obliczeniowymi to:

- poziome i pionowe natężenie oświetlenia;
- natężenie oświetlenia dla geometrii cylindrycznej;
- natężenie oświetlenia dla geometrii półsferycznej.

Natężenie oświetlenia dla geometrii cylindrycznej wyznaczane jest jako średnie pionowe natężenie oświetlenia w punkcie, obliczone z wartości natężeń otrzymanych dla różnych położenia płaszczyzny pionowej w trakcie jej pełnego obrotu wokół pionowej osi przechodzącej przez dany punkt. Pół-cylindryczne natężenie oświetlenia jako średnia z wyników otrzymanych dla płaszczyzny pionowej w trakcie jej obrotu o 180°. Natężenie oświetlenia dla geometrii półsferycznej uzyskuje się w wyniku pełnego obrotu płaszczyzny nachylonej pod różnymi kątami (od 0 do 90°).

4. LUMINANCJA

Oko ludzkie ma zdolność adaptacji, tzn. dostosowywania się do widzenia przy luminancji zmieniającej się w bardzo szerokich granicach, jednak do jej zbyt wysokich wartości oko nie jest w stanie się zaadaptować. Pojawia się wtedy uczucie przykrości, a nawet bólu. Dodatkowo przy szybkich zmianach wartości luminancji następuje zmęczenie narządu wzroku. Z tego powodu istotne jest zapewnienie zrównoważonego rozkładu luminancji, czyli unikania zbyt dużych jak i zbyt małych wartości luminancji i jej kontrastów. Zbyt duża luminancja lub zbyt gwałtowna jej zmiana powoduje zjawisko oślnienia. Natomiast praca przy zbyt małych wartościach luminancji powoduje zmęczenie i osłabienie wzroku.

Od wartości luminancji i jej rozkładu zależy poziom adaptacji narządu wzroku, a tym samym jakość oraz wygoda

widzenia. Uważa się, że warunki widzenia są najlepsze, gdy całe obwodowe pole widzenia ma równomierną luminancję (niezbyt małą w porównaniu z luminancją występującą w środkowym polu widzenia) i gdy rozkład luminancji w środkowym polu widzenia jest równomierny. Istotne znaczenie ma luminancja wszystkich powierzchni w pomieszczeniu i jest ona określona przez wartości współczynnika odbicia oraz wartości natężenia oświetlenia tej powierzchni. Zalecane wartości współczynników odbicia znaleźć można w wielu normach i dokumentach. Luminancja świetlna L_v [cd/m^2] w określonym kierunku (zdeteminowanym przez kąt przestrzenny $d\Omega$ [sr]) oraz określonym punkcie rzeczywistej lub pozornej powierzchni dA [m^2] wywołana strumieniem świetlnym $d\Phi_v$ [lm] przenoszonym przez elementarną wiązkę promieniowania jest zdefiniowana jako:

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega} \quad (2)$$

Do pomiaru luminancji stosowane są specjalistyczne mierniki. Mierniki różnią się od siebie wielkością bryłowego kąta pomiaru oraz zakresem pomiarowym.

W pomieszczeniu oświetlonym jedynie światłem naturalnym największą luminancją charakteryzują się zewnętrzne powierzchnie transparentne oraz przegrody wewnętrzne o wysokim współczynniku odbicia światła. Luminancję poszczególnych powierzchni w pomieszczeniu będącymi pozornymi źródłami światła determinują natężenie oświetlenia na poszczególnych płaszczyznach. Obie wielkości fizyczne są ze sobą powiązane następującą zależnością:

$$E_v = \int_{2\pi \text{sr}} L_v \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \quad (3)$$

Jest to jednocześnie równoważna definicja natężenia oświetlenia jako całki liczonej dla półsfery widzianej z danego punktu gdzie L_v [cd/m^2] jest luminancją padającą z różnych kierunków na dany punkt elementarny, wiązek promieniowania rozchodzących się w kątach przestrzennych $d\Omega$ [sr], zaś θ jest kątem między kierunkiem danej wiązki promieniowania a anormalną do powierzchni w danym punkcie.

5. OLŚNIENIE

Olśnieniem nazywa się pewien przebieg (stan) procesu widzenia, przy którym występuje odczucie niewygodności lub zmniejszenie zdolności rozpoznawania przedmiotów (lub jedno i drugie), w wyniku niewłaściwego rozkładu luminancji lub niewłaściwego zakresu luminancji albo nadmiernych kontrastów w przestrzeni lub w czasie.

Z punktu widzenia występujących skutków rozróżniamy trzy rodzaje, olśnienie: przeszkadzające, przykre i oślepi-

ające. Ze względu na warunki powstania rozróżniamy następujące rodzaje olśnienia: bezpośrednie i odbiciowe. Największą luminancją we wnętrzach charakteryzują się same źródła światła (olśnienie bezpośrednie). W przypadku światła dziennego źródłem tym są okna i inne elementy transparentne przegród zewnętrznych. Przy ocenie jakości oświetlenia wewnątrz rozróżnia się wskaźniki służące ocenie olśnienia od źródeł sztucznych oraz od światła naturalnego. W drugim przypadku istnieje wiele metod oceny olśnienia, jednak najpopularniejszą jest wskaźnik *DGI* (*ang. Daylight Glare Index*). Zależność na wskaźnik *DGI* została opracowana na podstawie tzw. formuły Cornell'a [7], zmodyfikowanej przez Chauvel'a [8]. Dla n źródeł olśnienia wskaźnik *DGI* wyrażony jest następująco:

$$DGI = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i \quad (4)$$

gdzie:

$$G_i = 0,478 \cdot \left(\frac{L_{vs}^{1,6} \cdot \Omega_i^{0,8}}{L_{vb} + (0,07 \omega^{0,5} \cdot L_{vw})} \right) \quad (5)$$

gdzie:

L_{vs} jest luminancją poszczególnych składowych źródła olśnienia [cd/m^2],

L_{vb} jest średnią luminancją tła bez uwzględnienia luminancji źródła olśnienia [cd/m^2],

L_{vw} jest średnią ważoną luminancją okna, gdzie współczynnikiem wagowym jest względne pole powierzchni nieboskłonu, elementów przesłaniających oraz gruntu,

ω jest kątem bryłowym utworzonym pomiędzy oknem a punktem obserwacji [sr],

Ω jest kątem bryłowym utworzonym pomiędzy poszczególnymi składowymi źródła olśnienia, a punktem obserwacji z uwzględnieniem kierunku patrzenia [sr], zmodyfikowanym poprzez tzw. indeks położenia P [9]:

$$\Omega = \int_{\omega_s} \frac{d\omega_s}{P^2} \quad (6)$$

Oprócz wskaźnika *DGI*, który jest najstarszą i najbardziej popularną formułą wyznaczania olśnienia na podstawie luminancji źródła światła oraz otoczenia, opracowano również inne metody, wśród których można wymienić:

- nowy wskaźnik *DGI* *NDGI* (*ang. New Daylight Glare Index*),

oraz metody:

- VCE (*ang. Visual Comfort Evaluation Method*),

- PGSV (*ang. Predicted Glare Sensation Method*),

- VEE (*ang. Vertical illuminance at the eye*).

6. OPTIMALIZACJA JAKOŚCI OŚWIETLENIA

Rozwiązaniem istotnym z punktu widzenia użytkowników będzie maksymalizacja komfortu wizualnego w wybranym pomieszczeniu (lub na wybranych powierzchniach wewnętrznych) przy minimalizacji kosztów inwestycyjnych oraz kosztów eksploatacyjnych. Jako parametry zadania przyjęto: lokalizację budynku wraz z badanym pomieszczeniem, wymiary pomieszczenia, sposób użytkowania. Zmiennymi decyzyjnymi są: liczba, położenie i wielkość powierzchni przeszklonych (zarówno przeziernych jak i przezroczystych), rodzaj przeszklenia (uwzględniając zmianę rodzaju jak i barwy światła), rodzaj oraz właściwości optyczne materiałów na wewnętrznych powierzchniach pomieszczenia, ponadto obecność urządzeń zaciemniających zarówno po stronie wewnętrznej jak i zewnętrznej. Zmienne decyzyjne są dyskretne. Podlegają ograniczeniom wynikającym z geometrii rozpatrywanego pomieszczenia.

Do oceny komfortu wizualnego w pomieszczeniach mogą zostać przyjęte:

- pożądane natężenie oświetlenia w wybranych obszarach:

$$f_1(\mathbf{X}) = \int_A (E_v - E_{v,0})^2 \cdot dA \quad (7)$$

- równomierność oświetlenia:

$$f_2(\mathbf{X}) = \int_A \left(E_v - \frac{\int_A E_v \cdot dA}{\int_A \cdot dA} \right)^2 dA \quad (8)$$

- wskaźnik DGI:

$$f_3(\mathbf{X}) = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i \quad (9)$$

gdzie:

\mathbf{X} – wektor zmiennych decyzyjnych,

A – wybrane płaszczyzny w pomieszczeniu reprezentatywne do oceny jakości komfortu wizualnego,

$E_{v,0}$ – wymagana wartość natężenia oświetlenia w wybranych obszarach.

W przypadku funkcji $f_1(\mathbf{X})$ poszukiwane będzie rozwiązanie zapewniające minimum odchylenia natężenia oświetlenia od zadanej wartości.

W przypadku funkcji $f_2(\mathbf{X})$ poszukiwane będzie rozwiązanie zapewniające minimum odchylenia natężenia oświetlenia od wartości średniej.

W przypadku funkcji $f_3(\mathbf{X})$ poszukiwane będzie rozwiązanie zapewniające minimum oślnienia.

Koszty inwestycyjne obejmują wszelkie dodatkowe nakłady związane z zapewnieniem określonego efektu końcowego.

Koszty eksploatacyjne związane są z zapewnieniem wymaganych warunków oświetleniowych za pomocą sztucznego oświetlenia.

7. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono możliwości oceny komfortu wizualnego w pomieszczeniach na podstawie pomiarów *in-situ* oraz symulacji. Przedstawiono metodę wyboru najlepszego rozwiązania za pomocą optymalizacji wielokryterialnej. Opisano trzy podstawowe parametry komfortu wizualnego przy założeniu oświetlenia wewnątrz światłem dziennym. Określono zmienne decyzyjne zadania optymalizacji oraz sposób poszukiwania rozwiązania optymalnego.

DETERMINATION OF DAYLIGHT PERFORMANCE FOR BUILDING OPTIMISATION – VISUAL COMFORT

Summary: The paper presents physical quantities of visual comfort prediction. Three parameters were selected for multicriterion optimization: illuminance, luminance and daylight glare index. Mathematical formulas and methodology of calculation was described. Finally, the optimization techniques was presented and discussed.

Literatura

- [1] Duda E., Heim D., Jędrzejuk H., Klemm K., Marks W., Walerian E.: Problem optymalizacji wielokryterialnej budynków mieszkalnych z zastosowaniem kryteriów ekonomicznych, komfortu wewnętrznego oraz ochrony środowiska, *Mat. Konf. XII Konferencji. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, Łódź-Słok, s. 45-48, 2009.
- [2] Heim D. (red.): Komputerowa analiza oświetlenia dziennego i ocena parametrów komfortu wizualnego w pomieszczeniach, Łódź 2007.
- [3] Sutherland I.E.: Sketchpad – a man-machine graphical communication system, Technical Raport 296, MIT Lincoln Laboratory, 1963.
- [4] Goral C.M., Torrance K.E., Greenberg D.P., Battaile B.: Modeling the interaction of light between diffuse surfaces, *Computer Graphics*, vol. 18(3), 213-222, 1984.
- [5] Whitted T.: An improvement illumination model for shaded display, *Comm. of the ACM*, 23(6), 343-349, 1980.
- [6] Dutre P., Bala K., Bekaert P., *Advanced Global Illumination*, A.K. Peters, Ltd., 2006.
- [7] Hopkinson, R.G.: *Architectural Physics: Lighting. Her Majesty's Stationery Office*, London, 1963.
- [8] Chauvel P., Collins J.B., Dogniaux R., Longmore J.: Glare from windows: current views of problem, *Lighting Research and Technology*, 14(1), 31-46, 1982.
- [9] Guth S.K.: A method of the evaluation of discomfort glare, *Illuminating Engineering*, 58, 1963.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2008-2011, jako projekt badawczy nr 3989/B/T02/2008/35 „Wielokryterialna optymalizacja budynków mieszkalnych z uwzględnieniem kryteriów: ekonomicznych, ochrony środowiska oraz komfortu w okresie całego roku”.