

Tubusové svetlovody –

modelovanie interiérových osvetleností pri štandardných svetelných podmienkach

Mgr. Miroslav Kocifaj, PhD., Ing. Stanislav Darula, CSc.,
Ústav stavebníctva a architektúry SAV, doc. RNDr. František
Kundracik, CSc., Fakulta matematiky, fyziky a informatiky,
Univerzita Komenského, Bratislava

Úvod

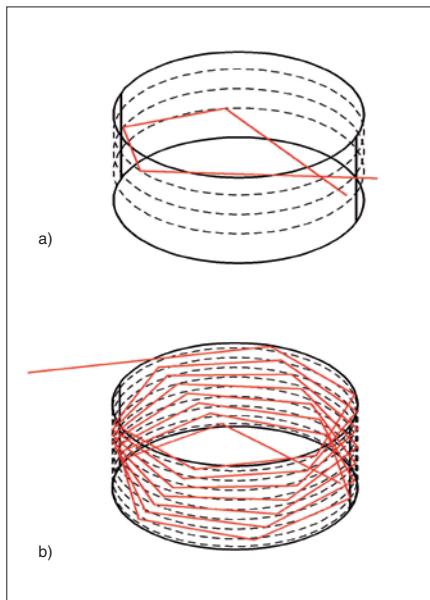
Všeobecná snaha o zníženie spotreby energií sa stáva významnou v posledných niekoľkých rokoch na celom svete. Do popredia sa dostávajú aktivity využívajúce obnoviteľné zdroje energií v čo najväčšej miere. Vo svetelnej technike sa presadzuje efektívnejšie využívanie denného svetla a slnečného žiarenia vo vnútorných priestoroch budov. Jedným z využívaných pasívnych optických prvkov, ktorými je možné viesť oblohové i slnečné svetlo do interiérov, sú tubusové svetlovody. Tieto dokážu preklenúť bariéru medzi vonkajšími a vnútornými priestormi, a tak zabezpečiť prirodzené osvetlenie aj v tých priestoroch, kde by inak museli byť použité len umelé zdroje svetla (napr. v podzemných garážach alebo hlbokých chodbách, na schodiskách a tam, kde nie je možné osadiť tradičné okná [1]). Preferovanie prirodzeného svetla pred umelým má niekoľko dôvodov:

1. využívanie denného svetla nepredstavuje žiadne ďalšie náklady,
2. difúzne svetlo oblohy je dostupné takmer počas celého dňa (aj počas zamračených dní),
3. priame slnečné lúče predstavujú extra zdroj, ktorého prítomnosť významne zvyšuje výkon celej optickej sústavy svetlovodu,
4. spektrálna skladba prirodzeného svetla poskytuje najlepšie podmienky pre zrakové práce a pre pobyt ľudí v budovách.

Modelovanie vedenia svetla tubusovými svetlovodmi

Klasické riešenie vedenia svetla na väčšie vzdialenosti predstavujú vertikálne svetlovody s kruhovým prierezom – teda svetlovody s dutými cylindrickými tubusmi s vysokou odrazivosťou vnútorných stien [2]. Činiteľ odrazu pokovovaných (napr. pohliníkových) povrchov môže dosahovať 95 až 97 % [3], [4], čo umožňuje minimalizovať úbytok svetla pri viacnásobných odrazoch na vnútorných stenách tubusu svetlovodu. V praxi sa najčastejšie využívajú tokové metódy pre hodnotenie účinnosti prenosu svetla a výpočet

osvetlenosti na porovnávacej rovine, [5], [6]. Akokoľvek sa zdá byť výpočet vedenia svetla cylindrickým svetlovodom jednoduchý, v praxi tomu tak nie je. Detailné riešenie akceptujúce šírenie každého samostatného zväzku lúčov s definovaným



Obr. 1. Dráhy lúčov odrazených od vnútorného valcového povrchu; počet odrazov slnečných lúčov je a) menší pri väčšej výške Slnka, b) väčší pri menšej výške Slnka

smerom pred interakciou a po interakcii s optickými komponentmi svetlovodu (kupola, tubus, difúzor) naráža na značné matematické problémy. Použitím tokových metód sa tieto komplikácie síce odbúrajú, ale výpočet stráca na presnosti a kvalite informačného obsahu – tokové metódy sú napr. nepresné pri výpočte rozloženia osvetlenia na porovnávacej ploche pod reálnym (nelambertovským) difúzorom. Taktiež nedokážu stanoviť rozloženie svetla na spodnom rozhraní tubusu svetlovodu. Použitie presných matematických metód by však bolo značne nepraktické, pokiaľ by nebolo pretransformované do funkčných numerických schém [7]. Numerická implementácia analytických vzorcov HOLIGILM 4.2 je síce zložitá, ale akonáhle existuje, stáva sa excelentným

nástrojom s vysokou pridanou hodnotou. V porovnaní s inými existujúcimi tzv. ray-tracing metódami je HOLIGILM rádovo rýchlejší (10 až 100 krát) a poskytuje vždy rovnaké výsledky v bodoch zvolenej siete, t. zn. je exaktne presný. Vzhľadom k analytickosti riešenia je totiž výpočet dokonale reprodukovateľný – t. j. opätovné spustenie programu vedie k identickému výsledku. Pri bežných ray-tracing metódach využívajúcich náhodne vysielané lúče tomu tak ani zďaleka nie je, pretože tieto metódy aplikujú štatistický prístup a presnosť dosahujú zvyšovaním počtu simulovaných lúčov (napr. RADIANCE; [8], [9]).

Čo sa deje v tubusovom svetlovode?

Svetelné lúče od oblohy alebo od Slnka po prechode kupolou vstupujú do tubusu svetlovodu. Tu sa odražia od vysoko reflexného povrchu do rôznych smerov v závislosti na uhloch dopadu. Pri malých výškach Slnka možno pozorovať väčší počet odrazov, a teda aj vyššie straty svetelnej energie. Opačný efekt sa dá pozorovať pri väčších výškach Slnka, napr. okolo obeda v lete, kedy je počet odrazov menší a prenos svetla je efektívnejší. Dráhy lúčov odrazených od vnútorného valcového povrchu sú zobrazené na obr. 1.

Program HOLIGILM 4.2

Implementácia modelu HOLIGILM je dostupná vo forme freewaru HOLIGILM 4.2 na adrese <http://www.holigilm.info>. Program umožňuje vypočítať osvetlenie miestností s obdĺžnikovým pôdorysom osvetľovaných viacerými svetlovodmi zapustenými v strope a ukončenými rôznymi typmi optických prvkov (napr. difúzormi). Vďaka prepracovanej matematickej optimalizácii je algoritmus HOLIGILM 4.2 extrémne rýchly. Základnú funkciu tohoto výpočtového programu možno zhrnúť do týchto troch bodov:

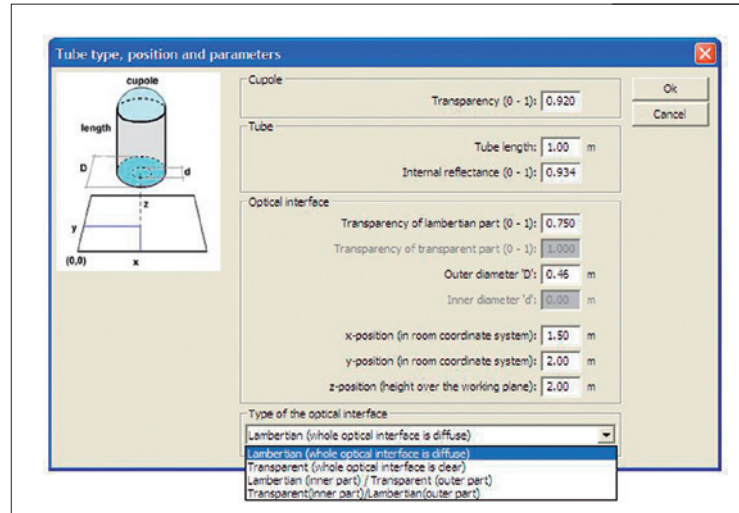
a) Poskytnutie interfejsu pre zadávanie vstupných údajov.

Užívateľ môže špecifikovať rozmery pravouhlej miestnosti a jej azimutálnu orientáciu vzhľadom k severu. V samo-

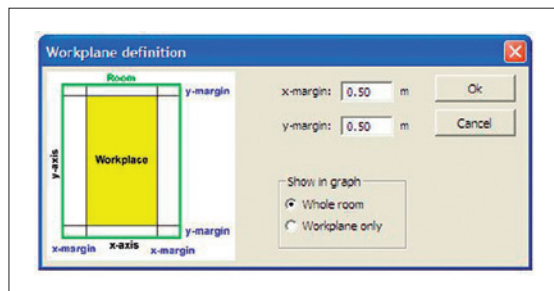
statnom okne môže byť zmenená výpočtová sieť (hustota bodov, v ktorých bude počítané osvetlenie). Poloha Slnka môže byť určená dvoma spôsobmi: 1. buď sa zadá priamo azimut a výška Slnka, alebo 2. sa zvolí deň, mesiac a hodina pre zadanie času a zemepisná šírka pre zadanie miesta, kde sa svetlo od vyhodnocuje. Po zadaní týchto údajov sa súradnice Slnka vypočítajú automaticky. V aktuálnej verzii freewaru HOLIGILM 4.2 je možné vybrať jeden z dvoch prípadov exteriérových svetelných podmienok: CIE rovnomernej zamračenú alebo CIE jasnú oblohu. Program je vyvinutý pre možnosť použitia všeobecných oblohových štandardov (ISO 15469: 2004/ CIE S011/E:2003 [10]). Uživatelské prostredie tiež umožňuje prednastaviť požadovanú kvalitu grafických výstupov v úrovni: low/medium/high. Nakoľko toto nastavenie priamo súvisí so sieťou bodov, nad ktorou sa realizuje modelový výpočet, bude mať táto voľba priamy vplyv na dobu výpočtu. Presnosť výpočtu v danom bode siete sa tým však ne-

HOLIGILM 4.2 poskytuje interfejs na zadanie až desiatich svetlovodov pre vybranú miestnosť, čo plne pokrýva potreby praxe. Počet bežne realizovaných svetlovodov nepresahuje hodnotu 3. U každého svetlovodu možno samostat-

jú sa vnútri miestnosti je obdĺžnikového tvaru a môže byť menšia, nanajvýš rovná ploche pôdorysu miestnosti (obr. 2). Poloha svetlovodu v miestnosti, rozmery a optické vlastnosti jeho prvkov sa zadávajú pre každý svetlovod samostatne.



Obr. 3. Príklad osvetľovacej zostavy s tubusom priemeru 0,52m a difúzorom rozptyľujúcim svetlo do interiéru podľa Lambertovej krivky ideálneho rozptylu



Obr. 2. Definícia porovnávajúcej roviny

zmení – nakoľko sa používajú analytické vzťahy. Zmení sa len formálna veľkosť obrazového bodu (pixelu). V danom pixeli sa hodnota osvetlenia priemeruje – takže pri low a high úrovniach budú napokon hodnoty osvetlenia v pixeli odlišné, a to z toho dôvodu, že osvetlenie sa priemeruje nad rôzne veľkými pixelmi. Tento rozdiel však nie je väčší ako 5%. Uvedený postup výpočtu zabezpečuje vždy rovnaké výsledky pri zvolenej presnosti výpočtu. V blízkosti tzv. hot-spotov (miest s vysokými úrovňami osvetlenia) sa môže toto osvetlenie výrazne meniť, a tak priemerovanie cez neadekvátne (resp. nevhodne zvolené) veľké pixely môže „vymazať“ špecifickú (jemnú) štruktúru izočiari v danom mieste zobrazenia. V každom prípade táto neurčitost nijako nesúvisí s fundamentálnou presnosťou samotného analytického riešenia. Stredný pomer medzi rýchlosťami výpočtu pre low a high presnosť je zhruba 1:12. Algoritmus programu HOLIGILM 4.2 umožňuje zobrazovať rozloženie osvetlenia na difúzore alebo porovnávajúcej roviny v troch stupňoch kvality: low, medium alebo high.

ne zadať jeho polohu v miestnosti, polomer tubusu, činiteľ odrazu svetla od jeho vnútorného povrchu, činiteľ prestupu svetla kupolou a optického rozhrania/prvku umiestneného na spodnom okraji svetlovodu (zvyčajne sa používa difúzny materiál rozptyľujúci svetlo do miestnosti). Užívateľ má možnosť navrhovať nasledujúce typy rozhraní: lambertovský difúzor alebo priesačné sklo a tiež ich vzájomnú kombináciu v podobe koncentrických častí – medzikružie.

b) Riešenie zostaveného modelu (pomocou jadra systému).

Pred spustením výpočtu parametre vytvoreného projektu v ďalšom podliehajú detailnej kontrole (napr. kontroluje sa fyzikálna správnosť veličín, korektné uloženie a geometrický odstup jednotlivých svetlovodov atď.). V prípade akejkoľvek zistenej chyby dostane užívateľ detailné informácie o mieste výskytu chyby a o spôsobe jej opravy. Dáta sú následne prenesené do jadra systému, ktoré zabezpečuje samotný výpočet.

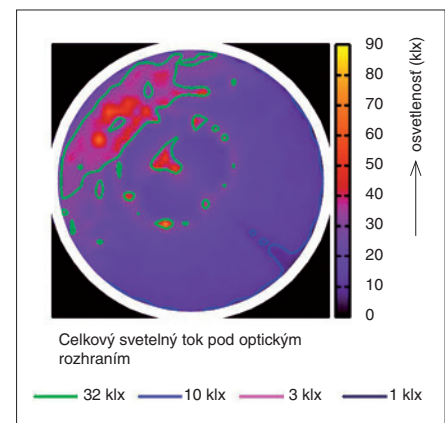
c) Grafická prezentácia výsledkov (prezentácia vrstva GUI).

Dáta určujúce rozloženie osvetlenia na porovnávacej ploche pod difúzorom a taktiež na difúzore každého svetlovodu sú prezentované v tabuľkovej aj grafickej podobe. Tabuľkový výstup je uložený v pracovnom adresári daného projektu. Voliteľná porovnávajúca rovina nachádza-

Na obr. 3 je zobrazený príklad zostavy s tubusom priemeru 0,52m a difúzorom rozptyľujúcim svetlo do interiéru podľa Lambertovej krivky ideálneho rozptylu.

Modelové prípady

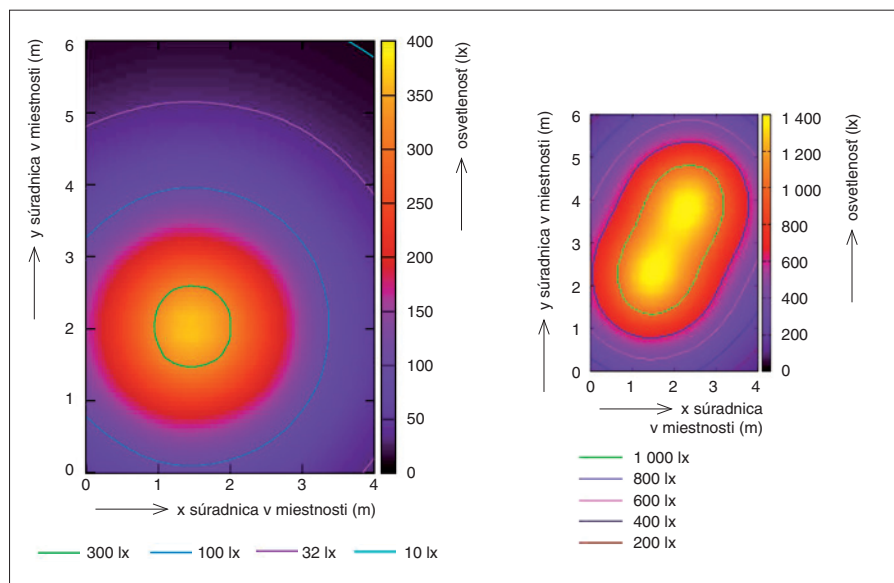
Hlavným dôvodom pre výpočet prenosu svetla svetlovodmi v budovách je zistenie osvetlenia na porovnávacej/pracovnej ploche. Tento údaj je z inžinierskeho a svetelnotechnického hľadiska naj-



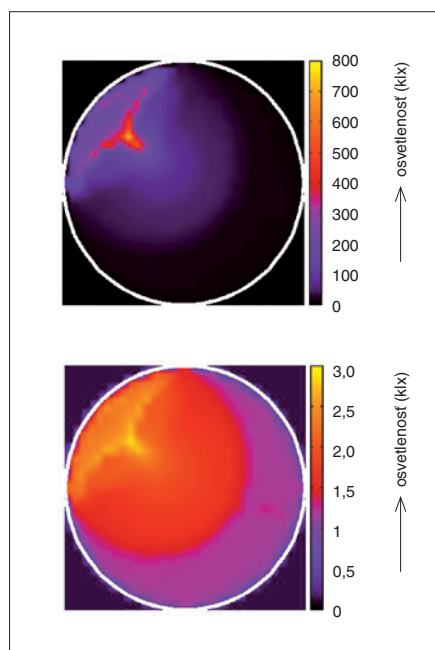
Obr. 4. Rozloženie osvetlenia na hornom povrchu difúzora

zaujímavejší. Napriek tomu treba zdôrazniť, že vypočítané a zobrazené izočiary osvetlenia na spodnej hranici svetlovodu (teda na virtuálnom difúzore) majú tiež svoje opodstatnenie. Umožňujú pochopiť napr. špecifickú štruktúru osvetlenia pracovného priestoru pod svetloводом

ukončeným prieszračným sklom alebo nelambertovským difúzorom. Taký difúzor môže vykazovať istú smerovo premenlivú redistribúciu svetelných lúčov, a tak preferovať niektoré vybrané smery. U číreho skla je smerová preferencia vybraných zväzkov lúčov úplne evidentná. Tiež stojí za povšimnutie, že na difúzore sa objavujú miesta s extrémne vysokou úrovňou osvetlenia, ktoré môže mnohokrát prevyšovať hodnotu slnečnej konštanty. Takéto miesta sa nazývajú „hotspoty“ a ich rozloženie, počet a svetelný exces závisia na geometrii svetlovodu – t. j. na priemere, jeho dĺžke, ale aj na výške Slnka – ako hlavného zdroja svetla. Ak si predstavíme zakrivenie tubusu, je vznik „hotspotov“ zrejmy – odrazná plocha tubusu so špecifickým polomerom totiž funguje ako optický koncentrátor sústreďujúci vybrané lúče do jedného miesta alebo do istej zóny v priestore. Ak sa práve v danom mieste priestoru nachádza difúzor, bude projekcia týchto lúčov na ňom vytvárať „hotspoty“. Pri krát-



Obr. 6. Osvetlenie porovnávacej roviny pod jedným (vľavo) a dvoma (vpravo) svetlovodmi s lambertovskými difúzormi



Obr. 5. Ukážka rôzneho zobrazenia rozloženia osvetlenia na virtuálnom difúzore v spodnej rovine ukončujúcej tubus svetlovodu; obrázok hore využíva lineárnu mierku zobrazovania, zatiaľ čo obrázok dole je prezentovaný v logaritmickej mierke

kých tubusoch a stredných výškach Slnka nad horizontom vzniká menší počet odrazov slnečných lúčov v tubuse svetlovodu a zdeformovaný obraz okolo slnečnej zóny sa bude preferovane premietat na jednu stranu difúzora (obr. 4). Vhodnou voľbou (napr. zobrazením v logaritmickej mierke) je možné dosiahnuť zvýraznenie presvetlenia niektorých častí difúzora (obr. 5).

Ukážky výpočtov osvetlenia porovnávacej roviny pod jedným a pod dvoma svetlovodmi sú prezentované na obr. 6.

Záver

Existencia analytického riešenia prenosu svetla tubusovými svetlovodmi (s difúzormi rôznych vlastností) umožňuje abstraktné experimentovanie metódou počítačových simulácií. To dáva inžinierom a svetelným technikom do rúk silný nástroj, pretože riešenie osvetlenia miestnosti môžu reálne modelovať ešte skôr, než pristúpia k samotnej realizácii. Takéto modelovanie pritom dokáže akceptovať prevládajúce svetelné pomery v danej lokalite (typické rozloženia jasu na oblohe), prevládajúce pozície Slnka v letných a zimných mesiacoch, azimutálnu orientáciu miestnosti ad. a vybrať najvhodnejšiu kombináciu svetlovodov alebo difúzorov pre dosiahnutie požadovaného osvetlenia vo vybraných častiach miestnosti (alebo na dosiahnutie takého rozloženia osvetlenia, ktoré sa najviac približuje tomu požadovanému). Vzhľadom k extrémne rýchlemu výpočtu je možné v krátkom čase preveriť veľké množstvo kombinácií a navrhnuť optimálnu zostavu osvetľovacieho systému. Pri absencii výpočtového programu by riešenie osvetlenia svetlovodmi muselo stáť len na skúsenostiach svetelného technika, alebo by bolo potrebné zabudovať veľa svetlovodov, tie následne premerať a vyhodnotiť. Pri experimentovaní in situ každá nová inštalácia vyžaduje demontáž tej predchádzajúcej a montáž novej, čo je nielen časovo náročné, ale niekedy aj finančne nerealizovateľné. Preto program HOLIGILM 4.2 môže poskytnúť riešenia, ktoré sú schopné významne prispieť k zefektívnemu osvetleniu pasívnymi optickými systémami, akými sú svetlovody.

Podakovanie: Tento príspevok vznikol za podpory projektu APVV-0264-07 a APVV SK-CZ – 0038-07.

Literatúra:

- [1] ROSEMAN, A. – KAASE, H.: *Lightpipe applications for daylighting systems*. Solar Energy, 2005, 78, s. 772–780.
- [2] OAKLEY, G. – RIFFAT, S. B. – SHAO, L.: *Daylight performance of light pipes*. Solar Energy, 2000, 69, s. 89–98.
- [3] PARONCINI, M. – CALCAGNI, B. – CORVARO, F.: *Monitoring of a light-pipe system*. Solar Energy, 2007, 81, s. 1180–1186.
- [4] ELMAUALIM, A. A. – SMITH, S. – RIFFAT, S. B. – SHAO, L.: *Evaluation of dichroic material for enhancing light pipe/natural ventilation and daylighting in an integrated system*. Appl. Energy, 1999, 62, s. 253–266.
- [5] DARULA, S. – KITTLER, R. – KOCIFAJ, M. – PLCH, J. – MOHELNIKOVÁ, J. – VAJKAY, F.: *Osvetľovány svetlovody*. Grada Publishing, Praha, 2009, 160 s.
- [6] MOHELNIKOVA, J.: *Tubular light guide evaluation*. Building and Environment, 2009, 44, č. 10, s. 2193–2200.
- [7] KOCIFAJ, M. – DARULA, S. – KITTLER, R.: *HOLIGILM: Hollow light guide interior illumination method – An analytic calculation approach for cylindrical light-tubes*. Solar Energy, 2008, 82, 247–259.
- [8] MOHELNIKOVA, J. – VAJKAY, F.: *Daylight simulations and tubular light guides*. International Journal of Sustainable Energy, 2008, 27, č. 3, s. 155–163.
- [9] LARSON, G. W. – SHAKESPEARE, R. A.: *Rendering with radiance. The art and science of lighting visualization*. San Francisco, California: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 1998.
- [10] ISO 15469:2004/CIE S011/E:2003 *Spatial distribution of daylighting-CIE Standard General Sky*.

Recenze: doc. Ing. Jitka Mohelníková, Ph.D., Fakulta stavební VUT v Brno