

1. ÚVOD

Zdravé životní prostředí podmiňuje řada důležitých činitelů, k nimž patří jak voda, půda a vzduch (s jeho určitou teplotou, vlhkostí i obsahem škodlivých látek), tak také světlo. Světlo totiž nejen zásadně ovlivňuje podmínky zrakového vnímání, ale významnou měrou přispívá i k vytváření celkové duševní pohody lidí. Prostřednictvím svého zraku získává člověk asi 80 až 90% všech informací o prostředí, které ho obklopuje. Proto se lidé snaží využitím vhodných technických prostředků dosáhnout co nejlepších podmínek pro práci zraku.

Příjemný psychofyzilogický stav, při němž zrak plní své funkce s maximální účinností a při němž má člověk nejen pocit, že dobře vidí, ale cítí se také psychicky dobře a rovněž prostředí, v němž se nachází, je mu vzhledově příjemné, se označuje pojmem **zrková pohoda**. Činnost lidí zaměřená k dosažení podmínek zrakové pohody, včetně využití různých technických prostředků, se nazývá **osvětlování**.

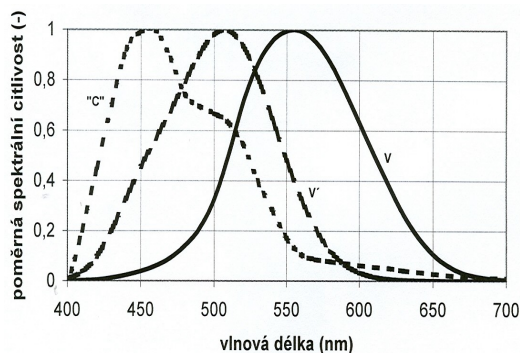
Působením světelného záření vyvolává okolní prostředí v člověku nejen fyziologické, ale i psychologické reakce, které jsou ovlivněny jak množstvím světelné energie, tak také jejím prostorovým a časovým rozdělením, druhem světla a jeho barevnou jakostí. Proto je nedílnou součástí prostředí, které člověka obklopuje, rovněž i prostředí světelné (světelné mikroklima). Dobré osvětlení v průmyslových podnicích umožňuje výrazně zvýšit produktivitu práce, její bezpečnost a rovněž jakost výroby. Dokonalejším uličním osvětlením lze snížit počet dopravních nehod po setmění téměř o jednu třetinu a zabránit tak mnoha hmotným škodám i ztrátám na lidských životech. Dobré veřejné osvětlení přispívá ke zvýšení všeobecné bezpečnosti osob i majetku, zvyšuje pravděpodobnost identifikace pachatele trestných činů a některé pachatele od trestné činnosti přímo odrazuje. Neméně závažnou roli hraje kvalitní osvětlení zdravotnických zařízení, kulturních a společenských prostorů i domácností. I v odpočinkových prostorech přispívá dobré osvětlení podstatnou měrou k dokonalejší a rychlejší psychické i fyzické regeneraci organismu člověka.

Nevhodné osvětlení může být příčinou úrazů nejen při práci a při běžném pohybu po komunikacích uvnitř budov nebo venku, ale také i při jiných činnostech spojených s rychlými pohyby, které vyžadují okamžité reakce jak na přijaté zrakové vjemy, tak i na jiné podněty. Nesprávné osvětlení zrakového úkolu při pracovních činnostech se projevuje nejen zrakovou, ale i celkovou únavou, kterou organismus signalizuje přetížením. Po určité době se pak obvykle dostavuje pálení očí, bolest hlavy a další obtíže.

Důležité jsou však i další vlivy světla na lidský organismus. Většina biologických pochodů v těle člověka pravidelně kolísá přibližně ve dvacetičtyřhodinovém (tzv. cirkadiánním) cyklu, který se vyznačuje aktivní fází ve dne a klidovou fází v noci a vyvinul se na základě pravidelného střídání světla a tmy v závislosti na otáčení Země kolem Slunce. Řídí se jím např. tělesná teplota, krevní tlak, tepová frekvence, látkový metabolismus, ladění organismu k práci nebo k odpočinku, produkce a uvolňování hormonů řídících funkce organismu a ovlivněny jsou také imunitní a sexuální funkce.

Na tvorbě biorytmů se podílí epifyza (šišinka), což je část mezimozku zprostředkovávající některé vlivy světla na organismus člověka. V epifyze se tvoří hormon melatonin, jehož produkce je ovlivňována světlem, při čemž nejvíce je tento hormon vylučován za tmy. Melatonin působí ospalost a má další účinky na činnost mozku, např. při nedostatku světla ovlivňuje zhoršení nálady, popříp. u některých jedinců až vznik deprese.

Z uvedeného je zřejmé, že vnitřní hodiny člověka řídí světlo. Paprsky světla dopadající do očí člověka jsou indikovány fotoreceptory a po komplikovaném zpracování, třídění a výběru transformovány a ve formě elektrických impulzů nervovými vlákny vedeny do mozkového centra. Tam se podle druhu a barvy světla rozliší, který účinek na člověka má být v danou dobu aktivován, tzn. např. zda má dojít k uvolnění (povolení napětí) nebo k oživení (zvýšení napětí).



Obr.1-1

Poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla (křivka „C“) zraku v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí očí průměrného člověka při denním (křivka V) a nočním (křivka V') vidění

Výsledky řady výzkumů potvrzují, že kromě známých fotoreceptorů, tj. čípků (reagujících převážně při denním či fotopickém vidění; obr.1-1 křivka V) a tyčinek (reagujících převážně při tzv. nočním či skotopickém vidění; obr.1-1 křivka V') je v sítnici ještě třetí druh fotoreceptorů (obr.1-1 křivka „C“), které jsou **čidly cirkadiánního systému**. Spektrální citlivost třetího druhu fotoreceptorů je soustředěna právě do modré oblasti viditelného spektra a její maximum je v oblasti vlnových délek 460 – 465 nm).

Úroveň odezvy třetího typu receptorů na světlo dopadající do oka člověka byla proto přijata za míru cirkadiánního vlivu a nazvána **činitel cirkadiánního účinku**.

Narušení biorytmů přináší člověku různé obtíže, od mírných pocitů deprese a nepohody, poruch spánku až k závažným zdravotním potížím a onemocněním. S uvedenými obtížemi se běžně setkávají lidé i při relativně rychlých leteckých cestách spojených s velkým posunem časového pásma, ale též při práci ve střídavých či nočních směnách; citlivější jedinci i při změnách letního a zimního času.

Dlouhodobý nedostatek světla negativně ovlivňuje zvláště vyvíjející se organismy, potlačuje dokonce normální vývoj některých orgánů a ovlivňuje chování jedinců ve skupinách.

K závažným příčinám narušení cirkadiánních rytmů a vzniku depresivních stavů provázených zmíněnými obtížemi patří dlouhodobý pobyt v prostředí s velmi nízkými hladinami osvětlenosti. Takové stavy se mohou vyskytovat např. v zimním období i u obyvatelů velkých měst, kteří pracují v krytých prostorech a dopravují se veřejnou, zejména podpovrchovou, dopravou. Odborníci odhadují, že v zimě syndromem sezónní deprese, spojeným se snižováním pracovní, společenské i sexuální aktivity, pocity ospalosti v průběhu dne, zvyšováním tělesné hmotnosti a dalšími jevy, trpí např. v New Yorku až asi 10% obyvatel. Jsou-li postižení opakovaně vystaveni vysokým hladinám osvětlenosti (např. 2 h denně hladině 2.500 lx, popříp. pouze půl hodiny denně, ale hladině 10.000 lx), dochází u většiny z nich k výraznému zlepšení jejich stavu. Světelného záření se využívá i k léčení některých dalších onemocnění, např. těžkých forem alergie. Známa je též léčba novorozenecké žloutenky ozařováním světlem halogenidových výbojek.

Záření ve viditelné oblasti spektra je důležité nejen pro život lidí a zvířat, ale i pro rostliny. Působením viditelného záření probíhá v zelených částech rostlin za přítomnosti chlorofylu, jako katalyzátoru, fotosyntéza, tedy chemický proces, při němž vznikají z oxidu uhličitého a z vody některé organické sloučeniny. Fotosyntéza zabezpečuje základní koloběh látek na Zemi. Bez ní by na Zemi neexistoval život. Fotosyntetické aktivity viditelného záření umělých světelných zdrojů se široce využívá v zemědělství, a to nejen při výzkumu pěstování různých rostlin a při vývoji jejich nových, hospodářsky významných odrůd, ale i při produkčním pěstování plodin ve sklenících v období nedostatku denního světla.

Viditelné záření významně ovlivňuje fotoperiodicky závislý vývoj rostlin. Změnou délky světelného dne v průběhu roku je tak např. možné načasovat kvetení skleníkových rostlin v potřebném termínu.

Působením viditelného záření spolu se zářením ultrafialovým a infračerveným může u některých citlivějších materiálů (tkaniny, obrazy a jiné umělecké předměty, dokumenty aj.) docházet k jejich rychlejšímu stárnutí, ke ztrátě barevných vlastností (kolority), popřípadě i k dalším poškozením (narušení jejich struktury a mechanické pevnosti). Na druhé straně správně řešené osvětlení může umělecká díla, architekturní prvky, popřípadě i celé stavby zvýraznit a zvýšit jejich působivost.

V souvislosti se zvyšujícími se požadavky na kvalitu, efektivnost i množství vykonávané práce i se vzrůstajícími úkoly v oblasti zlepšování pracovního a životního prostředí stále stoupají nároky na úroveň osvětlení a zvětšuje se i rozsah a doba využití prostorů s umělým osvětlením. Technika osvětlování je proto důležitým prostředkem, kterým lidé ve značné míře mohou ovlivnit úroveň svého životního prostředí. Při dodržení zásad správného osvětlení lze totiž v souladu s technickými a ekonomickými možnostmi vytvořit příznivé podmínky pro požadovanou činnost lidí a pro vznik jejich zrakové pohody.

2. ZRAKOVÝ ORGÁN A VIDĚNÍ

Vidění je proces probíhající ve zrakovém systému a zahrnující jak příjem informace přinášené do oka světelným podnětem, tak její zpracování, transformaci optických podnětů v nervové vzruchy a jejich přenos zrakovým nervem k mozgovým centrům vidění, kde vzniká zrakový počitek. Syntézou počitků se pak ve vědomí člověka vytváří vjem umožňující poznání, identifikaci pozorovaného předmětu a jeho určité zařazení ve vědomí, a to buď k bezprostřednímu využití při určité činnosti nebo k uchování v paměti k pozdější aplikaci.

Při osvětlování se vychází z rozboru systému, složeného v zásadě z pozorovaných objektů, světla a zrakového orgánu. V tomto systému je zrakový orgán zařízením pro příjem a zpracování informace o vnějším prostředí a světlo pak je médiem tuto informaci přenášejícím. To znamená, že světlo a způsob jeho využití, tedy osvětlování, jsou prostředky, které mohou proces vnímání buď usnadnit nebo ztížit.

Množství informace získané zrakem a přenášené do mozku člověka je možno charakterizovat **informačním výkonem**. Jeho velikost stoupá se zvyšujícími se jasy pozorovaných objektů.

Informační výkon se zvyšující se osvětleností sice stoupá, ale jeho nárůst je limitován maximální přenosovou kapacitou informačního kanálu. Na nárůst informačního, resp. zrakového, výkonu má proto podstatně větší vliv zvýšení osvětlenosti v oblasti relativně nízkých hladin (50 lx), než zvyšování poměrně vysokých osvětleností v oblasti nad 500 lx. I tyto skutečnosti je třeba mít na zřeteli při navrhování jak denního, tak i umělého osvětlení.

Čidlem (přijímačem) zrakového orgánu je oko, které má, zjednodušeně vzato, část optickou a část nervovou. Optická část (rohovka, přední komora, duhovka se zornicí, čočka, sklivce) také jen zprostředkovává příjem informace. Vady této části oka lze většinou korigovat optickými prostředky. Ovšem i tak je téměř vždy refrakční vada oka (např. krátkozrakost, dalekozrakost a další) i při přiměřené korekci brýlemi spojena se zmenšením rozlišovací schopnosti oka a se zhoršením zpracování informace v nervové části. Proto je v těchto případech zapotřebí zajistit kvantitativně i kvalitativně lepší osvětlení.

K nervovému systému oka náleží kromě nervového zásobení zejména sítnice, což je průsvitná poměrně tenká blána s velmi složitou buněčnou skladbou. V jedenácti vrstvách složité struktury sítnice jsou kromě fotoreceptorů (k nimž náleží jak čidla cirkadiánního systému, tak asi 6,5 milionu čípků a cca 125 milionů tyčinek) rozmístěny i další důležité nervové buňky, které svými komplikovanými vzájemnými účinky fotoreceptory zachycenou informaci zpracovávají, zakódovávají i vybírají a dále přes vlákna zrakového nervu předávají do centra nervové soustavy. Rozmístění fotoreceptorů v sítnici není rovnoměrné. Čípky jsou soustředěny více ke středu sítnice, zatím co tyčinky jsou hustěji umístěny při kraji sítnice. V místě, kde vstupuje do sítnice zrakový nerv, nejsou žádné nervové buňky, tedy ani fotoreceptory a toto místo se proto nazývá slepá skvrna. Uprostřed sítnice je, jasně hnědá, cév prostá oblast, tzv. žlutá skvrna, jejíž střední

prohloubená část (centrální jamka - fovea) je místem přímého vidění a největší rozlišovací schopnosti a obsahuje z fotoreceptorů pouze čípky (asi 800.000).

Základní funkční jednotkou sítnice není však jeden receptor, ale **vjemové pole**, což je část plochy sítnice, z níž lze podráždit jedno vlákno zrakového nervu. Protože existují nervová spojení i mezi samotnými receptory, mohou se vjemová pole též částečně překrývat.

Přizpůsobení oka různým hladinám osvětlenosti se nazývá **adaptace**. Oko je schopné přizpůsobit se osvětlenostem v rozmezí asi od $0,25 \text{ lx}$ až do 10^5 lx (avšak může vnímat ještě asi při $2 \cdot 10^{-9} \text{ lx}$). Těmto velkým změnám osvětlenosti se oko přizpůsobuje jednak změnou otvoru zornice, jednak změnou citlivosti fotoreceptorů a dále změnou velikosti vjemových polí sítnice. Významné v tomto směru je i uplatnění pouze čípků při vysokých hladinách osvětlenosti a jasů, např. při denním světle, (takové vidění se nazývá **denní** či **fotopické** a uskutečňuje se při jasech vyšších než 10 cd.m^{-2}) a naopak uplatnění jen daleko citlivějších tyčinek při hladinách jasů nižších než asi $0,001 \text{ cd.m}^{-2}$ (vidění **noční** či **skotopické**). Vidění, při němž se uplatňují oba druhy fotoreceptorů se nazývá **mezopické** (oblast jasů cca $0,001 \text{ cd.m}^{-2}$ až 10 cd.m^{-2}).

Podle tzv. trojkomponentní teorie existují tři druhy čípků, které se vzájemně liší spektrální citlivostí k záření různých vlnových délek. Jeden druh je citlivý na záření v modré oblasti spektra, druhý na žlutozelené světlo a třetí na dlouhovlnné červené světlo. Tím je při fotopickém, ale i při mezopickém vidění umožněno barevné vidění. Ani tyčinky nejsou stejně citlivé na všechny barvy. Nejcitlivější jsou na modrofialovou barvu, podstatně méně na barvu červenožlutou.

Přizpůsobení se oka vzdálenosti pozorovaného předmětu k dosažení ostrého zobrazení se nazývá **akomodace**. S věkem akomodační schopnost klesá a u starších lidí se obvykle upravuje brýlemi.

Zrak člověka nepracuje staticky. Oči se neustále pohybují a obraz na sítnici se proto též mění (asi 5 obrázků za sekundu). Dojem o státnosti pozorovaného prostředí vzniká vlivem kompenzačních mechanismů, které ruší informaci o změně vyvolané pohybem očí, hlavy či těla. Proto člověk vnímá jako takové pouze ty změny, které skutečně ve vnějším prostředí proběhly. Dynamičnost zrakových funkcí je nutno brát v úvahu zvláště při návrhu rozložení jasů v daném prostoru. Překročí-li se totiž meze adaptability zraku, vzniká oslnění.

K lepšímu rozlišování a identifikaci povrchů a detailů značně přispívá dvojoké (binokulární) vidění, při němž se jedinečně může plně uplatnit stereoskopický mechanismus hloubkového vidění. Jednooký člověk nejen, že je zbaven hloubkového vidění, ale má zúžené zorné pole a navíc nezískává celý soubor informací zprostředkovaných kvalitativními parametry osvětlení.

V centrech nervové soustavy vyvolávají informace o světelných popudech jednak reflexní reakce organismu nezávislé na vědomí člověka (přizpůsobování zrakového orgánu, vliv na metabolismus, krevní skladbu apod.) a jednak reakce plynoucí ze zrakového vjemu a uvědomění si situace (souvisí s myšlením, cítěním, pozorností, představivostí, vzrušením apod.). Úzká souvislost práce zraku s centrální nervovou soustavou zapříčiňuje, že na zrakové vnímání mají podstatný vliv různé rušivé či uklidňující momenty a vlivy obklopujícího prostředí, např. vzrušení, hněv, chlad, zvýšená teplota, hluk, pracovní vypětí, na druhé straně dobrá nálada, radost, příjemné prostředí, klid, pocit z dobře vykonané práce apod. Zraková nepohoda nevede tedy jen k narušení zrakových funkcí a tím k oční únavě, ale projevuje se nepříznivě v celkové kondici a náladě člověka a v jeho výkonnosti.

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 vyzářené 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.

Světelný tok Φ monochromatického záření vlnové délky λ , jehož zářivý tok je Φ_e se určí ze vztahu

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

Veličina $K(\lambda)$ ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$) je **světelná účinnost monochromatického záření** rovná poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku. Maximum K_m veličiny $K(\lambda)$ bylo stanoveno poměrně přesnými měřeními a výpočty pro normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém (denním) vidění a záření základní vlnové délky

$$\lambda = \lambda_m = 555,155 \text{ nm} \text{ a činí } K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}.$$

Poměrná světelná účinnost $V(\lambda)$ monochromatického záření je definována vztahem

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

Z hlediska individuálního pozorovatele je veličina $V(\lambda)$ totožná s poměrnou spektrální citlivostí pozorovatele (obvykle normálního fotometrického 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 $K'(\lambda)$, $K'_m = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 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 $V'(\lambda)$.

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.3-1.

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

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

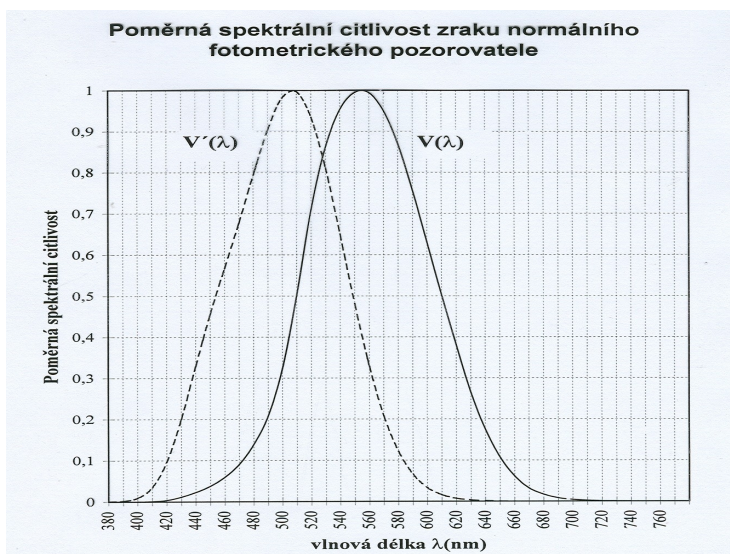
kde výraz $\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)$ je spektrální hustota zářivého toku Φ_e v bodě λ .

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

$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) \cdot V(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}) \quad (3-4)$$

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	0,00025	0,000001379
750	0,00012	0,000000760
760	0,00006	0,000000425
770	0,00003	0,000000241
780	0,000015	0,000000139



Obr. 3-1

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

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

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

Vzorec (3-4) pro výpočet světelného toku složeného záření lze pak upravit do tvaru

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

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

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

Světelný tok Φ odpovídající uvažovanému zářivému toku Φ_e pak vychází

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

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 monochromatické záření definovány veličiny $K(\lambda)$ a $V(\lambda)$, definují se pro složené záření pojmy:

$$\text{světelná účinnost záření} \quad K = \Phi / \Phi_e \quad (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; \text{lm}, \text{W}) \quad (3-5)$$

$$\text{poměrná světelná účinnost slož. záření} \quad V = K / K_m \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (3-6)$$

3.2 Prostorový úhel

Důležitou geometrickou veličinou používanou ve světelně technických výpočtech je prostorový úhel. Jeho velikost je určena velikostí plochy, vyřaté 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 ($r = 1 \text{ m}$).

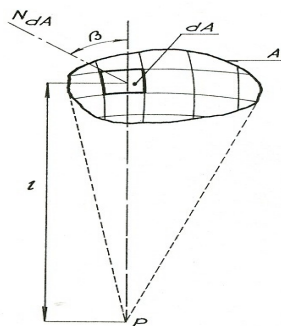
Prostorový úhel Ω , pod nímž je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A_k vyřatá na povrchu této koule, se stanoví ze vztahu

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

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

Obr. 3 - 2

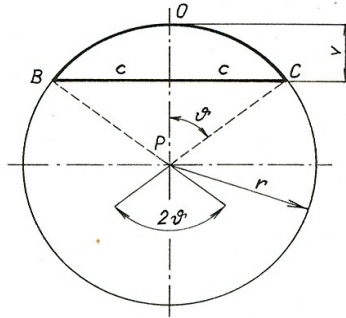
$$\Omega = \iint_A \frac{\cos \beta}{l^2} dA \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad (3-9)$$

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

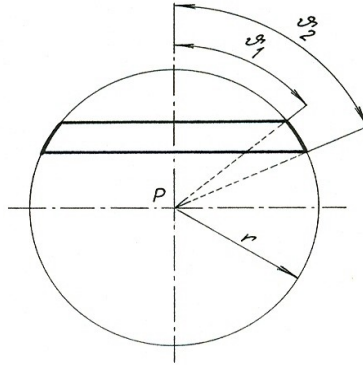
$$\Omega = \frac{2\pi r v}{r^2} = 2\pi (1 - \cos \vartheta) \quad (\text{sr; m, m, -}) \quad (3-10)$$

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 rovinnou 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.

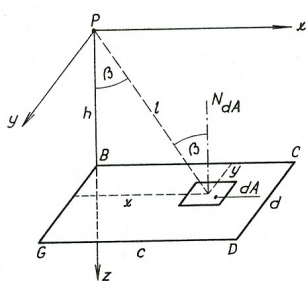
V praxi se často počítá prostorový úhel, pod nímž se z určité vzdálenosti pozoruje obdélníková plocha. Stanovme nejprve prostorový úhel, pod nímž je z bodu P vidět obdélník BCDG umístěný podle obr. 3-5 v souřadnicové soustavě x, y, z v rovině rovnoběžné s rovinou xy ve vzdálenosti h od počátku P soustavy. 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 dW , 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 dW 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

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

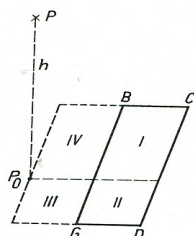
$$\text{a poměrné rozměry obdélníku} \quad a = c/h, \quad b = d/h.$$

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

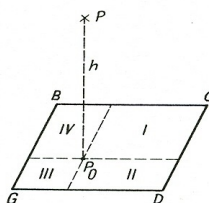
$$\Omega = \operatorname{arctg} \frac{c \cdot d}{h \cdot \sqrt{c^2 + d^2 + h^2}} = \operatorname{arctg} \frac{a \cdot b}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}} \quad (\text{sr; m, m, m; -, -}) \quad (3-14)$$

Určuje-li prostorový úhel, pod nímž je z bodu P vidět obdélník BCDG, umístěný podle obr.3-6 v rovině kolmé k úsečce PP₀, 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 PP₀, 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 úhrnného 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

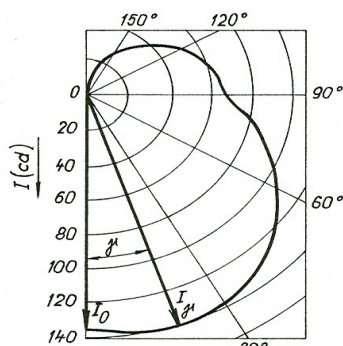
$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad (\text{cd; lm, sr}) \quad (3-17)$$

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 nanesou-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.



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 vztažného směru (viz obr.3-11)

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

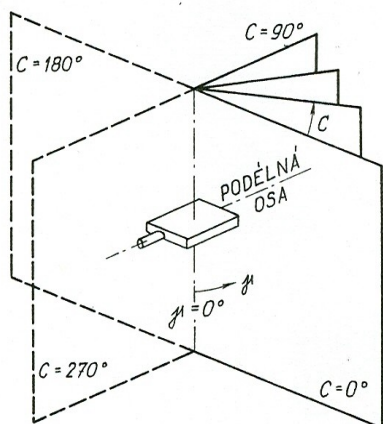
$f_I(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) svítivosti matematicky popisující uvažovanou křivku svítivosti; nejčastěji se k aproximaci využívá funkcí

$\cos^n \gamma$ (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 $C-\gamma$

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

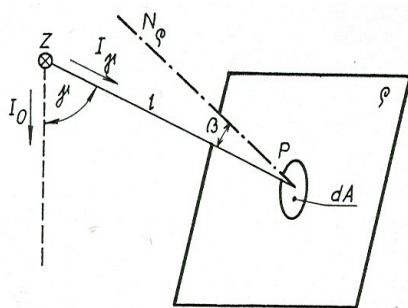
Osvětlenost (intenzita osvětlení) E rovinné plošky dA , tj. plošná hustota světelného toku dF dopadlého na plošku dA je určena vztahem

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

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); $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm.m}^{-2}$.

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



Obr.3-10

K výpočtu osvětlenosti E_{pp} 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 (3-21), (3-19) a (3-8) odvodit pro osvětlenost E_{pp} v bodě P roviny ρ bodovým zdrojem výraz

$$E_{Pr} = \frac{I_g}{l^2} \cdot \cos b \quad (lx; cd, m, -) \quad (3-20)$$

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

$$E_{Pr(b=0)} = E_N = \frac{I_g}{l^2} \quad (lx; lx; cd, m) \quad (3-21)$$

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

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

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

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

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 síť kontrolních bodů v uvažované rovině popsat zjištěnými hodnotami osvětlenosti, popřípadě ještě pospojovat body stejných osvětleností a nakreslit tedy čáry nazývané izoluxy. Síť 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 stíničkách 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 dF přenášeného uvažovaným svazkem paprsků

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

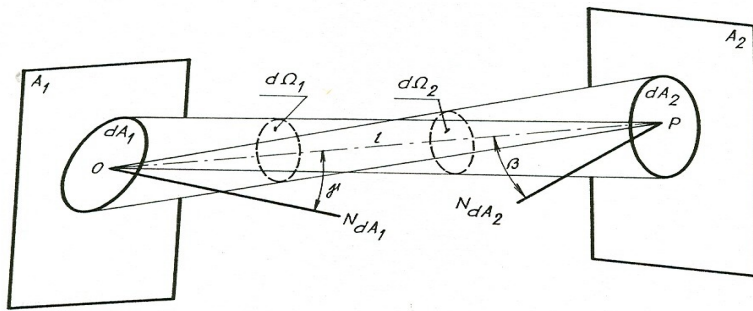
Předpokládá se, že rozměry otvorů dA_1 a dA_2 jsou zanedbatelné ve srovnání se vzdáleností l mezi stíničky A_1 a A_2 .

Při tom podle rovnice (3-8) platí, že prostorový úhel dW_1 , pod nímž je ze středu P otvoru dA_2 vidět otvor dA_1 je roven

$$dW_1 = dA_1 \cdot \cos\gamma \cdot l^2 \quad (3-23)$$

a dále, že prostorový úhel dW_2 , pod nímž je ze středu O otvoru dA_1 vidět otvor dA_2 je roven

$$dW_2 = dA_2 \cdot \cos\beta \cdot l^2 \quad (3-24)$$



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 dW_1 z plošky dA_1 do bodu P vyplývá z rovnice (3-22 a (3-23) výraz

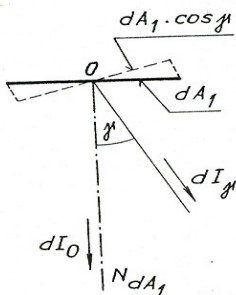
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 \cdot dA_2 \cdot \cos b} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \text{lm, sr, m}^2; \text{lx, sr}) \quad (3-25)$$

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 dW_2 , plyne z rovnic (3-22) a (3-24) vztah

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

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.



Obr. 3-12

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 m^2 (cd.m^{-2}) [dřívější označení nit (nt)].

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

stilb (sb): $1 \text{ sb} = 1 \text{ cd.cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd.m}^{-2}$;

apostilb (asb) : $1 \text{ asb} = 1 \text{ lm.m}^{-2} = (1 / \pi) \text{ cd.m}^{-2} = 0,3183 \text{ cd.m}^{-2}$;

lambert (La) : $1 \text{ La} = 1 \text{ lm.cm}^{-2} = (1 / \pi) \text{ sb} = 3183 \text{ cd.m}^{-2}$;

footlambert (fL) : $1 \text{ fL} = 3,426 \text{ cd.m}^{-2}$; $1 \text{ candle . foot}^{-2} = 1 \text{ cd.ft}^{-2} = 10,764 \text{ cd.m}^{-2}$.

Jas svazku paprsků ať 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 nevládnutelné. 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

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

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

L_g 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

$$L_g = L_o \cdot f_L(g) = \frac{dI_g}{dA_1 \cdot \cos g} = \frac{dI_o \cdot f_I(g)}{dA_1 \cdot \cos g} \quad (3-28)$$

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 $4 \times 18 \text{ W}$ 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

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

3.6 Světlení

Světlení je definováno jako plošná hustota světelného toku dF_v vyzařovaného z plošky dA , tj. výrazem

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

Jednotkou světlení je 1 lm.m^{-2} .

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

3.7 Veličiny charakterizující světelně 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. Odraznosti 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_ρ , která se odrazí, na část Φ_τ , která hmotou projde a na část Φ_α , kterou látka pohltí. Platí tedy

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad (\text{Im; Im, Im, Im}) \quad (3-31)$$

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

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

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(l)}{dl} \right)_l \cdot V(l) \cdot r(l) \cdot dl}{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(l)}{dl} \right)_l \cdot V(l) \cdot dl} \quad (3-33)$$

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

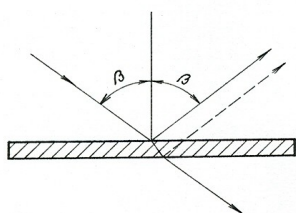
materiál	činitel (%)		
	odrazu ρ	prostupu τ	pohlcení α
sklo čiré (tloušťka 2 až 4 mm)	6 - 8	90 - 92	2 - 4
sklo matované leptané (tl. 2 až 3 mm)	6 - 11	75 - 91	3 - 19
sklo opálové bílé (tl. 2 až 3 mm)	29 - 52	36 - 66	3 - 10
sklo opalizované (tl. 2 až 3 mm)	13 - 28	59 - 84	3 - 13
mramor bílý lesklý (tl. 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

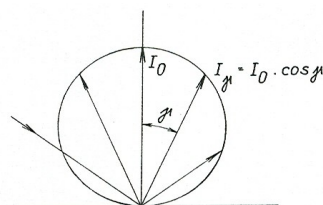
materiál, povrch		ρ (%)
hliník	plátovaný	75 - 90
	leštěný	60 - 72
	matný	55 - 60
stříbro	leštěné	85 – 94
platina	leštěná	62
zlato	leštěné	70
nikl	leštěný	53 – 63
chrom	leštěný	60 – 70
ocel	nerez leštěná	55 – 60
smalt	bílý	85 – 90
žula		asi 44
cihly	žluté	asi 35
cihly	červené	asi 25
sádra		asi 80
malta	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 (zed’)	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 odražející 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 rovnoměrně rozptýlné plochy **plochou kulovou** (viz obr.3 - 14) a indikatrix svítivosti je $f_I(g) = \cos g$.

- 3) Mezi světlením M difúzního povrchu a jeho konstantním jasnem L platí důležitá souvislost

$$M = p \cdot L \quad (1\text{m} \cdot \text{m}^{-2}; -, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3-34)$$

- 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

$$M = \rho \cdot E = p \cdot L \quad (1\text{m} \cdot \text{m}^{-2}; -, \text{lx}, -, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (3-35)$$

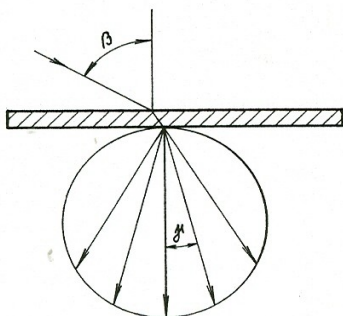
Uvedený vztah umožňuje například při známé osvětlenosti a činitele odrazu stanovit jas difúzně odrážejícího povrchu nebo naopak vypočítat z předem zjištěných hodnot E a L činitele odrazu ρ .

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 rozptýlné plochy, neboť se tím výpočty podstatně zjednodušují. Pokud se tedy vlastnosti skutečných svítících ploch blíží vlastnostem rovnoměrně rozptýlovače, 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 zrcadlové 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 - 17). Přitom může podle dalších vlastností uvažované látky docházet i k částečným odrazům.



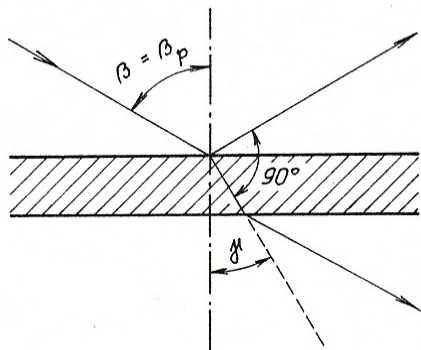
Obr. 3 -19

Náčrt kosinusového rozložení svítivosti při dokonalém rovnoměrně rozptýlném prostupu světelných paprsků

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 rozptýlném prostupu světelných paprsků je tedy fotometrická plocha svítivosti opět plochou kulovou (viz obr. 3-19) a světelně technické vlastnosti druhé strany této průsvitné látky jsou pak stejné jako vlastnosti povrchu vykazujícího rovnoměrně rozptýlný odraz.

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



Obr. 3 – 20

Při odrazu světla na povrchu průhledných látek, např. skla, může dojít k polarizaci světla. Při průchodu světla sklem (viz obr.3-20) 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

$$n = \frac{\sin b}{\sin g}$$

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

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

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

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

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.

4. PROSTOROVÉ CHARAKTERISTIKY OSVĚTLENÍ

Osvětlovaný prostor, tj. část prostoru, v níž probíhá přenos světelné energie, je možno posuzovat jako světelné pole, v jehož libovolném bodě lze výpočtem nebo měřením potvrdit existenci světla určením některé světelné technické veličiny, např. osvětlenosti rovinné plochy. K charakteristice úrovně prosvětlení prostoru, směrovosti a stínivosti osvětlení, tzn. k souhrnnému ocenění prostorových vlastností osvětlení se nejčastěji využívá veličin, které každému bodu pole přiřazují pouze jednu hodnotu, rovnou střední hodnotě osvětlenosti povrchu použitého modelového přijímače, a nazývají se proto integrální charakteristiky světelného pole. Jde zejména o světelný vektor $\mathbf{e}$, o kulovou osvětlenost $E_{4\pi}$ (tj. o střední hodnotu osvětlenosti povrchu elementární koule) a o válcovou osvětlenost E_c (tj. o střední hodnotu osvětlenosti pláště elementárního válečku svisle umístěného do daného bodu pole). Hodnoty integrálních charakteristik se udávají v luxech.

Velikost ε světelného vektoru $\mathbf{e}$ je obecně rovna rozdílu osvětleností obou stran plošky, umístěné v daném bodě pole kolmo k výslednému směru šíření záření. Orientovaný směr světelného vektoru je shodný s orientovaným směrem přenosu světelné energie. Světelný vektor v daném bodě charakterizuje převažující tok světelné energie a určuje tedy směrovost osvětlení. V poli jediného bodového zdroje je v daném bodě světelný vektor roven přímo normálové osvětlenosti E_N .

Střední kulová osvětlenost $E_{4\pi}$ je definována jako střední hodnota osvětlenosti povrchu koule zanedbatelných rozměrů, jejíž střed se umístí do uvažovaného bodu pole. Jde o skalární veličinu rovnou jedné čtvrtině součtu všech normálových osvětleností v daném bodě

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

Příklad :

V poli jediného bodového zdroje se svítivostí $I_\gamma = 1000 \text{ cd}$ ve směru ke kontrolnímu bodu P umístěnému ve vzdálenosti $l = 2 \text{ m}$ od zdroje, je v bodě P

velikost světelného vektoru $\varepsilon = E_N = I_\gamma / l^2 = 1000 / 2^2 = 250 \text{ lx}$

a střední kulová osvětlenost $E_{4\pi} = 0,25 \cdot E_N = 250 / 4 = 62,5 \text{ lx}$.

Střední kulové osvětlenosti se využívá k objektivnímu vystižení subjektivního dojmu pozorovatelů o dostatečnosti prosvětlení uvažovaného prostoru.

Kvalita vjemu trojrozměrných předmětů je podmíněna zejména schopností osvětlení vytvářet na trojrozměrných předmětech stíny, tj. stínivosti osvětlení.

Stupeň stínivosti, dříve oceňovaný poměrem přímé složky osvětlenosti k její celkové hladině, se s využitím integrálních charakteristik hodnotí **činitelem podání tvaru** P, který je roven poměru světelného vektoru ke střední kulové osvětlenosti ($P = \varepsilon / E_{4\pi}$). Nejvyššího stupně stínivosti a tudíž nejvyšší hodnoty činitele podání tvaru P se docílí v poli jediného svítidla bodového typu, kdy $\varepsilon = E_N$ a $E_{4\pi} = E_N / 4$ a tudíž $P = 4$.

Naopak v případě zcela difúzního osvětlení, kdy je $\varepsilon = 0$, je i činitel podání tvaru je $P = 0$.

Využitím zmíněných integrálních charakteristik světelného pole se podstatně rozšiřují možnosti objektivního hodnocení kvality osvětlovacích soustav, a to jak z hlediska vystižení dojmu o dostatečnosti prosvětlení prostoru, tak i pokud jde o charakteristiku úrovně vjemu trojrozměrných předmětů.