

# Význam činitelů při výpočtech ve stavební světelné technice

doc. Ing. Jan Kaňka, Ph.D., Stavební fakulta ČVUT v Praze

Tento příspěvek upozorňuje na některé okolnosti používání činitelů při výpočtech ve stavební světelné technice, zejména v souvislosti s požadavky novelizované ČSN 73 0580-1 *Denní osvětlení budov*. Kvantitativním kritériem při hodnocení osvětlenosti denním světlem je *činitel denní osvětlenosti D (%)*. Definuje se jako poměr osvětlenosti  $E$  (lx) dané roviny (vodorovné, svislé nebo skloněné) v posuzovaném místě v interiéru nebo exteriéru k současné horizontální exteriérové osvětlenosti  $E_H$  (lx). Tento poměr se vyjadřuje v procentech.

$$D = (E/E_H) 100 \% \quad (1)$$

Obloha jako plošný zdroj denního světla se v závislosti na roční a denní době a na povětrnostních podmínkách neustále mění. Při světelnotechnickém hodnocení se vychází z nejméně příznivého stavu oblohy: výpočtového modelu zcela zatažené oblohy v zimě, kdy úroveň jasů oblohy ovlivňují jen odrazivé vlastnosti terénu v důsledku mnohonásobného odrazu oblohového světla mezi zemským povrchem a spodní vrstvou oblaků. K poloze slunce na obloze se při tomto hodnocení nepřihlíží a jas oblohy je závislý pouze na elevačním úhlu  $\varepsilon$  (°) (výšce nad horizontem) podle vztahu (2)

$$L(\varepsilon) = L_m \frac{3 + 6(1 - \rho_T)^3 \sin \varepsilon}{7 - 4\rho_T^3} \quad (2)$$

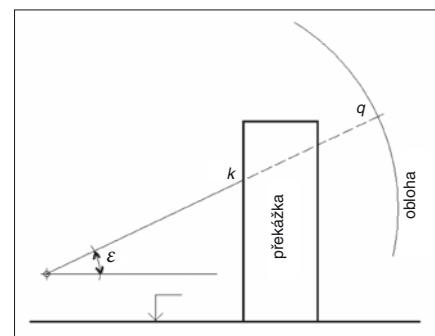
kde

$L(\varepsilon)$  je jas oblohy ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) v místě určeném elevačním úhlem  $\varepsilon$  (°),  
 $L_m$  průměrný jas oblohy ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ),

$\rho_T$  činitel odrazu světla terénu (-), který má při tmavém terénu hodnotu 0 až 0,3 a při zasneženém terénu hodnotu 0,7 až 0,8.

Nejistota výpočtu je vnímána jako možný rozdíl mezi vypočítanou hodnotou veličiny a hodnotou skutečnou. Skutečná hodnota se ve fyzice stanovuje přesným měřením. Problém přesného měření ve stavební světelné technice spočívá ve skutečnosti, že jasové poměry na obloze nikdy přesně neodpovídají vztahu (2) a jen v některých dnech v roce se podobají výpočtovému modelu oblohy natolik, aby byly splněny tolerance jasů, které připouští ČSN 36 0011-2 *Měření osvětlení vnitřních prostorů – Část 2: Měření denního osvětlení*. Další nejistoty měření spočívají ve světelnotechnických vlastnostech osvětlovacích otvorů (činitel prostupu světla), stínících překážek (činitel jasu) i samotné místnosti (činitel odrazu světla). Všechny již uvedené činitele mohou mít v době měření (po zařazení místnosti nábytkem, v závislosti na úpravě terénu pod okny a v důsledku znečištění zasklení oken) hodnoty rozdílné od těch, které byly použity při výpočtu. Když před lety hygienická stanice v Ústí nad Orlicí organizovala studii, která porovnávala přesnost různých výpočetních programů, nezbylo než jako „etalon“ použít výsledky modelového měření pod umělou oblohou v Ústavu stavebnictví Slovenské akademie věd. Umělá obloha je zařízení, které umožňuje přesně měřit denní světlo na modelech budov (5). Jde o kulovou plochu zevnitř nasvícenou umělými zdroji tak, že její jasové poměry přesně odpovídají vztahu (2).

Přes uvedené nedostatky se měření denního osvětlení provádějí a jsou důležitým nástrojem kontroly osvětlení denním světlem v budovách. Jejich přesnost je dostatečně velká k určení třídy zrakové činnosti na pracovišti nebo k rozhodnutí o přípustném počtu podlaží projektované budovy, která bude stínit. Ale drobné změny, jako je např. zvýšení hřebene střechy o několik decimetrů, lze měřením jen stěží posoudit. Odhaduje se, že přesnost „terénních“ měření denního osvětlení se pohybuje okolo  $\pm 10 \%$ . Tato přesnost měření denního osvětlení je ale v naprostém souladu se skutečným působením denního světla v budovách, kdy zdraví uživa-



Obr. 1. Schéma k určení jasu stínící překážky

telů vnitřních prostor může být ovlivněno nedostatky v denním osvětlení, jsou-li tyto nedostatky závažné (stínící překážka s velkým počtem podlaží), ale drobné okolnosti a změny (zvýšení hřebene střechy o řádové decimetry) uživatelé budov při proměnlivosti denního světla na svém pracovním stole ani nezaznamenají. Stejně tak přesnost graficko-početních metod, které se dříve výhradně používaly ke stanovení hodnot činitele denní osvětlenosti (metoda Daniljukova, metoda BRS nebo Waldramův diagram), ve většině posuzovaných případů vyhoví potřebám posouzení denního osvětlení budov.

V několika posledních letech nastal díky možnostem, které poskytují osobní počítače, nebývalý rozvoj metod výpočtu hodnot denního osvětlení. Zatímco dříve používané graficko-početní metody mohly poskytnout jen hrubé výsledky, s použitím počítače je možné provádět výpočet s vysokou přesností, pro účely posuzování stavebních objektů někdy až nadbytečnou. Proto bylo v novelizované ČSN 73 0580-1 *Denní osvětlení budov – základní požadavky* (červen 2007) zavedeno

Tab. 1. Orientační hodnoty činitele odrazu světla běžných povrchů podle [1]

| Barva povrchu  | Činitel odrazu světla $\rho$ (-) | Druh povrchu           | Činitel odrazu světla $\rho$ (-) |
|----------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| bílá           | 0,75 až 0,80                     | cihla (červená pálená) | 0,25                             |
| krémová        | 0,60 až 0,70                     | písek světlý           | 0,50                             |
| světle žlutá   | 0,60 až 0,70                     | sádra bílá             | 0,80 až 0,92                     |
| tmavě žlutá    | 0,50 až 0,60                     | mramor bílý            | 0,55 až 0,80                     |
| světle červená | 0,40 až 0,50                     | žula                   | 0,40 až 0,50                     |
| tmavě červená  | 0,15 až 0,30                     | dřevo světlé           | 0,30 až 0,50                     |
| světle zelená  | 0,45 až 0,65                     | dřevo tmavé            | 0,10 až 0,25                     |
| tmavě zelená   | 0,05 až 0,20                     | zeleň, tráva           | 0,05 až 0,10                     |
| světle modrá   | 0,40 až 0,60                     | živичný povrch         | 0,10                             |
| tmavě modrá    | 0,05 až 0,20                     | betonová dlažba        | 0,30                             |
| hnědá          | 0,12 až 0,25                     | zemina                 | 0,08 až 0,20                     |
| světle šedá    | 0,40 až 0,60                     | okno z vnější strany   | 0,10                             |
| tmavě šedá     | 0,15 až 0,20                     | okno se záclonou       | 0,30 až 0,40                     |
| černá          | 0,01 až 0,03                     | sníh                   | 0,75 až 0,80                     |

pravidlo: uvádět hodnoty činitele denní osvětlenosti zaokrouhlené na jedno desetinné místo (článek 4.1.8). Má se tak předejít zbytečným sporům o malé hodnoty denního osvětlení, které jsou nevýznamné z hlediska působení na zdraví uživatelů budov. Vzhledem k nejistotám plynoucím ze vstupů do automatických výpočtů však ani s větší přesností výstupů nelze počítat.

Přesnost světelnotechnických výpočtů dnes není limitována vlastnostmi výpočetní metody. Tu lze díky možnostem automatických výpočtů považovat za dokonalou. Velkou nejistotu však do jakéhokoliv světelnotechnického výpočtu vnášejí jeho vstupy, tj. hodnoty veličin, které se do výpočtu zadávají. Rozměrové parametry posuzované místnosti a jejího okna a geometrický tvar stínících překážek jsou okolnosti, které jsou zpravidla jasné a dobře dokumentovatelné. Zadání výpočtu vychází z okótovaných stavebních výkresů a situace, kde výškové poměry stínících objektů mohou být ověřeny geodetickým zaměřením. Méně jasné jsou však hodnoty činitelů prostupu světla osvětlovacím otvorem, hodnoty činitelů jasu povrchů stínících překážek a hodnoty činitelů odrazu světla posuzované místnosti. Aby byl zajištěn stejný postup při výpočtech denního osvětlení, jsou hodnoty těchto činitelů jednotně stanoveny novelizovanou ČSN 73 0580-1 Denní osvětlení budov – základní požadavky (červen 2007) a použitých jiných než v této normě uvedených hodnot je podmiňováno doložením jejich stanovení spolu s příslušnou dokumentací barevnosti povrchů a dalších okolností.

Za stínící překážky se zpravidla považují budovy, inženýrské stavby a terénní útvary. Uvažování vzrostlé zeleně jako překážky pro přístup denního světla je méně obvyklé, protože listnaté stromy jsou v zimním období bez listů, takže nestíní, a v letním období působí zelená naopak spíše příznivě, protože brání nadměrnému přístupu slunečních paprsků. Zadání rozměrů stínící překážky tvořené vzrostlou zelení do výpočtu by také bylo velmi problematické, protože tvary korun stromů jsou složité, během času se mění a je obtížné je geometricky zaměřit a popsat. V konkrétních případech stíznosti na stínění vzrostlou zelení se její vliv na denní osvětlení dokumentuje měřením činitele denní osvětlenosti v zastíněných prostorách.

Světelnotechnické vlastnosti stínících překážek se vyjadřují pomocí činitele jasu stínící překážky  $k$  (–). Ten je definován jako podíl jasu  $L_p$  ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) stínící překážky a jasu  $L(\epsilon)$  ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ) oblohy, kterou překážka zakrývá

$$k = L_p/L(\epsilon) \quad (3)$$

V článku A12 normativní přílohy ČSN 73 0580-1 se doporučuje používání hodnoty  $k = 0,1$ . Předpokládá se tak, že jas stínící překážky je jednou desetinou jasu oblohy, kterou překážka zakrývá. Případné použití vyšší hodnoty je nutné doložit projektem barevného řešení objektů i terénu mezi nimi.

Od činitele jasu stínící překážky je třeba odlišit veličinu činitel odrazu světla.

Tab. 2. Směrné hodnoty činitele prostupu světla  $\tau_{s,nor}$  (–) pro vybrané materiály podle [1]

| Druh materiálu               | Činitel prostupu světla $\tau_{s,nor}$ (–) |
|------------------------------|--------------------------------------------|
| čiré tabulové sklo 3 až 4 mm | 0,92                                       |
| surové sklo (nevzorované)    | 0,88                                       |
| vzorované sklo               | 0,85 až 0,90                               |
| drátové sklo 6 až 7 mm       | 0,60 až 0,86                               |
| mdlené sklo                  | 0,75 až 0,80                               |
| laminát se skleněným vláknem | 0,35 až 0,85                               |
| akrylát čirý                 | 0,85 až 0,92                               |
| akrylát rozptylný            | 0,60 až 0,80                               |
| determální sklo              | 0,35 až 0,70                               |
| reflexní sklo                | 0,55 až 0,65                               |
| skleněná tvárnice            |                                            |
| jednovrstvá                  | 0,85 až 0,89                               |
| dvouvrstvá                   | 0,55 až 0,62                               |
| skleněná příčka Copilit      |                                            |
| jednovrstvá                  | 0,86                                       |
| dvouvrstvá                   | 0,80                                       |
| záclona                      | 0,50 až 0,75                               |

Činitel odrazu světla  $\rho$  (–) je vlastností povrchu těles. Stanovuje se jako poměr odraženého světelného toku vzhledem k dopadajícímu světelnému toku

$$\rho = \Phi_r/\Phi_0 \quad (4)$$

kde

$\Phi_0$  je světelný tok dopadající na daný povrch (lm),

$\Phi_r$  světelný tok odražený (lm).

Činitel odrazu světla souvisí s odstínem barvy povrchu a může pro zcela pohlcující (černé) až po zcela odrazné (bílé) povrchy teoreticky nabývat hodnot v intervalu 0 až 1. Mezi činitelem jasu  $k$  (–) a činitelem odrazu světla  $\rho$  (–) stínící překážky existuje vztah

$$k = D\rho/100q \quad (5)$$

kde

$D$  je činitel denní osvětlenosti (obvykle svislého) povrchu stínící překážky (%),  $q$  činitel gradovaného jasu (–) popisující rozložení jasu na obloze v závislosti na elevačním úhlu  $\epsilon$  (°) ve smyslu vztahu (2) (viz obr. 1).

$$q = \frac{L(\epsilon)}{L_m} = \frac{3}{7}(1 + 2 \sin \epsilon) \quad (6)$$

Ze vztahu (5) je zřejmé, že na hodnotu činitele jasu má vliv nejen barevný odstín stínící překážky, ale i její osvětlení denním světlem, které přichází jednak přímo z oblohy a jednak je odražené od protějšího objektu (tedy objektu posuzovaného) a od terénu mezi oběma objekty. Při výpočtech činitele jasu je nutné vzít v úvahu, že okna v průčelí domu působí jako černé plochy s činitelem odrazu světla nejvýše  $\rho = 0,1$ . Průměrný činitel odrazu světla průčelí opatřeného světelným nátěrem stěží může mít vyšší hodnotu než  $\rho = 0,5$ . Činitel jasu stínících překážek většinou bude mít hodnotu  $k = 0,1$  (jak doporučuje norma), ve zvláště příznivých případech může být až  $k = 0,2$  (5). Velmi nebezpečná je záměna obou činitelů a dosažení  $k = 0,5$ . To pak vychází všechno velmi příznivě, ale nesprávně.

Činitel odrazu světla  $\rho$  (–) se významně podílí na hodnotě vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti. Při výpočtu se používají činitele jednotlivých ploch (stropu, stěn a podlahy posuzované místnosti) a nebo se stanovuje průměrná hodnota tohoto činitele podle vztahu

$$\rho_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \rho_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (7)$$

kde

$n$  je počet povrchů v místnosti,  $S_i$  plocha  $i$ -tého povrchu ( $\text{m}^2$ ), který má v důsledku své barevnosti hodnotu  $\rho_i$  (–) činitele odrazu světla.

Směrné hodnoty činitelů odrazu světla různě zbarvených povrchů jsou uvedeny v tab. 1. Průměrná hodnota činitele odrazu světla  $\rho_m = 0,5$  je doporučena v ČSN 73 0580-1 v článku A.20. Použití vyšší hodnoty je nutné dokumentovat projektem barevného řešení všech vnitřních ploch v místnosti. Při návrhu interiéru je třeba barevnost povrchů stěn, stropu a podlahy navrhovat v souladu s článkem 4.6 normy.

Při průchodu světla osvětlovacím otvorem se velikost světelného toku zmenšuje v závislosti na materiálu zasklení, vlivem neprůsvitných částí konstrukce okna a vlivem znečištění zasklení. K dalším ztrátám světla může dojít stíněním konstrukcemi posuzované budovy nebo jiným zařízením v interiéru trvale instalovaným.

Zmenšení světelného toku se charakterizuje činitelem prostupu světla  $\tau$  (–), který je definován jako poměr prošlého světelného toku  $\Phi_t$  (lm) k dopadajícímu světelnému toku  $\Phi_0$  (lm)

$$\tau = \Phi_t/\Phi_0 \quad (8)$$

Je-li světelný tok kolmý na rovinu zasklení, hovoří se o činitele prostupu světla v normálovém směru  $\tau_{s,nor}$  (–). Jeho směr-

né hodnoty pro některé materiály jsou uvedeny v tab. 2. Při vícenásobném zasklení se výsledný činitel stanovuje jako součin dílčích činitelů. Hodnoty rozdílne od hodnot v této tabulce uvedených nebo hodnoty materiálů v tabulce neuvedených mohou být doloženy např. prospektem výrobce skla.

Propustnost světla závisí též na směru průchodu světla zasklením. Pro nejvíce častý případ zasklení dvojím čirým sklem lze činitele prostupu světla stanovit podle vztahu

$$\tau_{s,\psi} = \tau_{s,nor} \tau_{\psi} = \tau_{s,nor} \cos \psi \left(1 + \frac{1}{2} \sin^2 \psi\right) \quad (9)$$

kde

$\psi$  je úhel mezi směrem prostupu světla a normálou zasklení ( $^{\circ}$ ),

$\tau_{\psi}$  veličina, která se nazývá *činitel směrové propustnosti* (-),

$\tau_{s,nor}$  viz tab. 2. (-).

Pro materiály rozptylující světlo (vzrované sklo, laminát, reflexní skla a skleněné tvárnice) však vztah (9) nelze použít.

Vliv neprůsvitných částí konstrukce okna (okenních rámců, příclí) se vyjadřuje jako podíl průsvitné plochy  $S_s$  ( $m^2$ ) a celé skladebné plochy ( $m^2$ ) osvětlovacího otvoru

$$\tau_k = S_s / S_c \quad (10)$$

kde  $\tau_k$  (-) je *činitel prostupu světla vlivem stínění neprůsvitnými konstrukcemi osvětlovacího otvoru*. Tento činitel významně zjednodušuje výpočty při relativně malé ztrátě přesnosti. Dovoluje totiž ve výpočtu pracovat pouze se skladebnými rozměry osvětlovacích otvorů.

*Činitel prostupu světla vlivem zařízení pro regulaci osvětlení*  $\tau_r$  (-) má obdobný charakter

$$\tau_r = (S_s - S_r) / S_s \quad (11)$$

kde  $S_r$  ( $m^2$ ) je plocha neprůsvitných konstrukcí zařízení pro regulaci osvětlení (např. žaluzií). U pohyblivých zařízení se pro stanovení hodnot činitele denní osvětlenosti plocha  $S_r$  uvažuje při otevřené poloze, protože při zatažené obloze nebudou tato zařízení v činnosti.

Ztráty vlivem znečištění zasklení se vyjadřují pomocí *činitele znečištění*  $\tau_z$  (-). Jeho hodnoty uvádí tab. 3. Výsledný činitel znečištění se získá jako součin dílčích činitelů znečištění z vnější  $\tau_{ze}$  (-) a vnitřní  $\tau_{zi}$  (-) strany.

$$\tau_z = \tau_{ze} \tau_{zi} \quad (12)$$

Znečištění venkovního vzduchu je malé při spadu prachu do  $50 \text{ Mg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$  a velké při spadu nad  $200 \text{ Mg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Znečištění vnitřního vzduchu se uvažuje

Tab. 3. Směrné hodnoty činitele prostupu světla  $\tau_{s,nor}$  (-) pro vybrané materiály podle [1]

| Druh osvětlovacího otvoru | Sklon zasklení osvětlovacího otvoru | Znečištění vzduchu | Činitel znečištění               |                                   |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                           |                                     |                    | na vnější straně $\tau_{ze}$ (-) | na vnitřní straně $\tau_{zi}$ (-) |
| svislý                    | 90°                                 | malé               | 0,95                             | 0,95                              |
|                           |                                     | střední            | 0,90                             | 0,85                              |
|                           |                                     | velké              | 0,85                             | 0,65                              |
| šikmý                     | 45°                                 | malé               | 0,80                             | 0,95                              |
|                           |                                     | střední            | 0,70                             | 0,90                              |
|                           |                                     | velké              | 0,60                             | 0,80                              |
| vodorovný                 | 0°                                  | malé               | 0,70                             | 0,95                              |
|                           |                                     | střední            | 0,60                             | 0,90                              |
|                           |                                     | velké              | 0,50                             | 0,80                              |

Tab. 4. Činitele prostupu světla stíněním konstrukcí budovy  $\tau_b$  (-) podle [1]

| Druh konstrukce                                 | Činitel ztrát světla $\tau_b$ (-) |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
| ocelová příhradová                              | 0,90                              |
| železobetonová nebo dřevěná příhradová          | 0,80                              |
| plnostěnné vazníky a nosníky s výškou do 0,5 m  | 0,90                              |
| plnostěnné vazníky a nosníky s výškou nad 0,5 m | 0,80                              |

je střední v čistých dílnách, skladištích apod., velké při významných zdrojích prachu v interiéru – např. prašné dílny.

Zejména u halových staveb s horním osvětlením se lze často setkat se stíněním konstrukcemi budovy pod světlíky uvnitř interiéru (plnostěnné a příhradové nosníky). *Činitel prostupu světla vlivem stínění konstrukcí budovy*  $\tau_b$  (-) se stanovuje podle tab. 4.

Ve výpočtech se zpravidla používají souhrnné hodnoty činitele propustnosti světla. *Souhrnný činitel prostupu světla*  $\tau_{0,\psi}$  (-) se stanovuje podle vztahu

$$\tau_{0,\psi} = \tau_{s,\psi} \tau_k \tau_r \tau_z \tau_b \quad (13)$$

a *souhrnný činitel prostupu světla ve směru normály*  $\tau_{0,nor}$  (-) se stanovuje podle vztahu

$$\tau_{0,nor} = \tau_s \tau_k \tau_r \tau_z \tau_b = \tau_{0,\psi} / \tau_b \quad (14)$$

Metody stanovení činitele denní osvětlenosti využívající automatický výpočet s použitím počítače jsou velmi efektivní. Dovolují v krátké době stanovit potřebné hodnoty v husté síti kontrolních bodů v celé místnosti. Umožňují výpočty i pro prostory a okna nestandardních tvarů.

Grafické výstupy jsou efektní, často využívají izokřivky stejné osvětlenosti, které názorně vypovídají o rozložení světla ve vnitřním prostoru. Automatické výpočty však mají jednu nevýhodu, která v porovnání s tradičními grafickými metodami spočívá v jejich malé transparentnosti. Z výstupů získaných z tiskárny PC se lze dozvědět pouze výsledek výpočtu a někdy i hodnoty, které byly do výpočtu zadány. Není možné se přesvědčit, jak výpočet probíhal, protože příslušné algoritmy často nejsou mimo automatické zpracování použitelné a zná je zpravidla jen autor příslušné-

ho programu. Stává se, že každá ze dvou stran sporu o stínění projektovanou budovou předloží svoji světelnotechnickou studii, z nichž obě jsou zpracovány určitým výpočetním programem, ale každá došla k navzájem diametrálně odlišným výsledkům.

Pak nezbyvá, než provést kontrolu tradiční graficko-početní metodou, která je sice pracná a pomalá, poskytne výsledek jen v několika málo kontrolních bodech, ale má tu výhodu, že každý si na ní může krok za krokem ověřit, jak výpočet probíhal. Kromě měření na již realizovaném objektu je použití graficko-početní metody jedinou možností, jak odhalit, ve které studii bylo počítáno chybně. Právě pro umožnění takové kontroly je v článku A.1 normativní přílohy A ČSN 73 0580-1 stanoven požadavek, aby každý výpočet obsahoval podrobnou kvantifikaci všech činitelů odrazu světla, činitelů prostupu světla a činitelů jasu, které byly při výpočtu použity. Bez uvedení těchto údajů by tato kontrola nebyla možná.

#### Literatura:

- [1] ČSN 73 0580-1 *Denní osvětlení budov – základní požadavky* (2007).
- [2] HALAHYJA, M. a kol.: *Stavební tepelná technika osvetlenie a akustika*. Alfa, Bratislava, 1985.
- [3] KAŇKA, J.: *Použití Waldramova diagramu při stanovení činitele denní osvětlenosti*. Stavební obzor, 1993/6.
- [4] KAŇKA, J.: *Stanovení činitele denní osvětlenosti svislé roviny okna Waldramovým diagramem upraveným v ČVUT Praha*. Světlo, 2002/1.
- [5] KITTLER, R. – KITTLEROVÁ, L.: *Návrh a hodnotenie denného osvetlenia*. Alfa, Bratislava, 1975.

Recenze: Ing. Stanislav Darula, CSc.