

3. ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY A POJMY

Vzhledem k tomu, že zrakový orgán člověka nemá schopnost vnímat souhrnné působení světla za určitou dobu, není pro vlastní vidění důležité celkové množství světelné energie vyzařené zdroji za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a zejména jeho prostorové rozdělení. Ve světelné technice se při hodnocení kvality osvětlení jako prostředku podmiňujícímu úroveň informace přijímané zrakem sledují důsledky působení záření na zrakový orgán a zrakový vjem. Proto se ve světelné technice neposuzují energetické veličiny (např. zářivý tok, zářivost apod.), ale pracuje se s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují proměnlivou citlivost oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Pro zajištění jednotnosti světelně technických výpočtů se počítá s hodnotami spektrální citlivosti oka tzv. normálního fotometrického pozorovatele.

3.1 Světelný tok

Světelně technická veličina, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem, se nazývá světelný tok.

Jednotkou světelného toku je 1 ℓ umen (ℓ m).

Světelný tok Φ monofrekvenčního záření, tedy záření jediné vlnové délky λ , které přenáší určitý zářivý výkon (tj. zářivý tok) Φ_e (W), se určí ze vztahu

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (\ell\text{m}; \ell\text{m}\cdot\text{W}^{-1}, -, \text{W}) \quad (3-1)$$

kde

$K(\lambda)$ je **světelný účinek monofrekvenčního záření** rovná poměru světelného toku Φ a odpovídajícího zářivého toku Φ_e

$$K(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} \quad (\ell\text{m}\cdot\text{W}^{-1}; \ell\text{m}, \text{W})$$

Z hlediska určitého pozorovatele je světelná účinnost záření rovna absolutní hodnotě citlivosti zraku pozorovatele k záření určité vlnové délky (tj. jeho spektrální citlivosti).

Při fotopickém (denním) vidění dosahuje veličina $K(\lambda)$ své maximální hodnoty K_m pro záření tzv. základní vlnové délky $\lambda = \lambda_m = 555 \text{ nm}$. U normálního fotometrického pozorovatele bylo usnesením 16. generální konference „Míry a váhy“ v r. 1979 schváleno pracovat s hodnotou $K_m = 683 \ell\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$.

$V(\lambda)$ je poměrná hodnota světelné účinnosti monofrekvenčního záření, pro kterou platí vztah

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad (-; \ell\text{m}\cdot\text{W}^{-1}, \ell\text{m}\cdot\text{W}^{-1}) \quad (3-2)$$

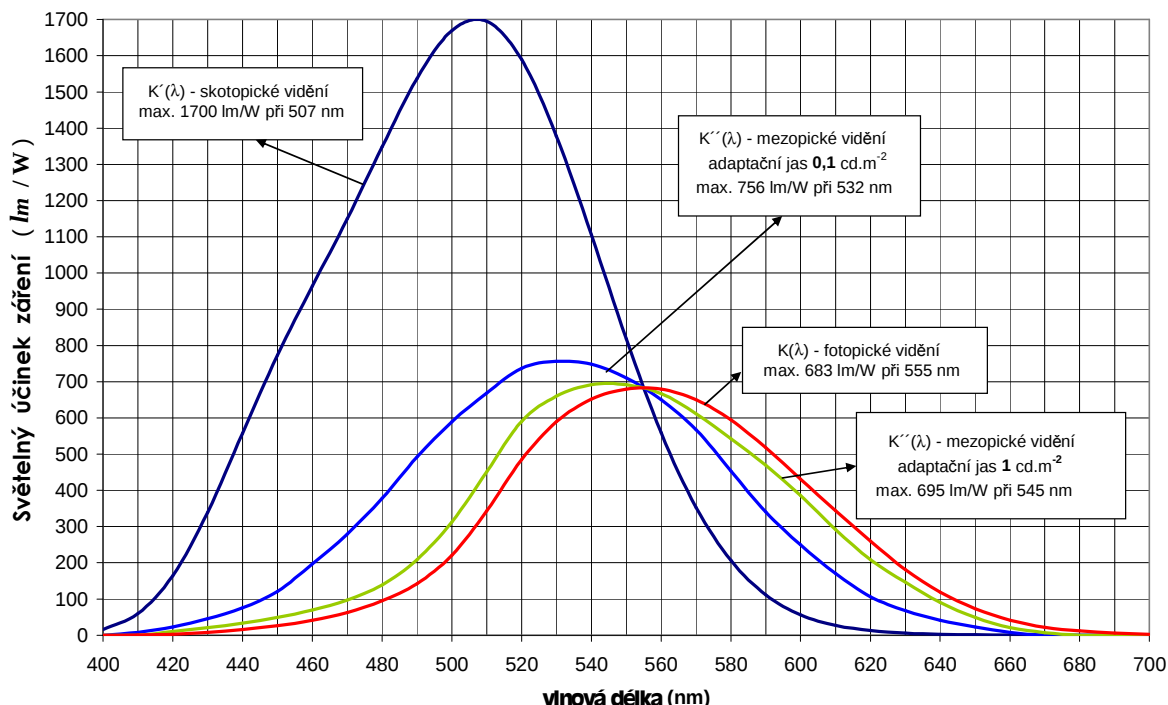
Z hlediska pozorovatele (obvykle se uvažuje normální fotometrický pozorovatel) je veličina $V(\lambda)$ totožná s poměrnou spektrální citlivostí zraku pozorovatele při fotopickém vidění.

Příklad

Monofrekvenčnímu zářivému toku $\Phi_e = 1 \text{ W}$ o vlnové délce $\lambda = 650 \text{ nm}$, kdy $V(\lambda) = 0,107$, odpovídá světelný tok $\Phi = 683 \cdot 1 \cdot 0,107 = 73 \text{ lm}$, zatímco půjde-li o záření vlnové délky $\lambda = 550 \text{ nm}$, kdy $V(\lambda) = 0,995$, bude odpovídající světelný tok podstatně větší: $\Phi = 683 \cdot 1 \cdot 0,995 = 680 \text{ lm}$.

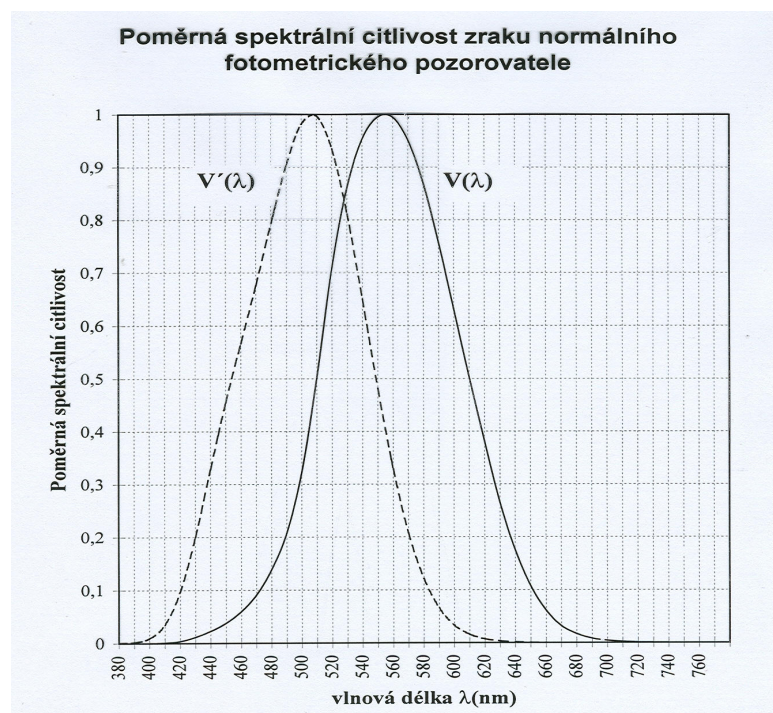
Stejně jako se pro fotopické vidění definovaly veličiny $K(\lambda)$, K_m a $V(\lambda)$ definují se pro skotopické vidění veličiny $K'(\lambda)$, $K'_m = 1700 \ell\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ při $\lambda = 507 \text{ nm}$ a $V'(\lambda)$. Světelný tok při skotopickém vidění se pak pro monochromatické záření určuje z rovnice (3-1), v níž se ovšem veličiny $K(\lambda)$, K_m a $V(\lambda)$ nahradí veličinami $K'(\lambda)$, K'_m a $V'(\lambda)$.

Důležité je si uvědomit, že při uvedené základní vlnové délce 555 nm je absolutní hodnota spektrální citlivosti lidského zraku jak pro fotopické, tak i pro skotopické vidění shodná a rovná $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Tuto skutečnost dokumentují průběhy absolutních hodnot spektrální citlivosti zraku normálního fotometrického pozorovatele nakreslené na obr.3-1. Se světelnými toky udávanými v lumenech se proto pracuje nejen při denním (fotopickém) vidění, ale i při vidění nočním (skotopickém).



Obr.3-1 Průběhy absolutních hodnot světelných účinků záření zraku normálního fotometrického pozorovatele pro vidění fotopické, mezopické a skotopické

Při běžných fotometrických výpočtech se světelný tok počítá pro fotopické vidění. Hodnoty veličin $V(\lambda)$ a $V'(\lambda)$ jsou podle normy ČSN 011710 uvedeny v tab.3-1 a jejich grafy jsou na obr.3-1a.



Obr. 3-1a

Průběh poměrné světelné účinnosti záření $V(\lambda)$ - při denním (fotopickém) vidění
 $V'(\lambda)$ - při nočním (skotopickém) vidění
v oblasti vlnových délek viditelného záření

Tab.3-1 Hodnoty poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele při denním vidění $V(\lambda)$ a při vidění nočním $V'(\lambda)$

vlnová délka λ (nm)	$V(\lambda)$ (-)	$V'(\lambda)$ (-)
380	0,0000	0,000589
390	0,0001	0,002209
400	0,0004	0,00929
410	0,0012	0,03484
420	0,0040	0,0966
430	0,0116	0,1998
440	0,023	0,3281
450	0,038	0,455
460	0,060	0,567
470	0,091	0,676
480	0,139	0,793
490	0,208	0,904
500	0,323	0,982
510	0,503	0,997
520	0,710	0,935
530	0,862	0,811
540	0,954	0,650
550	0,995	0,481
560	0,995	0,3288
570	0,952	0,2076
580	0,870	0,1212
590	0,757	0,0655
600	0,631	0,03315
610	0,503	0,01593
620	0,381	0,00737
630	0,265	0,003335
640	0,175	0,001497
650	0,107	0,000677
660	0,061	0,0003129
670	0,032	0,0001480
680	0,017	0,0000715
690	0,0082	0,00003533
700	0,0041	0,00001780
710	0,0021	0,00000914
720	0,00105	0,00000478
730	0,00052	0,000002546
740	0,00425	0,000001379
750	0,00012	0,000000760
760	0,00006	0,000000425
770	0,00003	0,000000241
780	0,000015	0,000000139

Z uvedeného, vyplývá, že světelný tok je vlastně zářivý tok zhodnocený zrakovým orgánem normálního fotometrického pozorovatele, a to obvykle při fotopickém vidění. Podobně jako jsou pro monofrekvenční záření definovány veličiny $K(\lambda)$ a $V(\lambda)$, definují se pro složené záření pojmy:

$$\text{světelný účinek záření} \quad K = \Phi / \Phi_e \quad (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; \text{lm}, \text{W}) \quad (3-3)$$

$$\text{poměrná světelná účinnost slož. záření} \quad V = K / K_m \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (3-4)$$

Světelný tok Φ záření složeného z různých monochromatických záření, jehož zářivý tok Φ_e je dán průběhem $\Phi_e(\lambda)$, se zjistí z rovnice

$$\Phi = 683 \int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}) \quad (3-5)$$

kde výraz $\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda$ je spektrální hustota zářivého toku Φ_e v bodě λ .

Rozdělí-li se spektrum vlnových délek viditelného záření na dostatečný počet n malých úseků $\Delta\lambda$ a odečte-li se ke středním hodnotám vlnových délek λ_i jednotlivých úseků $\Delta\lambda_i$ hodnoty zářivých toků $\Phi_e(\lambda_i)$ z daného průběhu $\Phi_e(\lambda)$ a hodnoty poměrné světelné účinnosti záření $V(\lambda_i)$ z křivky průběhu $V(\lambda)$, lze světelný tok Φ složeného záření $\Phi_e(\lambda)$ zjednodušeně určit z rovnice

$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \cdot V(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}) \quad (3-6)$$

Příklad :

Uvažme, že máme k dispozici zdroj složeného záření, jehož zářivý tok $\Phi_e = 1 \text{ W}$, je rovnoměrně rozložen (izoenergetické spektrum) po celé oblasti viditelného spektra (tj. v rozmezí vlnových délek $\Delta\lambda = 770 \text{ nm} - 380 \text{ nm} = 390 \text{ nm}$).

Spektrální hustota zářivého toku bude v takovém případě konstantní a rovná

$$\left(\frac{\Delta\Phi_e(\lambda)}{\Delta\lambda} \right) = \frac{1 \text{ W}}{390 \text{ nm}}$$

Vzorec (3-6) pro výpočet světelného toku složeného záření lze pak upravit do tvaru

$$\Phi = 683 \frac{1}{390} \sum_{i=1}^n V(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$$

Rozdělí-li se uvažovaná část spektra na stejné intervaly po $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$, lze $\Delta\lambda$ též vytknout před sumu a s využitím hodnot veličiny $V(\lambda)$ v tab. 3-1, zjistit, že

$$\sum_{i=1}^n V(\lambda_i) = 10,6857$$

Světelný tok Φ odpovídající uvažovanému zářivému toku Φ_e pak vychází

$$\Phi = 683 \frac{1}{390} \Delta\lambda \sum_{i=1}^n V(\lambda_i) = 683 \frac{1}{390} 10 \cdot 10,6857 = \frac{72984}{390} = 187 \text{ lm}$$

3.2 Prostorový úhel

Důležitou geometrickou veličinou používanou ve světelně technických výpočtech je prostorový úhel. Jeho velikost je určena velikostí plochy, vyřáté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy.

Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr), určený jednotkovou plochou (1 m^2) na povrchu jednotkové koule ($r = 1 \text{ m}$).

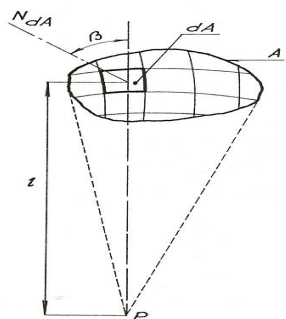
Prostorový úhel Ω , pod nímž je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A_k vyřátá na povrchu této koule, se stanoví ze vztahu

$$\Omega = \frac{A_k}{r^2} \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad (3-7)$$

Největší hodnoty $\Omega_{\max} = 4\pi$ nabývá prostorový úhel pro plochu A_k rovnou povrchu celé koule, kdy je velikost plochy A_k rovna $A_k = 4\pi r^2$.

Prostorový úhel $d\Omega$ elementu dA obecné plochy A pozorované ze vzdálenosti l z bodu P (viz obr.3-2) se vypočte z výrazu

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad (3-8)$$



kde β je úhel, který svírá osa prostorového úhlu $d\Omega$, tj. paprsek l , s normálou N_{dA} plošky dA .

Celá plocha A na obr.3-2 je z bodu P vidět pod prostorovým úhlem Ω , který je roven součtu všech dílčích prostorových úhlů, v jejichž mezích lze z bodu P pozorovat všechny dílčí plošky dA , na které byla plocha A rozdělena. To znamená, že prostorový úhel Ω se stanoví integrací rovnice (3-8) po ploše A

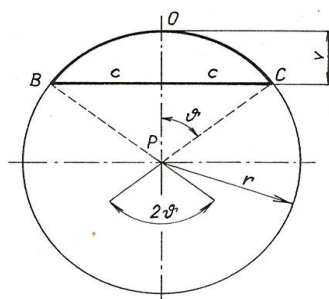
$$\Omega = \iint_A \frac{\cos \beta}{l^2} dA \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad (3-9)$$

Prostorový úhel části povrchu koule o poloměru r nebo kruhové plochy o poloměru c (viz obr.3-3) pozorované z bodu P se zjistí ze vztahu

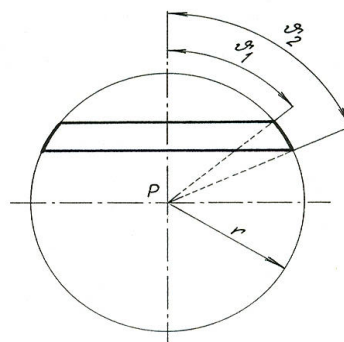
$$\Omega = \frac{2\pi r v}{r^2} = 2\pi (1 - \cos \vartheta) \quad (\text{sr}; \text{m}, \text{m}, -) \quad (3-10)$$

Kulový pás určený podle obr.3-4 úhly ϑ_1 a ϑ_2 se z bodu P pozoruje pod prostorovým úhlem, pro který se využitím rovnice (3-9) odvodí výraz

$$\Omega = 2\pi (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2) \quad (\text{sr}; -, -) \quad (3-11)$$



Obr. 3 - 3



Obr. 3 - 4

Rovinná ploška, jejíž rozměry jsou malé ve srovnání se vzdáleností, z níž se plocha pozoruje, je vidět pod prostorovým úhlem, který se určí ze vztahu (3-8), do kterého se za veličinu dA dosadí velikost pozorované plošky. Jde-li v takovém případě o prostorový úhel menší než

0,1256 sr , je chyba výpočtu menší než **1%**. Pokud v konkrétním případě není zmíněná podmínka splněna, je nutno buď vypočítat prostorový úhel z obecné rovnice (3-9), tedy integrací po pozorované rovině ploše, nebo je možno sledovanou rovinou plochu rozdělit na několik menších částí (z nichž každá je z daného bodu vidět pod prostorovým úhlem menším než 0,1256 sr) a pak hledaný prostorový úhel zjistit součtem z výrazu (3-8) určených prostorových úhlů, pod nimiž se z daného bodu pozorují jednotlivé dílčí plochy.

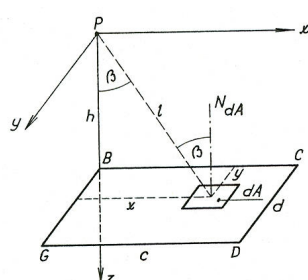
V praxi se často počítá prostorový úhel, pod nímž se z určité vzdálenosti pozoruje obdélníková plocha. Stanovme nejprve prostorový úhel, pod nímž je z bodu P vidět obdélník BCDG umístěný podle obr. 3-5 v souřadnicové soustavě x, y, z v rovině rovnoběžné s rovinou xy ve vzdálenosti h od počátku P soustavy. Důležité při tom je, že se kolmý průmět bodu P do roviny obdélníku BCDG ztotožňuje s vrcholem B pozorovaného obdélníku. Elementární plošku dA libovolně zvolenou na ploše obdélníku BCDG pozorujeme z bodu P pod prostorovým úhlem $d\Omega$, pro který platí vztah (3-8), do kterého se v souladu s obr. 3-5 dosadí

$$l^2 = x^2 + y^2 + h^2, \quad \cos\beta = h/l, \quad dA = dx \cdot dy$$

Pro elementární prostorový úhel $d\Omega$ pak vychází rovnice

$$d\Omega = \frac{h \cdot dx \cdot dy}{\sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)^3}} \quad (3-12)$$

Celý obdélník BCDG je z bodu P vidět pod prostorovým úhlem, který se stanoví integrací předchozí rovnice po ploše pozorovaného obdélníku



Obr. 3 - 5

$$\Omega = \int_{x=0}^c \int_{y=0}^d \frac{h \cdot dx \cdot dy}{\sqrt{(x^2 + y^2 + h^2)^3}} = \int_{u=0}^a \int_{v=0}^b \frac{du \cdot dv}{\sqrt{(1 + u^2 + v^2)^3}} \quad (3-13)$$

kde jsou zavedeny poměrné proměnné

$$u = x/h, \quad v = y/h, \quad h \cdot du \cdot dv = dx \cdot dy$$

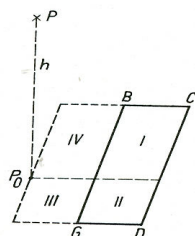
a poměrné rozměry obdélníku $a = c/h, \quad b = d/h$.

Po vyřešení rovnice (3-13) vychází pro hledaný prostorový úhel Ω výraz

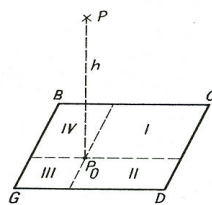
$$\Omega = \arctg \frac{c \cdot d}{h \cdot \sqrt{c^2 + d^2 + h^2}} = \arctg \frac{a \cdot b}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}} \quad (\text{sr}; \text{m}, \text{m}, \text{m}; -, -) \quad (3-14)$$

Určuje-li prostorový úhel, pod nímž je z bodu P vidět obdélník BCDG, umístěný podle obr.3-6 v rovině kolmé k úsečce PP_0 , doplní se sledovaný obdélník o dílčí obdélníky III a IV a rozdělí se na obdélníky I, II, jak je patrné z obrázku. Poté se podle vzorce (3-14) určí prostorové úhly $\Omega_{(IV+I)}, \Omega_{(III+II)}, \Omega_{(IV)}, \Omega_{(III)}$ pro obdélníky (IV+I), (III+II), IV a III. Hledaný prostorový úhel $\Omega_{(I+II)}$ se pak stanoví z rovnice

$$\Omega_{(I+II)} = \Omega_{(IV+I)} + \Omega_{(III+II)} - \Omega_{(IV)} - \Omega_{(III)} \quad (3-15)$$



Obr. 3 - 6



Obr. 3 - 7

Prostorový úhel, pod nímž se z bodu P pozoruje obdélník BCDG umístěný podle obr.3-7 v rovině kolmé k úsečce PP_0 , se určí jako součet podle rovnice (3-14) vypočtených prostorových úhlů $\Omega_{(I)}, \Omega_{(II)}, \Omega_{(III)}, \Omega_{(IV)}$. pod nimiž jsou z bodu P vidět dílčí obdélníky I, II, III, IV

$$\Omega_{(I+II+III+IV)} = \Omega_{(I)} + \Omega_{(II)} + \Omega_{(III)} + \Omega_{(IV)} \quad (3-16)$$

Obdobně se postupuje i v dalších případech.

3.3 Svítivost

Při nerovnoměrném rozložení světelného toku zdroje či svítidla do různých směrů prostoru je třeba kromě hodnoty úhnného světelného toku znát ještě prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech, tj. **svítivost** zdroje v těchto směrech. Svítivost je možno stanovit pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj (svítidlo), jehož svítící plocha má rozměry prakticky zanedbatelné ve srovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu.

Svítivost $I_{\gamma\zeta}$ bodového zdroje (svítidla bodového typu) ve směru určeném úhly γ, ζ je rovna světelnému toku obsaženému v jednotkovém prostorovém úhlu a je tedy definována vztahem

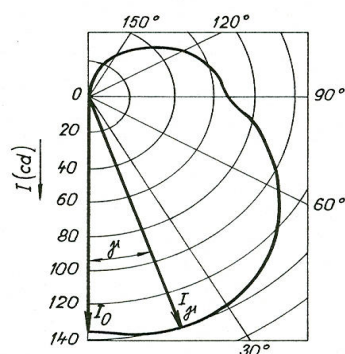
$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad (\text{cd; lm, sr}) \quad (3-17)$$

kde $d\Omega_{\gamma\zeta}$ je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ, ζ a v jehož mezích uvažovaný zdroj vyzařuje tok $d\Phi$.

Střední hodnota svítivosti bodového zdroje se stanoví jako poměr celkového světelného toku zdroje a prostorového úhlu, do kterého zdroj vyzařuje.

Jednotkou svítivosti je **1 kandela (cd)**, která patří k základním jednotkám soustavy SI. Podle usnesení 16. generální konference „Míry a váhy“ z roku 1979 je jedna kandela rovna **svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, při čemž zářivost zdroje v tomto směru je $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$** .

Zjistí-li se hodnoty svítivosti zdroje světla ve všech směrech prostoru a nanese-li se prostorově od bodu zdroje jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů těchto radiusvektorů **fotometrická plocha svítivosti**. Při výpočtech obvykle postačuje znát jen některé řezy touto plochou, a to rovinami procházejícími bodovým zdrojem. V rovinách řezů se takto dostanou **čáry (křivky) svítivosti** v polárních souřadnicích. Počátek diagramu svítivosti se umísťuje do tzv. **světelného středu** zdroje či svítidla, tj. do bodu, v němž si lze představit soustředěn uvažovaný zdroj. Základní či vztahný směr diagramu svítivosti, od něhož se měří úhly, se umísťuje obvykle do směru normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje či svítidla. Jednotlivé křivky svítivosti se získávají měřením na goniofotometrech a výrobci svítidel, popříp. zdrojů je uvádějí v dokumentaci (ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel).



Obr.3-8

Příklad čáry svítivosti
v polárním diagramu

Křivky svítivosti lze matematicky obecně popsat vztahem

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad (\text{cd; cd, -}) \quad (3-18)$$

kde I_{γ} je svítivost přečtená z uvažovaného diagramu svítivosti pod úhlem γ od vztahného směru (viz obr.3-11)

I_0 je svítivost uvažovaného zdroje ve vztahném směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla,

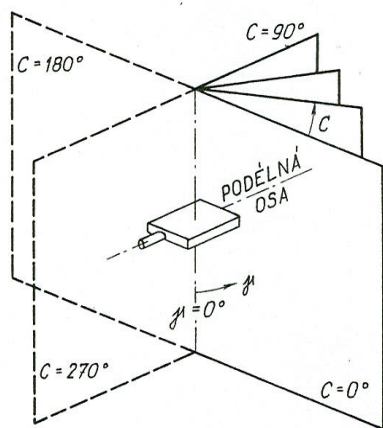
$f_I(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) svítivosti matematicky popisující uvažovanou křivku svítivosti; nejčastěji se k aproximaci využívá funkcí

$\cos^n \gamma$ (kde $n = 0, 1, 2, 3$ a 5); $\sin \gamma$;

$\sin \gamma \cdot \cos^m \gamma$ (kde $m = 1, 2, 3, 4$),

a zejména pak různých lineárních kombinací uvedených funkcí.

Čáry svítivosti se obvykle udávají v určitých rovinách vybraných z některého ze tří typů svazků různoběžných rovin, jejichž průsečnice (osa svazku) prochází světelným středem svítidla, resp. zdroje. Nejčastěji se užívá svazku rovin $C - \gamma$ (obr. 3-9), jehož osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla či zdroje.



Obr. 3-9

Nejčastěji používaná soustava fotometrických rovin C-γ

Aby křivky svítivosti svítidel udávané v katalogích byly nezávislé na skutečném světelném toku použitých zdrojů světla, přepočítávají se hodnoty svítivosti v diagramech na světelný tok zdroje 1000 ℓm . Skutečná svítivost I_γ svítidla se zdrojem, jehož tok je Φ , se pak určí vynásobením svítivosti I_γ přečtené z diagramu svítivosti pro 1000 ℓm poměrem $\Phi/1000$.

3.4 Osvětlenost

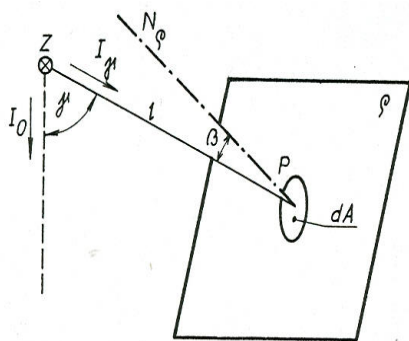
Osvětlenost (intenzita osvětlení) E rovinné plošky dA , tj. plošná hustota světelného toku $d\Phi$ dopadlého na plošku dA je určena vztahem

$$E = \frac{d\Phi_{\text{dopad}}}{dA} \quad (\ell x; \ell m, m^2) \quad (3-19)$$

Osvětlenost plošky dA se často nazývá i osvětleností v bodě, jehož elementární okolí v uvažované rovině tvoří ploška dA .

Jednotkou osvětlenosti je 1 lux (ℓx); 1 $\ell x = 1 \ell m \cdot m^{-2}$.

V literatuře je možno se ještě setkat s metrickou jednotkou phot (ph); 1 ph = $10^4 \ell x$ a dále s nemetrickou jednotkou footcandle (fc); 1 fc = $1 \ell m \cdot ft^{-2} = 10,764 \ell x$.



Obr.3-10

K výpočtu osvětlenosti $E_{P\rho}$ v bodě P roviny ρ zdrojem Z bodového typu

Osvětluje-li se bodovým zdrojem Z ze vzdálenosti ℓ ploška dA tvořící okolí bodu P v rovině ρ (viz obr.3-10) a svírá-li normála N_ρ roviny ρ úhel β s paprskem l , lze s využitím rovnic (3-19), (3-17) a (3-8) odvodit pro osvětlenost $E_{P\rho}$ v bodě P roviny ρ bodovým zdrojem výraz

$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \cos\beta \quad (\ell x; cd, m, -) \quad (3-20)$$

kde I_γ je svítivost bodového zdroje ve směru paprsku l , tj. ve směru pod úhlem γ od zvoleného směru vztahné svítivosti I_0 .

Z rovnice (3-22) vyplývá, že osvětlenost bodovým zdrojem je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti osvětlované plochy od zdroje (**zákon čtverce vzdálenosti**) a přímo úměrná kosinu úhlu β dopadu světelných paprsků (**Lambertův kosinusový zákon**). Největší je tedy osvětlenost plošky dA ve směru normály N_ρ (kdy $dA \perp l$ a úhel $\beta = 0$), tj. tzv. **normálová osvětlenost** E_N , pro kterou platí

$$E_{P\rho(\beta=0)} = E_N = \frac{I_\gamma}{l^2} \quad (\ell x; \ell x; cd, m) \quad (3-21)$$

Z uvedeného vyplývá, že osvětlenost je tedy nejen funkcí bodu, ale i orientovaného směru.

Příklad

Má-li bodový zdroj Z ve směru ke kontrolnímu bodu P, např. pod úhlem $\gamma = 20^\circ$ od zvoleného vztažného směru (I_0), svítivost $I_\gamma = 1000$ cd a leží-li bod P od zdroje Z ve vzdálenosti $l = 2$ m, pak zdroj Z v bodě P zajistí podle rovnice (3-23) normálovou osvětlenost

$$E_N = I_\gamma / l^2 = 1000 / 2^2 = 250 \text{ lx}.$$

Nejčastěji osvětlovanou rovinou je rovina vodorovná. Předpokládejme, že směr vztažné svítivosti I_0 je svislý. Vodorovná rovina ρ_0 je pak ke směru I_0 kolmá. Normála roviny ρ_0 v takovém případě svírá s paprskem l úhel $\beta = \gamma$. Vyjděme z předchozího příkladu ($I_\gamma = 1000$ cd,

$l = 2$ m) a uvažme, že okolí bodu P je umístěno právě ve zmíněné rovině ρ_0 , takže $\beta = \gamma = 20^\circ$ [$\cos\beta = 0,9397$]. Potom osvětlenost $E_{p\rho_0}$ v bodě P vodorovné roviny ρ_0 bude, v souladu s rovnicí (3-20), rovna

$$E_{p\rho_0} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos\beta = \frac{1000}{2^2} \cos(20^\circ) = 250 \cdot 0,9397 = 235 \text{ lx}.$$

Často nás zajímají i osvětlenosti na vertikálních rovinách, např. v místě obrazu zavěšeného na stěně. Natočme proto v obr.3-14 osvětlované okolí dA bodu P do polohy vertikální roviny $\rho_{v\perp}$, která je rovnoběžná se směrem I_0 a současně kolmá k rovině určené paprskem l a směrem I_0 . Normála osvětlované roviny $\rho_{v\perp}$ pak svírá s paprskem l úhel $\beta = 90 - \gamma$.

Navážeme-li na předcházející příklad ($I_\gamma = 1000$ cd, $l = 2$ m), bude

$$\beta = 90 - \gamma = 90 - 20 = 70^\circ \quad [\cos\beta = 0,342]$$

a osvětlenost $E_{p\rho_{v\perp}}$ v bodě P vertikální roviny $\rho_{v\perp}$ uvažovaným bodovým zdrojem Z se podle rovnice (3-20) spočítá ze vztahu

$$E_{p\rho_{v\perp}} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos\beta = \frac{1000}{2^2} \cos(70^\circ) = 250 \cdot 0,342 = 85,5 \text{ lx}.$$

Výsledky předchozích příkladů dokumentují skutečnost, že osvětlenosti vertikálních rovin jsou, při běžném umístění svítidel na stropě osvětlovaného prostoru, podstatně nižší než osvětlenosti v bodech vodorovné roviny.

K získání lepšího přehledu o rozložení hladiny osvětlenosti v bodech pracovní či srovnávací roviny je možno sít kontrolních bodů v uvažované rovině popsat zjištěnými hodnotami osvětlenosti, popřípadě ještě pospojovat body stejných osvětleností a nakreslit tedy čáry nazývané izoluxy. Sít izolux vytváří izoluxní plán. Někdy se využívá i prostorového znázornění rozložení osvětlenosti v axonometrickém zobrazení.

3.5 Jas svazku světelných paprsků

Veličinou, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán, je **jas svazku světelných paprsků**. Vymezí-li se svazek paprsků dvěma otvory dA_1 a dA_2 v libovolně umístěných stínítkách A_1 a A_2 (viz obr.3-11), je jas L_{OP} tohoto svazku ve směru osy OP (v nerozptylujícím a nepohlcujícím prostředí) roven prostorové a plošné hustotě světelného toku $d\Phi$ přenášeného uvažovaným svazkem paprsků

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \ell\text{m, sr, m}^2) \quad (3-22)$$

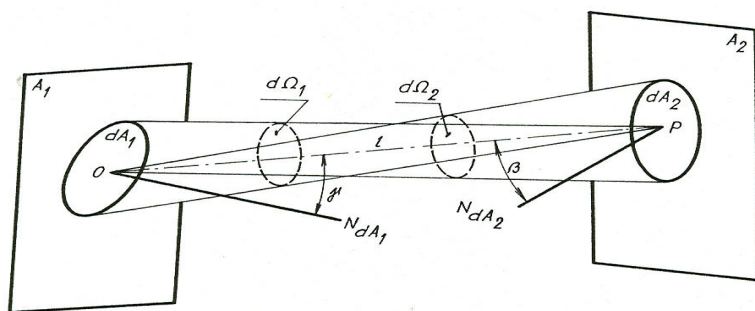
Předpokládá se, že rozměry otvorů dA_1 a dA_2 jsou zanedbatelné ve srovnání se vzdáleností l mezi stínítky A_1 a A_2 .

Při tom podle rovnice (3-8) platí, že prostorový úhel $d\Omega_1$, pod nímž je ze středu P otvoru dA_2 vidět otvor dA_1 je roven

$$d\Omega_1 = dA_1 \cdot \cos\gamma \cdot l^{-2} \quad (3-23)$$

a dále, že prostorový úhel $d\Omega_2$, pod nímž je ze středu O otvoru dA_1 vidět otvor dA_2 je roven

$$d\Omega_2 = dA_2 \cdot \cos\beta \cdot l^{-2} \quad (3-24)$$



Obr. 3-11

Vymezení svazku světelných paprsků obecně natočenými clonami A_1 a A_2 s elementárními otvory dA_1 a dA_2

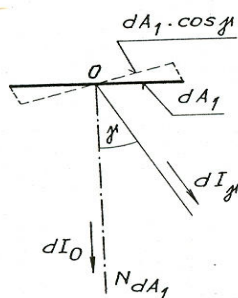
Pro jas L_{OP} svazku **paprsků sbíhajících** se v prostorovém úhlu $d\Omega_1$ z plošky dA_1 do bodu P vyplývá z rovnice (3-22 a (3-23) výraz

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 \cdot dA_2 \cdot \cos\beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \ell\text{m, sr, m}^2; \ell\text{x, sr}) \quad (3-25)$$

V rovnici (3-25) dE_N značí normálovou osvětlenost, tj. osvětlenost průmětu plošky dA_2 do roviny kolmé k paprsku l . Vztahu (3-25) se užívá k určení jasu zdroje ve směru oka pozorovatele nebo fotonky (vychází se z něho při objektivním měření jasu), popřípadě ke zjištění jasu nepřístupných zdrojů či zdrojů neurčitých rozměrů.

Pro jas $L_{OP} = L_\gamma$ svazku **paprsků rozbíhajících** se z bodu O v prostorovém úhlu $d\Omega_2$, plyne z rovnic (3-22) a (3-24) vztah

$$L_{OP} = L_\gamma = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 \cdot dA_1 \cdot \cos\gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cdot \cos\gamma} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \ell\text{m, m}^2, \text{sr}; \text{cd, m}^2) \quad (3-26)$$



Obr. 3-12

V prostředí, které pohlcuje, vyzařuje či rozptyluje světlo, se mění světelný tok přenášený svazkem světelných paprsků od bodu k bodu a úměrně se změnou světelného toku se mění i jas svazku paprsků.

Pouze v **homogenním, nepohlcujícím a nerozptylujícím prostředí** je jas svazku světelných paprsků na jeho dráze všude stejný, a tedy nezávislý na vzdálenosti od zdroje světla. V takovém případě lze pak připustit **zjednodušené nahrazení jasu svazku paprsků jasnem zdroje** (svítící plošky zdroje) v uvažovaném směru a využít druhé části rovnice (3-26) k určení jasu L_γ plošky dA_1 ve směru pod úhlem γ od normály N_{dA1} (viz obr.3-12).

Jednotkou jasu je 1 kandela na 1 m² (cd.m⁻²)

[v některých starších publikacích může čtenář nalézt tuto jednotku označenou názvem nit (nt)].

V zahraniční literatuře se lze setkat i s dalšími jednotkami, např. :

stilb (sb): 1 sb = 1 cd.cm⁻² = 10⁴ cd.m⁻² ;

apostilb (asb) : 1 asb = 1 ℓm.m⁻² = (1 / π) cd.m⁻² = 0,3183 cd.m⁻² ;

lambert (La) : 1 La = 1 ℓm.cm⁻² = (1 / π) sb = 3183 cd.m⁻² ;

footlambert (fL) : 1 fL = 3,426 cd.m⁻² ; 1 candle . foot⁻² = 1 cd.ft⁻² = 10,764 cd.m⁻² .

Jas svazku paprsků at' již vycházejících ze zdrojů nebo odrážených od různých ploch je závislý na stanovišti pozorovatele i na směru jeho pohledu. Z toho je zřejmé, že jas svazku paprsků je funkcí nejen bodu, ale též orientovaného směru.

Zjistí-li se hodnoty jasu svazku paprsků dopadajících z různých směrů do okolí určitého bodu prostoru a nanesou-li se tyto hodnoty na odpovídající směry od uvažovaného bodu jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů radiusvektorů **fotometrická plocha rozložení jasu**. Tato plocha jednoznačně charakterizuje rozložení toků v uvažovaném bodě prostoru, ale její určení je v obecném případě prakticky nezvládnutelné. Řezy fotometrickou plochou jasu provedené rovinami obsahujícími uvažovaný bod se nazývají **čáry (křivky) jasu** a kreslí se obvykle v polárních souřadnicích. Čáry jasu se matematicky popisují obecným vztahem

$$L_{\gamma} = L_o \cdot f_L(\gamma) \quad (\text{cd.m}^{-2}; \text{cd.m}^{-2}, -) \quad (3-27)$$

kde L_o je jas svazku paprsků dopadajících do okolí uvažovaného bodu ve směru, který se zvolil za vztažný směr,

L_{γ} je jas ve směru pod úhlem γ měřeným od vztažného směru,

$f_L(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) jasu, která matematicky popisuje tvar uvažované čáry jasu. K aproximaci čar jasu se využívá mocnin funkce kosinus, funkce sinus, jejich součinů a nejčastěji lineárních kombinací těchto funkcí.

Popisuje-li se rovnicí (3-27) čára jasu svítící plošky v nepohlcujícím a nerozptylujícím prostředí, pak L_o značí jas okolí uvažovaného bodu svítící plošky dA_1 (viz obr.3-12) ve vztažném směru, který se obvykle volí ve směru normály ke svítící ploše ve sledovaném bodě O a L_{γ} je jas zmíněné elementární části svítící plošky ve směru pod úhlem γ od vztažného směru.

Vyjádří-li se v rovnici (3-27) jas L_{γ} svítící plošky ve směru pod úhlem γ vztahem (3-26) a dosadí-li se v souladu s rovnicí (3-18) za svítivost výraz $dI_{\gamma} = dI_o \cdot f_I(\gamma)$, dostane se rovnice

$$L_{\gamma} = L_o \cdot f_L(\gamma) = \frac{dI_{\gamma}}{dA_1 \cdot \cos \gamma} = \frac{dI_o \cdot f_I(\gamma)}{dA_1 \cdot \cos \gamma} \quad (3-28)$$

Protože pro vztažný směr ($\gamma = 0$) platí $L_o = (dI_o) / dA$, vychází z předchozí rovnice

důležitý vztah mezi charakteristickými funkcemi (indikatrix) svítivosti $f_I(\gamma)$ a jasu $f_L(\gamma)$

$$f_I(\gamma) = f_L(\gamma) \cdot \cos \gamma \quad (3-29)$$

Příklad : Vykazuje-li svítící plocha o velikosti $A_1 = 0,6 \times 0,6 = 0,36 \text{ m}^2$ (např. vyzařovací plocha zářivkového svítidla 4 x 18 W s difúzním krytem) pod úhlem $\gamma = 60^\circ$ [$\cos \gamma = 0,5$] od normály svítivost $I_{\gamma} = 450 \text{ cd}$, pak je podle vztahu (3-29) jas L_{γ} této plochy ve zmíněném směru roven

$$L_{\gamma} = \frac{450}{0,36 \cdot 0,5} = 2500 \text{ cd.m}^{-2}$$

3.6 Světlení

Světlení je definováno jako plošná hustota světelného toku $d\Phi_v$ **vyzařovaného** z plošky dA , tj. výrazem

$$M = \frac{d\Phi_{vyzař}}{dA} \quad (\ell m.m^{-2}; \ell m, m^2) \quad (3-30)$$

Jednotkou světlení je $1 \ell m.m^{-2}$.

Příklad : Je-li vyzařovaný tok $\Phi_v = 3000 \ell m$ rovnoměrně rozložen po svíticí ploše $A = 0,36 m^2$, pak je v souladu s výrazem (3-30) průměrná hodnota světlení M této svíticí plochy $M = 3000 / 0,36 = 8330 \ell m.m^{-2}$.

3.7 Veličiny charakterizující světelné technické vlastnosti hmot

Optické vlastnosti materiálů jsou důležité zejména pro návrh a konstrukci světelně činných částí různých zařízení s ohledem na možnosti usměrnění světelného toku, jeho rozptylu a popřípadě omezení jasů v určitých směrech, a to při zachování co nejvyšší účinnosti. Odrážnost stropu a stěn mají podstatný vliv na kvantitativní, ale i na kvalitativní ukazatele vnitřního osvětlení i na hospodárnost osvětlovacího zařízení.

Světelný tok Φ dopadající na uvažovanou hmotu se v obecném případě dělí na tři části, a to na část Φ_p , která se odrazí, na část Φ_τ , která hmotou projde a na část Φ_α , kterou látka pohltí. Platí tedy

$$\Phi = \Phi_p + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad (\ell m; \ell m, \ell m, \ell m) \quad (3-31)$$

Světelné technické vlastnosti látek charakterizují tři integrální činitele odpovídající zmíněnému rozdělení světelného toku, a to : integrální činitel odrazu $\rho = \Phi_p / \Phi$, integrální činitel prostupu $\tau = \Phi_\tau / \Phi$ a integrální činitel pohlcení $\alpha = \Phi_\alpha / \Phi$.

Pro činitele ρ , τ , α vyplývá z rovnice (3-31), jejím vydělením tokem Φ , známá souvislost

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (3-32)$$

Pro neprůsvitné materiály pak platí $\rho + \alpha = 1$ a pro materiály pohlcující veškeré záření na ně dopadlé (černé těleso) $\alpha = 1$.

O prostředí, kterým se šíří světelné paprsky od svítidel na osvětlované plochy, se při praktických výpočtech obvykle předpokládá, že je nepohlcující ($\tau = 1$) a nerozptylující. Tento předpoklad je většinou splněn jak ve vnitřních, tak i ve venkovních prostorech. Činitele odrazu, prostupu a pohlcení nezávisí pouze na vlastnostech látky samotné, ale i na vlnové délce dopadajícího záření. Proto se kromě integrálních hodnot zmíněných činitelů definují i jejich spektrální hodnoty $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$.

Dopadá-li na sledovanou látku složený zářivý tok $\Phi_e(\lambda)$, pak pro integrální činitel odrazu ρ látky obecně platí výraz

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3-33)$$

Ve jmenovateli rovnice (3-33) je známý výraz pro světelný tok Φ odpovídající zářivému toku $\Phi_e(\lambda)$. Pro integrální činitele τ a α platí obdobné vztahy. Orientační hodnoty integrálních činitelů ρ , τ , α některých látek jsou v tab.3-2. Pro informaci jsou ještě v tab.3-3 uvedeny přibližné hodnoty činitelů odrazu některých povrchů a materiálů.

Poznámka:

U filtrů se místo činitele prostupu užívá pojmu **optická hustota** D , která je definována vztahem

$$D = -\log_{10} \tau = \log_{10} (1/\tau).$$

Z výrazu plyne, že pro $\tau = 0,01$ je $D = 2$, pro $\tau = 0,1$ pak $D = 1$ a když $\tau = 1$, je $D = 0$ atd.

Tab. 3-2 Přibližné hodnoty činitelů ρ , τ , α některých materiálů

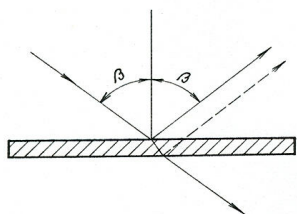
materiál	činitel (%)		
	odrazu ρ	prostupu τ	pohlčení α
sklo čiré (tloušťka 2 až 4 mm)	6 - 8	90 - 92	2 - 4
sklo matované leptané (tl. 2 až 3 mm)	6 - 11	75 - 91	3 - 19
sklo opálové bílé (tl. 2 až 3 mm)	29 - 52	36 - 66	3 - 10
sklo opalizované (tl. 2 až 3 mm)	13 - 28	59 - 84	3 - 13
mramor bílý lesklý (tl. 7,3 až 10 mm)	30 - 71	3 - 8	24 - 65
hedvábí bílé	28 - 38	61 - 71	asi 1
silon bílý	asi 55	asi 17	asi 28
silon šedý průhledný	asi 8	asi 79	asi 13

Tab. 3-3 Orientační hodnoty činitele odrazu ρ některých látek

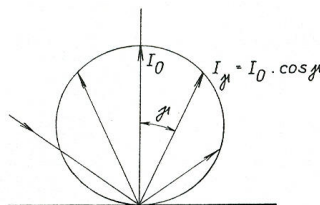
materiál, povrch		ρ (%)
hliník	plátovaný	75 - 90
	leštěný	60 - 72
	matný	55 - 60
stříbro	leštěné	85 – 94
platina	leštěná	62
zlato	leštěné	70
nikl	leštěný	53 – 63
chrom	leštěný	60 – 70
ocel	nerez leštěná	55 – 60
smalt	bílý	85 – 90
žula		asi 44
cihly	žluté	asi 35
cihly	červené	asi 25
sádra		asi 80
malta	velmi jemná	asi 50
omítky	ušlechtilé, jasné	asi 40
malta	tmavá	asi 25
papír	bílý	asi 80
	středně modrý	60 - 70
	světle žlutý	35 - 45
	světle zelený	
	namodralý světlý	

materiál, povrch			ρ (%)
dřevo	javorové	surové, přírodně voskované	40 - 50
	dubové		30 - 49
	ořechové		10 - 20
	mahagonové		15 – 20
	mořené tmavé		10 - 30
malba (zeď)	bílá		76 – 88
	žlutá	světlá	66 – 80
		tmavá	47 – 67
	hnědá	světlá	30 – 48
		tmavá	14 – 31
	červená	světlá	39 – 63
		tmavá	17 – 39
	zelená	světlá	36 – 69
		tmavá	11 – 35
	modrá	světlá	24 – 56
		tmavá	5 – 25
	růžová		35 - 61
	šedá	světlá	35 – 67
		tmavá	15 – 35
	černá		2 - 4

Povrchy různých látek se ještě dále rozlišují podle rozložení odraženého světelného toku do různých směrů v prostoru. Nejjednodušší případ odrazu nastane, když se světelný paprsek odrazí od povrchu pod stejným úhlem, pod kterým na uvažovaný povrch dopadl (viz obr.3-13). Tento případ odrazu se nazývá **zrcadlový odraz**.



Obr. 3 – 13
Znázornění zrcadlového odrazu
a přímého prostupu



Obr. 3 – 14
Řez fotometrickou plochou svítivosti
při difúzním odrazu

Ideální zrcadlový povrch vykazuje jas jen ve směru odraženého světelného paprsku. V praxi lze poměrně dokonalého zrcadlového odrazu dosáhnout jen na velmi přesně a dokonale vyleštěných kovových plochách. Výroba takových zrcadel či reflektorů je velmi náročná a drahá.

V případě, že se paprsek světla dopadlý na element povrchu po odrazu rozdělí do celého poloprostoru tak, že **jas elementu uvažované plochy je ve všech směrech stejný**, dochází k **rovnoměrně rozptýlnému** (difúznímu) **odrazu** (viz obr.3 - 14). Jas dokonale rozptýlně odrážející plochy nezávisí na úhlu dopadu světelných paprsků. V praxi se ideálním difúzním plochám svými odraznými vlastnostmi často přibližují např. běžně matně vymalované stěny interiérů.

Vlastnosti rovnoměrně rozptýlně odrážejících ploch :

- 1) Základní vlastností difúzně odrážejícího povrchu je, že jeho **jas je konstantní** do všech směrů, tj. $L = \text{konst.}$ a charakteristická funkce jasu $f_L(\gamma) = 1$.
- 2) Z druhé části rovnice (3 - 27) pro jas svítící plošky vyplývá, že **svítivost** elementu ideálního rozptylovače je maximální v kolmém směru a svítivost tohoto elementu v každém jiném směru se určí z Lambertova **kosinusového zákona**. Proto je **fotometrická plocha svítivosti** elementu rovnoměrné rozptýlné plochy **plochou kulovou** (viz obr.3 - 14) a indikatrix svítivosti je **$f_L(\gamma) = \cos \gamma$** .

- 3) Mezi světlením M difúzního povrchu a jeho konstantním jasnem L platí důležitá souvislost
$$M = \pi \cdot L \quad (\ell\text{m.m}^{-2}; -, \text{cd.m}^{-2}) \quad (3-34)$$
- 4) Uvědomíme-li si, že mezi osvětleností E a světlením M sledované odrážející plochy, charakterizované činitelem odrazu ρ , platí obdobný vztah jako mezi dopadlým a odraženým světelným tokem, tj. $M = \rho E$, pak z rovnice (3-34) vyplývá pro difúzně odrážející povrch významná souvislost mezi osvětleností E a jasnem L tohoto povrchu

$$M = \rho \cdot E = \pi \cdot L \quad (\ell\text{m.m}^{-2}; -, \ell\text{x}, -, \text{cd.m}^{-2}) \quad (3-35)$$

Uvedený vztah umožňuje například při známé osvětlenosti a činiteli odrazu stanovit jas difúzně odrážejícího povrchu nebo naopak vypočítat z předem zjištěných hodnot E a L činitele odrazu ρ .

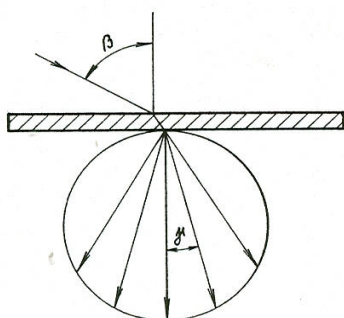
S ohledem na uvedené vlastnosti se dokonale rozptýlně svítící plochy často označují názvem **Lambertovy zářiče**.

Prakticky ovšem neexistují ani ideální zrcadla ani ideální rozptylovače. Zrcadla určená pro osvětlovací účely v různém stupni také poněkud světlo rozptylují a naopak matné, mdlé či drsné

povrchy používané k rozptýlení světla vykazují určitý zrcadlový účinek ve směru dokonalého odrazu. U většiny povrchů vzniká tedy smíšený odraz. Činitel smíšeného odrazu lze vyjádřit součtem činitele zrcadlového odrazu a činitele difúzního odrazu.

Při světelně technických výpočtech se v co největší míře využívá vlastností ideálně rozptylné plochy, neboť se tím výpočty podstatně zjednodušují. Pokud se tedy vlastnosti skutečných svítících ploch blíží vlastnostem rovnoměrného rozptylovače, považují se tyto za Lambertovy zářiče. Počítá se tak například se svítícími stropy, transparenty, se svítidly s opálovým sklem apod. Výhod ideálního rozptylovače se využívá i při výpočtech průměrných jasů matných osvětlovaných ploch, pokud ovšem nevykazují viditelné zrcadlově odlesky.

Také světelný tok prošlý vrstvou látky může do prostoru vycházet různým způsobem. U některých látek čirých nebo dokonale průhledných, např. optická skla, tenké vrstvy vody apod. dochází k přímému prostupu světla, kdy při šikmém dopadu vychází paprsek z uvažované látky v původním směru pouze rovnoběžně posunut (viz obr. 3 - 13). Přitom může podle dalších vlastností uvažované látky docházet i k částečným odrazům.



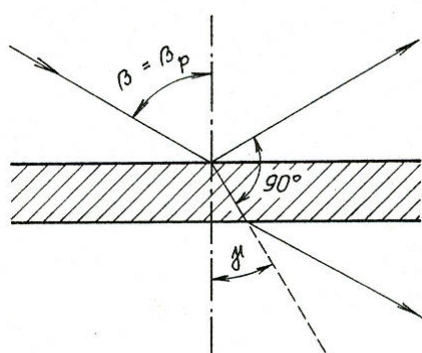
Mnohé látky však světelné paprsky jimi prošlé částečně nebo úplně rozptylují. Způsob rozptylu vycházejícího světelného toku se podobně jako u odrazu znázorňuje fotometrickou plochou či křivkami svítivosti.

Při dokonalém rovnoměrně rozptylném prostupu světelných paprsků je tedy fotometrická plocha svítivosti opět plochou kulovou (viz obr. 3-15) a světelně technické vlastnosti druhé strany této průsvitné látky jsou pak stejné jako vlastnosti povrchu vykazujícího rovnoměrně rozptylný odraz.

Obr. 3 -15

Náčrt kosinusového rozložení svítivosti při dokonalém rovnoměrně rozptylném prostupu světelných paprsků

U většiny látek však dochází k tzv. smíšenému prostupu, tj. v různé míře se u nich projevuje přímý i rozptylný průstup. Činitel smíšeného prostupu je roven součtu činitelů přímého a rozptylného prostupu.



Obr. 3 – 16

Při odrazu světla na povrchu průhledných látek, např. skla, může dojít k polarizaci světla. Při průchodu světla sklem (viz obr.3-16) dochází jak k lomu paprsků, tak také k částečnému odrazu.

Platí-li $\beta + \gamma = 90^\circ$, dochází k polarizaci světla odrazem.

Z výrazu pro index lomu

$$n = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma}$$

vyplývá, že k polarizaci odrazem dojde, platí-li pro úhel dopadu $\beta = \beta_p$ vztah

$$n = \frac{\sin \beta_p}{\sin(90^\circ - \beta_p)} = \operatorname{tg} \beta_p$$

Protože index lomu se pro tutéž látku liší pro záření různých vlnových délek, je i úhel β_p různý pro tato jednotlivá záření. Proto bílé (nepestré) světlo nemůže být nikdy dokonale polarizované.

V praxi se často využívá tzv. zpětného (vratného) odrazu, což je zvláštní odraz, při němž se světlo (v poměrně velkém rozsahu úhlu dopadu) odráží přibližně ve stejném směru, v němž dopadlo. Takových povrchů se užívá pro signalizaci v dopravě (např. odrazky). Podobných povrchů (pokrytých např. jemnými skleněnými perličkami), které dopadlý svazek rovnoběžných paprsků odrážejí ve stejném směru zpět, popřípadě je mírně (lomem a odrazem) rozptylují, se užívá jako projekčních (perličkových) pláten.

Na rozhraní mezi opticky hustším (1) a řidším (2) prostředím (např. sklo - 1 a vzduch - 2) nastává lom paprsků jen tehdy, je-li úhel β_1 dopadu paprsků menší než tzv. mezní úhel β_m , pro který platí

$$\sin \beta_m = n_{21} = \frac{1}{n_{12}} = \frac{N_2}{N_1}$$

kde n_{21} je relativní index lomu prostředí 2 vzhledem k prostředí 1 ;

N_1, N_2 jsou absolutní indexy lomu ; pro vzduch $N_2 \approx 1$.

Je-li úhel dopadu větší než mezní, neprochází z hustšího do řidšího prostředí žádné světlo a dochází k úplnému odrazu. Takový odraz světla na hraničních plochách sklo-vzduch je předpokladem funkce světlovodu.

Světlovody mají obvykle tvar trubice s leštěným povrchem. Světlo vstupující do světlovodu ze zdroje dopadá na stěnu světlovodu většinou pod tak velkým úhlem, že dochází k úplnému odrazu. Světlo se ve světlovodu postupně odráží, až se dostane k výstupní ploše, na kterou dopadá pod úhlem menším než je mezní úhel, a proto vychází ze světlovodu ven.

3.8 Charakteristiky prostorových vlastností osvětlení

Prostorové vlastnosti osvětlení, tj. subjektivní dojem o dostatečnosti prosvětlení prostoru, směrovost osvětlení a schopnost osvětlení tvořit stíny (stínivost osvětlení) se popisují s využitím veličin, které umožňují zmíněné vlastnosti osvětlení v daném bodě pole vystihnout souhrnně jedinou hodnotou. Proto se tyto veličiny nazývají integrální charakteristiky světelného pole. S jejich využitím se podstatně rozšiřují možnosti objektivního hodnocení kvality osvětlovacích soustav, a to jak z hlediska objektivního vystižení dojmu o dostatečnosti prosvětlení prostoru, tak i pokud jde o charakteristiku úrovně vjemu trojrozměrných předmětů.

3.8.1 Světelné pole

Část prostoru, v níž se odehrává určitý fyzikální děj, se všeobecně označuje názvem fyzikální pole. Podle toho, zda se probíhající děj charakterizuje skalárem nebo vektorem, hovoří se o skalárním nebo vektorovém poli. *Světelným polem* se nazývá část prostoru, ve které probíhá přenos světelné energie. Světelné pole je tedy všude, kde lze výpočtem či měřením prokázat existenci světla stanovením hodnoty zvolené světelné technické veličiny.

V teorii elektromagnetického pole se k hodnocení přenosu energie používá *Poyntingův vektor*. Velikost Poyntingova vektoru udává energii, která projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr přenosu energie. Orientovaný směr Poyntingova vektoru je shodný s orientovaným směrem šíření elektromagnetického vlnění.

Ve světelném poli se nesledují elektrické a magnetické síly, ale zkoumá se v konečných časových intervalech rozdělení toků energie. Ve shodě s klasickými fotometrickými metodami se při výpočtech ve světelném poli ponechává stranou otázka podstaty světelného záření, přetržitosti záření a počítá se s plynulou změnou světelných toků mezi sledovanými body pole.

3.8.2 Světelný vektor

Poyntingův vektor se v podmínkách světelného pole nahrazuje vektorem hustoty světelného toku, který se nazývá *světelný vektor*. Světelný vektor určuje v libovolném bodě pole, nezávisle na volbě souřadnic, měrný výkon přenosu světelné energie. Jeho velikost je určena energií, která projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr šíření záření a je tedy rovna rozdílu normálových osvětleností jedné a druhé strany plochy umístěné v daném bodě kolmo ke směru šíření záření. Orientovaný směr světelného vektoru je určen směrem přenosu světelné energie v uvažovaném bodě pole.

Světelný vektor $\vec{E}_1$ v bodě P v poli jediného elementárního, tedy bodového zdroje Z

(viz obr. 3.17) se co do velikosti rovná plošné hustotě světelného toku $d\Phi$ dopadlého na myšlenou plošku dA_N (kolmou k l), tzn. normálové osvětlenosti E_N v bodě P

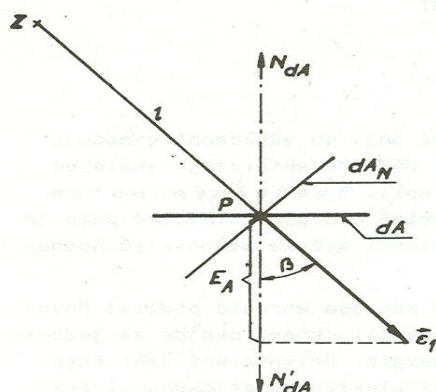
$$|\vec{E}_1| = \epsilon_1 = \frac{d\Phi}{dA_N} = E_N \quad (lx; lm, m^2; lx) \quad (3.36)$$

Směr $\vec{E}_1$ je v tomto případě shodný se směrem paprsku l a orientovaný je od zdroje Z ke kontrolnímu bodu P.

Umístí-li se do bodu P v poli bodového zdroje Z ploška dA , jejíž normála N_{dA} svírá s vektorem $\vec{E}_1$ úhel β , pak tok $d\Phi$ světelného vektoru $\vec{E}_1$ ploškou dA se určí ze vztahu

$$d\Phi = \vec{E}_1 \cdot d\vec{A} = \epsilon_1 \cdot dA \cdot \cos\beta = E_N \cdot dA \cdot \cos\beta$$

(lm; lx, m², -) (3.37)



Obr. 3.17

Osvětlenost E_P v bodě P plošky dA bodovým zdrojem Z je rovna průmětu světelného vektoru $\vec{E}_1$ do normály N'_{dA} k neosvětlené straně plošky dA

Z rovnice (3.37) plyne, že průmět světelného vektoru $\vec{E}_1$ do směru normály N'_{dA} se rovná osvětlenosti E_P plošky dA v bodě P, či osvětlenosti v bodě P ve směru normály N'_{dA}

$$\epsilon_1 \cdot \cos\beta = E_N \cdot \cos\beta = \frac{d\Phi}{dA} = E_P \quad (lx; lx; lm, m^2; lx) \quad (3.38)$$

Světelný vektor v poli několika světelných zdrojů je v každém bodě dán vektorovým součtem dílčích světelných vektorů charakterizujících pole jednotlivých zdrojů v uvažovaném bodě.

Osvětlují-li všechny zdroje pouze jednu stranu určitého povrchu v daném bodě pole, je průmět světelného vektoru v tomto bodě do normály k uvažovanému povrchu roven přímo hodnotě osvětlenosti zmíněného povrchu v okolí sledovaného bodu.

3.8.3 Střední kulová osvětlenost

Při subjektivním posuzování, zda je ten který prostor celkově dostatečně osvětlen (či prosvětlen, popř. "nasycen světlem"), nestačí hodnotit pouze osvětlenost některých, např. vodorovných, rovin. K tomu účelu se využívá veličin světelného pole, které udávají střední hodnoty osvětlenosti povrchů některých ploch zanedbatelných rozměrů (například plochy kulové, pláště válcové plochy apod.), umístěných jako přijímače záření do uvažovaného bodu pole. Tyto plochy vlastně nahrazují všechny možné předměty, které se mohou v daném bodě prostoru ve skutečnosti vyskytovat. Podle tvaru přijímače se pak jednotlivé veličiny nazývají: *střední kulová osvětlenost*, *střední válcová osvětlenost* atd. Uvedené veličiny patří do souboru skalárních integrálních charakteristik světelného pole.

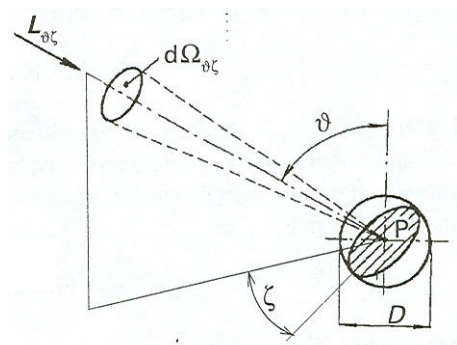
Ze skalárních integrálních charakteristik světelného pole se nejčastěji užívá *střední kulová* (sférická) *osvětlenost* ($E_{4\pi}$), která je určena střední hodnotou osvětlenosti povrchu přijímače ve tvaru koule se středem v daném bodě (obr. 3.18), jejíž průměr D je zanedbatelný v porovnání se vzdáleností uvažovaných zdrojů od kontrolního bodu P pole.

Jde o skalární veličinu rovnou jedné čtvrtině součtu všech normálových osvětleností v daném bodě

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n E_{Ni} \quad (lx; lx) \quad (3-36)$$

Obecně se střední kulová osvětlenost $E_{4\pi}$ definuje vztahem

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} dE_N = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} \quad (\text{lx; cd.m}^{-2}, \text{ sr}) \quad (3.39)$$



Obr. 3.18

K řešení střední hodnoty osvětlenosti povrchu modelového přijímače ve tvaru koule

Hodnota střední kulové osvětlenosti není závislá na směru dopadu světelných paprsků na kulový přijímač, takže není funkcí orientovaného směru, ale je pouze funkcí bodu světelného pole.

Příklad:

Je-li svítivost $I_{\vartheta\zeta}$ **jediného** rotačně souměrně vyzařujícího svítidla Z bodového typu ve směru k bodu P [určeném úhly ϑ, ζ (obr. 3.18)] rovna $I_{\vartheta\zeta} = 1000 \text{ cd}$, pak je v kontrolním bodě P umístěném v uvažovaném směru ve vzdálenosti $l = 2 \text{ m}$ velikost světelného vektoru rovna normálové osvětlenosti

$$\epsilon = E_N = I_{\vartheta\zeta} / l^2 = 1000 / 2^2 = 250 \text{ lx}$$

a střední kulová osvětlenost $E_{4\pi}$ se stanoví jako čtvrtina normálové osvětlenosti E_N ze vztahu

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} E_N = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_{\vartheta\zeta}}{l^2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1000}{2^2} = 62,5 \text{ lx}$$

Podobně jako se z fotometrické plochy svítivosti určí světelný tok zdroje, stanoví se z fotometrické plochy jasu *prostorová osvětlenost* E_o . Tuto veličinu zavedl Arndt. Prostorová osvětlenost E_o je skalární veličinou světelného pole definovaná jako algebraický součet všech normálových osvětleností dE_N v uvažovaném bodě pole, tedy výrazem

$$E_o = \int_0^{4\pi} dE_N = \int_0^{4\pi} L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} \quad (\text{lx; cd.m}^{-2}, \text{ sr}) \quad (3.40)$$

Při řešení rovnice (3.39), resp. (3.40) se elementární ploška v uvažovaném bodě pole postupně umísťuje do všech možných poloh tak, že její normála je vždy shodná s osou prostorového úhlu $d\Omega_{\vartheta\zeta}$, v jehož mezích dopadá na plošku svazek paprsků charakterizovaný jasem $L_{\vartheta\zeta}$.

Z porovnání definičních vztahů (3.40) pro střední prostorovou osvětlenost E_o a (3.39) pro střední kulovou osvětlenost $E_{4\pi}$ vyplývá, že obě veličiny jsou v podstatě shodné až na konstantu, takže platí

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} E_o \quad (\text{lx; lx}) \quad (3.41)$$

Velichiny E_o a $E_{4\pi}$ jsou úměrné střednímu sférickému jasu $L_{4\pi}$, tj. střednímu jasu obklopujícímu uvažovaný bod, což vyjadřuje vztah

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} E_o = \pi \cdot L_{4\pi} \quad (lx; lx; cd.m^{-2}) \quad (3.42)$$

Již Geršun ukázal, že střední kulová osvětlenost a tedy i prostorová osvětlenost jsou veličiny úměrné množství světelné energie v jednotkovém objemu v okolí uvažovaného bodu, tzn., že jsou úměrné objemové hustotě energie w v daném bodě pole

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} E_o = c \cdot w \quad (lx; lx; m.s^{-1}, lm.s.m^{-3}) \quad (3.43)$$

kde c je rychlost šíření světla ($m.s^{-1}$).

Uvedené veličiny mohou proto ve sledovaném bodě pole charakterizovat celkovou dostatečnost osvětlení prostoru.

Hodnotami střední kulové osvětlenosti je vhodné vystihovat subjektivní dojem o celkové dostatečnosti osvětlení v prostorech, ve kterých rozlišované předměty mají složitý prostorový tvar, kde ploché předměty nemají pevnou orientaci a kde se předměty pozorují z nejrůznějších směrů. Střední kulová (popř. prostorová) osvětlenost se využívá v mnoha zemích. Zavedena byla i do dřívější, nyní již novými evropskými předpisy nahrazené, normy ČSN 360450 pro osvětlování vnitřních prostorů. V současnosti platí doporučení shrnutá v normě ČSN EN 12464-1 „Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – část 1 : Vnitřní pracovní prostory“, v níž střední kulová osvětlenost do ukazatelů jakosti osvětlení interiérů není zahrnuta.

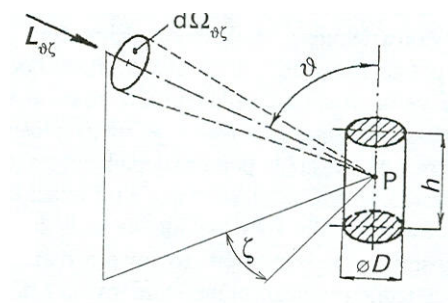
3.8.4 Střední válcová osvětlenost

Výsledky řady experimentů potvrdily, že celkový dojem o dostatečnosti osvětlení ve veřejných a společenských prostorech, v nichž převažují směry pozorování blízké k vodorovnému, dobře vystihuje *střední válcová* (cylindrická) *osvětlenost*, která je rovna střední hodnotě osvětlenosti pláště elementárního válečku svisle umístěného v uvažovaném bodě pole, tj. střední hodnotě osvětlenosti všech vertikálních rovin v daném bodě. Má-li tedy v daném prostoru na zrakový vjem pozorovatele rozhodující vliv výše a rozložení jasů, popřípadě osvětleností na svislých plochách, lze skutečný přijímač záření nahradit modelovým přijímačem ve tvaru válečku se svislou osou s neprůsvitnými podstavami a s rozměry (průměr D podstavy, výška h - viz obr. 3.24) zanedbatelnými ve srovnání se vzdáleností uvažovaných zdrojů od kontrolního bodu P. Celková dostatečnost osvětlení takového prostoru hodnocená v určitém místě, do kterého se umístí modelový přijímač, se pak posuzuje podle střední hodnoty osvětlenosti povrchu pláště zmíněného válečku, tzn. podle střední válcové (cylindrické) osvětlenosti E_Z , která je rovna střední hodnotě osvětlenosti všech svislých rovin v uvažovaném bodě světelného pole.

Pro střední válcovou osvětlenost lze odvodit integrální rovnici ve tvaru

$$E_Z = \frac{1}{\pi} \int_0^{4\pi} \sin \vartheta \cdot L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} = \frac{1}{\pi} \int_0^{4\pi} \sin \vartheta \cdot dE_N \quad (lx; -, lx) \quad (3.44)$$

Střední válcová osvětlenost E_Z závisí na směru dopadu paprsků na válcový přijímač, resp. na zvolené orientaci osy válečku, je proto skalární funkcí nejen bodu, ale i orientovaného směru.



Obr. 3.19
K definici střední válcové osvětlenosti

Příklad:

Určeme střední válcovou osvětlenost E_Z , kterou v kontrolním bodě P ve vzdálenosti $l = 2$ m zajistí svítidlo Z bodového typu, je-li ve směru k bodu P [určeném úhly $\vartheta = 60^\circ$, $\zeta = 0^\circ$ (obr. 3.19)] jeho svítivost $I_{\vartheta\zeta} = 1000$ cd. Z rovnice (3.44) vyplývá, že střední válcová osvětlenost E_Z v bodě P v poli jediného svítidla bodového typu je rovna

$$E_Z = \frac{1}{\pi} \sin\vartheta E_N \quad (lx; -, lx) \quad (3.45)$$

kde E_N je normálová osvětlenost v bodě P, která se určí z rovnice

$$E_N = \frac{I_{\vartheta\zeta}}{l^2} = \frac{1000}{4} = 250 \text{ lx},$$

Po dosazení do rovnice (3.45) vychází pro hledanou střední válcovou osvětlenost E_Z vztah

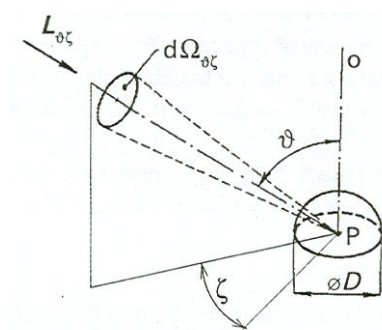
$$E_Z = \frac{1}{\pi} \sin\vartheta E_N = \frac{1}{\pi} \cdot 0,866 \cdot 250 \doteq 69 \text{ lx}$$

Střední válcová osvětlenost se využívá ve světelně technické praxi mnoha zemí. V některých státech je tato veličina zahrnuta i do světelně technických předpisů. V doporučeních přijatých státy EU je E_Z jedním z ukazatelů jakosti osvětlení pěších zón a veřejných prostranství. Např. v Rusku je však zahrnuta i do norem umělého osvětlení veřejných a společenských prostorů.

3.8.5 Střední polokulová osvětlenost

V případech, kdy se zkoumají podmínky osvětlení trojrozměrných detailů rozmístěných na velké ploše a kdy pro zrakové vnímání není rozhodující osvětlení částí předmětů odvrácených od pozorovatelů, se doporučuje pro hodnocení prostorových vlastností osvětlení využívat *střední polokulovou* (semisférickou) osvětlenost. Jde o skalární integrální charakteristiku světelného pole, která je rovna střední hodnotě osvětlenosti povrchu elementární půlkoule umístěné do sledovaného bodu pole. Rozměry modelového přijímače jsou, stejně jako v předchozích případech, zanedbatelné v porovnání se vzdáleností kontrolního bodu P od jednotlivých zdrojů.

Uvažme, že na zmíněný polokulový přijímač dopadá ve směru určeném úhly ϑ , ζ v mezích prostorového úhlu $d\Omega_{\vartheta\zeta}$ svazek paprsků charakterizovaný jasnem $L_{\vartheta\zeta}$ a že osa o půlkoule svírá s osou prostorového úhlu $d\Omega_{\vartheta\zeta}$ úhel ϑ (podle obr. 3.20).



Za předpokladu, že osa o přijímače je umístěna do směru $\vartheta = 0$ (obr.3.20), platí [A.35] pro střední polokulovou osvětlenost E_{hs} (ve starší literatuře se veličina označovala $E_{2\pi}$) vztah

$$E_{hs} = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} (1 + \cos\vartheta) \cdot L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} \quad (lx; -, \text{cd.m}^{-2}, \text{sr}) \quad (3.46)$$

Obr. 3.20

Střední polokulová osvětlenost je závislá na orientaci osy o přijímací plochy ve tvaru povrchu půlkoule

Střední polokulová osvětlenost závisí na směru dopadu paprsků na polokulový přijímač, resp. na zvolené orientaci jeho osy a je proto skalární funkcí nejen bodu, ale i orientovaného směru. Obvykle se základna polokulového přijímače umísťuje do vodorovné roviny. Výjimečně se uvažuje polokoule s vrcholem obráceným k pozorovateli.

Příklad:

Určeme střední polokulovou osvětlenost E_{hs} , kterou v kontrolním bodě P ve vzdálenosti $l = 2$ m zajistí svítidlo Z bodového typu, je-li ve směru k bodu P [určeném úhly $\vartheta = 60^\circ$, $\zeta = 0^\circ$ (obr. 3.20)] jeho svítivost $I_{\vartheta\zeta} = 1000$ cd. Ze vztahu (3.46) pro hledanou střední polokulovou osvětlenost E_{hs} vyplývá vztah

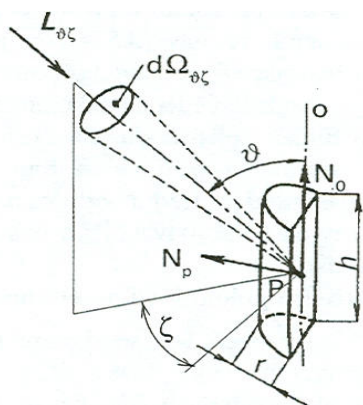
$$E_{hs} = \frac{1}{4} (1 + \cos \vartheta) E_N = \frac{1}{4} (1 + \cos \vartheta) \frac{I_{\vartheta\zeta}}{l^2} = \frac{1}{4} \cdot (1 + 0,5) \cdot \frac{1000}{2^2} = 93,8 \text{ lx}$$

3.8.6 Střední poloválcová osvětlenost

Ve společenských i v pracovních prostorech, ale například také na pěších zónách ve městech se setkáváme se situacemi, kdy při hodnocení kvality vjemu trojrozměrných předmětů je zapotřebí přesněji vymezit směry osvětlování, resp. pozorování rozlišovaných detailů. V takových případech nepostačuje pracovat se střední válcovou nebo polokulovou osvětleností a doporučuje se využít *střední poloválcové* (hemicylindrické) *osvětlenosti* E_{sz} . Tato skalární integrální charakteristika je rovna střední hodnotě osvětlenosti povrchu jedné poloviny pláště válcové plochy, jejíž rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností kontrolního místa od uvažovaných zdrojů světla resp. svítidel. Je pochopitelné, že střední poloválcová osvětlenost je současně rovna střední hodnotě osvětleností všech svislých rovin v poloprostoru přilehlém k půlválci modelového přijímače, neboť jsou to tečné roviny k plášti poloválcového přijímače.

Orientace modelového přijímače (viz obr.3.26) je určena polohou dvou vektorů, a to vektoru $\vec{N}_0$ umístěném ve směru podélné osy o přijímací plochy pláště půlválce a vektoru $\vec{N}_p$ normály k obdélníkové základně přijímače ve směru k povrchu půlválce.

Na městských pěších zónách a ve společenských prostorech se uvažuje, že osa o přijímače je svislá. V pracovních prostorech však může být někdy výhodné uvažovat i jiné umístění poloválcového přijímače, např. vodorovné, či podle pracovní plochy nakloněné.



Obr. 3.21

K definici střední poloválcové osvětlenosti

Umístíme-li do kontrolního bodu P modelový poloválcový přijímač podle obr.3.21 tak, že vektor $\vec{N}_0$ bude orientován ve směru $\vartheta = 0$ a vektor $\vec{N}_p$ ve směru $\zeta = 0$, platí pro poloválcovou osvětlenost E_{sz} vztah

$$E_{sz} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin \vartheta (1 + \cos \zeta) \cdot L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} \quad (\text{lx; -, -, cd.m}^{-2}, \text{ sr}) \quad (3.47)$$

S ohledem na orientaci pláště půlválce ovlivní hodnotu E_{sz} pouze zdroje (svítidla) osvětlující vnější přijímací plochu pláště půlválce.

Střední poloválcová osvětlenost E_{sz} závisí na zvolené orientaci jak podélné osy o modelového půlválce, tak i normály N_p k obdélníkové základně přijímače a proto je tato skalární funkce nejen bodu, ale i dvou orientovaných směrů.

Příklad:

Určeme střední poloválcovou osvětlenost E_{sz} , kterou v kontrolním bodě P ve vzdálenosti $l = 2$ m zajistí svítidlo Z bodového typu, je-li ve směru k bodu P [tj. ve směru určeném úhly ϑ , ζ (viz obr. 3.21)] jeho svítivost $I_{\vartheta\zeta} = 1000$ cd. Při tom předpokládejme, že spojnice $\overline{ZP}$ bodů Z a P leží ve svislé rovině kolmé k základně pláště modelového půlválce, kdy je úhel $\zeta = 90^\circ$ a dále, že zmíněná spojnice $\overline{ZP}$ svírá se svislou osou o půlválce úhel $\vartheta = 60^\circ$.

Uvážíme-li, že ve výrazu (3.47) je součin jasu a prostorového úhlu roven normálové osvětlenosti $E_N = I_{\vartheta\zeta} / l^2 = 1000 / 2^2 = 250$ lx, pak se na podkladě uvedené rovnice hledaná střední poloválcová osvětlenost E_{sz} vypočítá ze vztahu

$$E_{sz} = \frac{1}{\pi} \sin\vartheta \cdot (1 + \cos\zeta) \cdot E_N = \frac{1}{\pi} 0,866 \cdot (1 + 0) \cdot 250 \doteq 68,9 \text{ lx}.$$

3.8.7 Činitel podání tvaru

Kvalita vjemu trojrozměrných předmětů je podmíněna směrovostí a stínivostí osvětlení, tzn. zejména schopností osvětlení vytvářet na trojrozměrných předmětech stíny. Stupeň stínivosti se dříve oceňoval poměrem přímé složky osvětlenosti k její celkové hladině. Obvykle se požadovalo, aby zmíněný poměr byl v mezích 0,2 až 0,8.

S využitím veličin světelného pole, tj. s využitím integrálních charakteristik, se stupeň stínivosti a tudíž i kvalita vjemu trojrozměrných předmětů hodnotí **činitelem podání tvaru** P , který je roven poměru světelného vektoru $\mathcal{E}$ ke střední kulové osvětlenosti $E_{4\pi}$

$$P = \frac{\mathcal{E}}{E_{4\pi}} \quad (-; lx, lx) \quad (3.48)$$

Nejvyššího stupně stínivosti a tudíž nejvyšší hodnoty činitele podání tvaru P se docílí v poli jediného svítidla bodového typu, kdy $\mathcal{E} = E_N$ a $E_{4\pi} = E_N / 4$ a tudíž $P = 4$.

Naopak v případě zcela difúzního osvětlení, kdy je $\mathcal{E} = 0$, je i činitel podání tvaru je $P = 0$.

V běžných osvětlovacích soustavách bývá činitel podání tvaru v mezích od 1,3 do 2,5.